

ISSN 2500-2627

Номер 5

Сентябрь - Октябрь 2024



РОССИЙСКАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ НАУКА

Научно-теоретический журнал



НАУКА

— 1727 —

Земледелие и мелиорация

- К. Н. Кулик, А. А. Гаркуша, В. И. Усенко, В. И. Кравченко, Д. В. Пургин**
Резервы увеличения урожайности полевых культур на каштановых почвах сухой степи Западной Сибири 3
- В. С. Бойко, А. Ю. Тимохин**
Потенциал продуктивного долголетия бобово-мятликовой смеси на юге Западной Сибири 8
- Е. В. Дубовик, Д. В. Дубовик, А. Н. Морозов**
Влияние технологии возделывания на содержание микроэлементов в растениях гороха 13

Растениеводство, защита и биотехнология растений

- А. А. Новиков, К. А. Родин, С. В. Мельник, А. С. Кажгалиев**
Влияние различных систем защиты растений на микромицеты при возделывании картофеля в условиях Нижнего Поволжья 20

Агропочвоведение и агроэкология

- А. А. Завалин, Дж. Ньямбосе, Л. С. Чернова**
Оценка устойчивости агроэкосистемы при возделывании яровой пшеницы с применением ^{15}N и инокуляции семян биопрепаратами 24
- С. И. Тютюнов, Е. В. Навольнева, К. В. Дорохин, И. В. Логвинов, А. С. Пойменов**
Показатели почвенного плодородия чернозема типичного после длительного применения различных систем удобрений 28
- А. Г. Муштаков, Е. Б. Маркова, А. В. Курочкин, Н. А. Анистратов, Ю. М. Зайцева, Е. А. Гусева, Л. Г. Скворцова, А. Г. Чередниченко, А. П. Глинушкин**
Извлечение ионов тяжелых металлов из водных растворов каркасными сорбентами на основе бензол-1,3,5-трикарбоксилатов (МВТС) и бензол-1,4-дикарбоксилатов (МВДС) различных металлов 33

Зоотехния и ветеринария

- И. Ф. Горлов, М. И. Сложенкина, Т. А. Магомадов, А. Ю. Юлдашбаева, О. П. Шахбазова, Р. Г. Раджабов**
Хозяйственно-биологические особенности баранчиков, полученных от скрещивания овцематок эдильбаевской породы с дорпером 41

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

- А. А. Завражнов, А. И. Завражнов**
Бестракторное земледелие – межотраслевая сквозная технология сельского хозяйства 45
- А. С. Дорохов, Ю. В. Катаев, М. Н. Костомахин, Н. А. Петрищев, Е. В. Пестряков, А. С. Саяпин**
Управление техническим состоянием сельскохозяйственной техники с применением цифровых технологий 51
- В. А. Шахов, П. Г. Учкин, И. М. Затин, М. И. Голубев**
Разработка технологии восстановления рабочих органов почвообрабатывающих машин лазерной наплавкой 57
- Д. А. Миронов, А. К. Ламм, Р. К. Расулов**
Исследование метода селективного лазерного спекания для упрочнения почвообрабатывающих рабочих органов 62
- В. В. Шаров, Ю. С. Ценч, С. А. Серебряков, М. И. Дмитриев, Д. В. Мельников**
Столетний юбилей трактора «Фордзон-Путиловец» 67

Agriculture and land reclamation

- K. N. Kulik, A. A. Garkusha, V. I. Usenko, V. I. Kravchenko, D. V. Purgin**
Reserves for increasing the yield of field crops on chestnut soils of the dry steppe of Western Siberia 3
- V. S. Boiko, A. Yu. Timokhin**
Potential of productive longevity of legum-mint grass mixture in the south of Western Siberia 8
- E. V. Dubovik, D. V. Dubovik, A. N. Morozov**
The influence of cultivation technology on the content of trace elements in pea plants 13

Crop production, plant protection and biotechnology

- A. A. Novikov, K. A. Rodin, S. V. Mel'nik, A. S. Kazhgaliev**
The influence of various plant protection systems on micromycetes in potato cultivation in the conditions of the Lower Volga region 20

Agro-soil science and agroecology

- A. A. Zavalin, J. Nyambose, L. S. Chernova**
Assessment of the stability of spring wheat agrocenosis with application of ^{15}N and seed inoculation with biotics 24
- S. I. Tyutyunov, E. V. Navolneva, K. V. Dorokhin, I. V. Logvinov, A. S. Poimenov**
Indicators of soil fertility of chernozem typical after prolonged use of various fertilizer systems 28
- A. G. Mushtakov, E. B. Markova, A. V. Kurochkin, N. A. Anistratov, Yu. M. Zaitsev, E. A. Guseva, L. G. Skvortsova, A. G. Cherednichenko, A. P. Glinushkin**
Extraction of heavy metal ions from aqueous solutions by frame sorbents based on benzene-1,3,5-tricarboxylate (MBTC) and benzene-1,4-dicarboxylates (MBDC) of various metals 33

Animal science and veterinary medicine

- I. F. Gorlov, M. I. Slozhenkin, T. A. Magomadov, A. Yu. Yuldashbayeva, O. P. Shakhbazov, R. G. Rajabov**
Economic and biological features of sheep obtained from crossing the edilbaev breed with a dorper 41

Mechanization, electrification, automation and digitalization

- A. A. Zavrazhnov, A. I. Zavrazhnov**
Tractor-free agriculture is an intersectoral end-to-end technology of agriculture 45
- A. S. Dorokhov, Yu. V. Kataev, M. N. Kostomakhin, N. A. Petrishchev, E. V. Pestryakov, A. S. Sayapin**
Management of the technical condition of agricultural machinery using digital technologies 51
- V. A. Shakhov, P. G. Uchkin, I. M. Zatin, M. I. Goloubev**
Development of technology for restoration and hardening of working bodies of tillage machines by laser surfacing 57
- D. A. Mironov, A. K. Lamm, R. K. Rasulov**
Research of the method of selective laser sintering for strengthening soil tillage working organs 62
- V. V. Sharov, Y. S. Tsench, S. A. Serebryakov, M. I. Dmitriev, D. V. Melnikov**
Centenary of the «Fordson-Putilovets» tractor 67

Земледелие и мелиорация

УДК 631.582; 631.84; 633.11; 633.13; 633.85

DOI 10.31857/S2500262724050018 EDN SJGWNN

**РЕЗЕРВЫ УВЕЛИЧЕНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ПОЛЕВЫХ КУЛЬТУР
НА КАШТАНОВЫХ ПОЧВАХ СУХОЙ СТЕПИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

© 2024 г. **К. Н. Кулик**¹, доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН,
А. А. Гаркуша², кандидат сельскохозяйственных наук, **В. И. Усенко**², доктор сельскохозяйственных наук,
В. И. Кравченко², кандидат сельскохозяйственных наук, **Д. В. Пургин**², кандидат сельскохозяйственных наук

¹Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения Российской академии наук,
400062, Волгоград, просп. Университетский, 97
E-mail: info@vfanc.ru

²Федеральный Алтайский научный центр агробιοтехнологий,
656910, Барнаул, пос. Научный городок, 35
E-mail: aniish@mail.ru

Исследования проводили с целью оценки резервов увеличения урожайности яровой мягкой пшеницы, овса и подсолнечника на каштановых почвах сухой степи юга Западной Сибири для повышения продуктивности пашины. Работу выполняли в 2016–2023 гг. в длительном стационарном полевом опыте в Западно-Кулундинской подзоне Алтайского края. Схема эксперимента предусматривала сравнительное изучение эффективности полевых севооборотов с различным насыщением пшеницей и подсолнечником на неудобренном и удобренном (N_{30}) фонах. На каштановых почвах сухой степи влияние азотных удобрений на изменение урожайности пшеницы по чистому пару было определяющим (доля вклада фактора 87,4%), овса и подсолнечника – сильным (соответственно 68,2 и 57,5%), пшеницы по непаровым предшественникам – значительным (36,8%), продуктивности пашины – существенным (24,2%). Влияние севооборота на изменение продуктивности пашины было определяющим (74,2%), урожайности пшеницы по непаровым предшественникам – сильным (62,5%), подсолнечника и овса – значительным (соответственно 41,4% и 31,5%), пшеницы по пару – слабым (11,7%). Наиболее благоприятные в опыте условия для пшеницы и подсолнечника складывались после пара, для пшеницы по непаровым предшественникам – при размещении после овса, для овса – после пшеницы в зернопаропропашных севооборотах с одним полем подсолнечника. Продуктивность пашины была минимальной в опыте в севооборотах без подсолнечника (0,46...0,57 тыс. зерн. ед./га). При доле подсолнечника 16,7...25% величина этого показателя возрастала по отношению к зернопаровому севообороту и бессменной пшенице на 0,16...0,28 тыс. зерн. ед./га (28,1...60,9%), а при 50% – на 0,31...0,42 тыс. зерн. ед./га (54,4...91,3%). Внесение азотных удобрений под культуры в зернопаропропашных и зернопропашных севооборотах обеспечивало увеличение продуктивности пашины на 0,15...0,25 тыс. зерн. ед./га (20,5...28,4%) по отношению к неудобренному фону при окупаемости 1 кг азота до 8,33 зерн. ед.

**RESERVES FOR INCREASING THE YIELD OF FIELD CROPS ON CHESTNUT SOILS
OF THE DRY STEPPE OF WESTERN SIBERIA**

K. N. Kulik¹, **A. A. Garkusha**², **V. I. Usenko**², **V. I. Kravchenko**², **D. V. Purgin**²

¹Federal scientific center of agro-ecology, integrated land reclamation
and protective afforestation of the Russian academy of sciences,
400062, Volgograd, prosp. Universitetskii, 97
E-mail: info@vfanc.ru

²Federal Altai scientific center of agrobiotechnology,
656910, Barnaul, pos. Nauchnyi gorodok, 35
E-mail: aniish@mail.ru

The research was carried out in order to assess reserves for increasing the yield of spring soft wheat, oats and sunflower on chestnut soils of the dry steppe of the south of Western Siberia to increase the productivity of arable land. The work was performed in 2016–2023 in a long-term stationary field experiment in the West Kulunda subzone of the Altai Territory. The experimental scheme provided for a comparative study of the effectiveness of field crop rotations with different saturation of wheat and sunflower on non-fertilized and fertilized (N_{30}). On chestnut soils of the dry steppe, the effect of nitrogen fertilizers was decisive in changing the yield of wheat by pure steam (87.4% influence), strong – oats (68.2%) and sunflower (57.5%), significant – wheat by non-paired precursors (36.8%), significant – arable land productivity (24.2%), whereas The effect of crop rotation was decisive in changing the productivity of arable land (74.2%), strong – wheat by non-paired precursors (62.5%), significant – sunflower (41.4%) and oats (31.5%), weak – wheat by steam (11.7%). The most favorable conditions for wheat and sunflower were formed after steam, for wheat by non-steam precursors – when placed after oats, and oats after wheat in grain-to-crop crop rotations with one sunflower field. The productivity of arable land was minimal in crop rotations without sunflower (0.46...0.57 thousand grain units/ha), with its share of 16.7...25% increased by 0.16...0.28 thousand grain units/ha (28.1...60.9%), and at 50% – by 0.31...0.42 thousand grain units/ha (54.4...91.3%), in relation to the grain-pair crop rotation and permanent wheat. The application of nitrogen fertilizers for the crops of these crop rotations provided an increase in arable land productivity by 0.15...0.25 thousand grain units/ha (20.5...28.4%), relative to the non-winded background, with a payback of 1 kg of nitrogen up to 8.33 grain units.

Ключевые слова: севооборот, предшественник, азотные удобрения, каштановая почва, яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.), овес (*Avena sativa* L.), подсолнечник (*Helianthus annuus* L.).

Keywords: crop rotation, precursor, nitrogen fertilizers, chestnut soil, spring wheat (*Triticum aestivum* L.), oats (*Avena sativa* L.), sunflower (*Helianthus annuus* L.).

Одним из следствий либерализации экономики сельскохозяйственного производства страны в постперестроечный период стало повсеместное нарушение севооборотов и агротехнологий, злоупотребление монокультурой в угоду рыночному спросу и др. [1]. В результате существенно изменилась структура посевных площадей, что привело к разбалансированности севооборотов [2, 3]. В частности, в Алтайском крае при сохраняющейся на примерно одном уровне общей посевной площади (5,3...5,5 млн га) и занятой зерновыми культурами (3,1...3,5 млн га) за последние 30...35 лет резко сократились посевы кормовых (с 1,7 до 0,6 млн га) и возросли технических культур (с 0,2 до 1,6 млн га), в том числе подсолнечника на маслосемена – до 0,9 млн га. В степных районах края площади под подсолнечником по отношению к зерновым культурам достигают 50...60 и даже 80...96% при средней величине этого показателя по Алтайскому краю около 29% [4].

Эти изменения обуславливают необходимость переосмысления роли севооборотов, предшественников и средств интенсификации в формировании урожая основных культур и продуктивности пашни в целом [4, 5], особенно в условиях недостаточного увлажнения и при переходе на минимальные и нулевые технологии [6]. Наибольшую остроту эта проблема приобретает для сухой степи Алтайского края с активно проявляющимися процессами деградации почв и опустынивания территории, где наряду с агролесомелиоративным обустройством территории в повышении продуктивности пашни большое значение отводится агротехническим мероприятиям [7, 8]. Известно, что при реализации всех элементов систем земледелия, включая научно обоснованные севообороты, системы обработки почвы и средства интенсификации, обеспечивается не только сохранение и повышение плодородия почв, но и устойчивое увеличение урожайности сельскохозяйственных культур [9].

Цель исследований – изучение особенностей формирования урожайности яровой мягкой пшеницы, овса и подсолнечника в зависимости от предшественника и удобрений и их влияния на продуктивность севооборотов на каштановых почвах сухой степи Западной Сибири.

Методика. Работу выполняли в 2016–2023 гг. в длительном (с 1968 г.) стационарном полевом опыте Кулундинской СХОС Федерального Алтайского научного центра агробиотехнологий (пос. Целинный, Ключевский район, Алтайский край).

Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов:

севооборот (фактор А) – зернопаровой 4-польный без подсолнечника (пар – пшеница – пшеница – овес), зернопаропропашной 6-польный с долей подсолнечника 16,7% (пар – пшеница – пшеница – овес – пшеница – подсолнечник), зернопаропропашной 4-польный с долей подсолнечника 25,0% (пар – пшеница – пшеница – подсолнечник), зернопаропропашной 7-польный с долей подсолнечника 28,6% (пар – пшеница – пшеница – овес – пар – подсолнечник – подсолнечник), зернопаропропашной 4-польный с долей подсолнечника 50,0% (пшеница – подсолнечник – овес – подсолнечник), бессменная пшеница;

азотные удобрения (фактор В) – без удобрений (0), N_{30} .

Севообороты развернуты во времени и в пространстве. Повторность опыта трехкратная. Площадь опытной делянки общая – 1000 м², учетная – 500 м² для зерновых культур и 30 м² для подсолнечника.

Почва опытного участка – каштановая супесчаная, с низким (1,7...2,0%) содержанием гумуса и нитратного азота, средним (по Мачигину) – подвижного фосфора и высоким – калия, нейтральной реакцией среды в пахотном слое (0...20 см). Агротехника в опыте общепринятая в зоне. Осенью после уборки предшественников проводили плоскорезное рыхление на 14...16 см. Подготовка чистого пара в летний период включала 4-кратную культивацию на глубину 10...12 см. В конце апреля – начале первой декады мая вносили вразброс азотные удобрения (N_{30}) в виде сульфата аммония согласно схеме, проводили ранневесеннее выравнивание почвы. Посев подсолнечника (сорт Кулундинский-1) выполняли в начале второй декады мая сеялкой Гаспардо при норме высева 40 тыс. шт. всхожих семян на 1 га на глубину 5...6 см, посев пшеницы (сорт Степная волна) и овса (сорт Пегас) – в конце второй – начале третьей декады мая сеялкой СЗС-2,1 с нормой высева 3,0 млн всхожих семян на 1 га на глубину 5...6 см. Перед посевом подсолнечника применяли почвенные гербициды, в период вегетации культуры проводили две междурядных культивации. В посевах зерновых после подсолнечника в фазе кущения проводили обработку гербицидами для уничтожения падалицы. Учет урожая маслосемян подсолнечника осуществляли комбайном Сидмастер, пшеницы и овса – комбайном Енисей-1200 [4].

Территория опытного участка расположена в Западно-Кулундинской сухостепной подзоне со среднемноголетней суммой осадков за сельскохозяйственный год 297 мм, в том числе за осень (сентябрь–октябрь) – 45 мм, за зиму (ноябрь–март) – 80 мм, за весну (апрель–май) – 41 мм, за лето (июнь–август) – 131 мм. Сумма осадков за летние месяцы изменялась от 76...119 мм (58...91% от климатической нормы) в 2018–2022 гг. до 141...158 мм (108...121%) в 2016, 2017 и 2023 гг., а гидротермический коэффициент (ГТК) в эти годы – соответственно от 0,41...0,65 до 0,77...0,80 ед. при среднем многолетнем значении ГТК 0,72 ед.

Основные особенности методики проведения исследований, а также закономерности формирования водного, питательного режимов каштановой почвы, фитосанитарного состояния посевов в зависимости от изучаемых факторов в условиях сухой степи подробно изложены и проанализированы нами ранее [4, 10, 11].

Результаты и обсуждение. Урожайности зерна яровой мягкой пшеницы, размещенной после чистого пара, в среднем за 2016–2023 гг. исследований составляла 0,98 т/га, варьируя от 0,87 до 1,11 т/га под действием азотных удобрений (доля влияния фактора 87,4%) при незначительном вкладе (11,7%) севооборота (табл. 1). Азотные удобрения во всех вариантах севооборотов оказывали достоверное положительное влияние на рост урожайности зерна пшеницы после пара при средней прибавке урожая 0,17 т/га (19,1%), по отношению к неудобренному фону, и окупаемости 1 кг д.в. азота 5,00...6,33 кг зерна. Влияние севооборотов и чередования культур в них на урожайность зерна пшеницы после пара проявлялось в виде тенденции, которая была наиболее выраженной при замене овса подсолнечником с трансформацией 4-польного зернопарового севооборота в 4-польный зернопаропропашной или при добавлении к 4-польному зернопаровому севообороту зернопаропропашного звена «пшеница – подсолнечник» – в обоих случаях увеличение урожайности пшеницы после пара на неудобренном фоне составляло 0,05 т/га (5,7%), на удобренном – 0,06...0,09 т/га (5,9...8,8%), в сравнении с зернопаровым севооборотом. Добавление к 4-польному зернопаровому севообороту паропропаш-

Табл. 1. Урожайность яровой пшеницы в зависимости от севооборота, предшественника и азотных удобрений (среднее за 2016–2023 гг.), т/га

Севооборот, предшественник (фактор А)	Удобрение (фактор В)			Окупае- мость азота, кг/кг
	0	N ₃₀	среднее	
Пшеница после пара				
Пар – пшеница – пшеница – овес	0,87	1,02	0,94	5,00
Пар – пшеница – пшеница – под- солнечник	0,92	1,08	1,00	5,33
Пар – пшеница – пшеница – овес – пшеница – подсолнечник	0,92	1,11	1,01	6,33
Пар – пшеница – пшеница – овес – пар – подсолнечник – под- солнечник	0,87	1,03	0,95	5,33
Среднее	0,89	1,06	0,98	5,67
НСР ₀₅ для факторов: А – 0,08; В – 0,06; АВ – 0,08; частных разли- чий – 0,12				
Доля влияния факторов, %: А – 11,7; В – 87,4; АВ – 0,9				
Пшеница после непаровых предшественников				
Пар – пшеница – пшеница – овес	0,77	0,93	0,85	5,33
Пар – пшеница – пшеница – под- солнечник	0,74	0,92	0,83	6,00
Пар – пшеница – пшеница – овес – пшеница – подсолнечник	0,77	0,89	0,83	4,00
Пар – пшеница – пшеница – овес – пшеница – подсолнечник	0,82	0,96	0,89	4,67
Пшеница – подсолнечник – овес – подсолнечник	0,71	0,88	0,79	5,67
Пар – пшеница – пшеница – овес – пар – подсолнечник – под- солнечник	0,68	0,84	0,76	5,33
Бессменная пшеница	0,46	0,64	0,55	6,00
Среднее	0,71	0,87	0,79	5,33
НСР ₀₅ для факторов: А – 0,08; В – 0,04; АВ – 0,08; частных разли- чий – 0,11				
Доля влияния факторов, %: А – 62,5; В – 36,8; АВ – 0,7				

ного звена «пар – подсолнечник – подсолнечник» с его трансформацией в 7-польный зернопаропропашной севооборот не оказывало заметного влияния на сбор зерна пшеницы после пара.

Урожайность яровой пшеницы после непаровых предшественников была существенно ниже, чем после пара, – 0,79 т/га. Ее варьирование составляло 0,46...0,96 т/га и определялось в первую очередь действием севооборота и чередованием культур (доля влияния фактора 62,5%), во вторую – азотных удобрений (36,8%) (см. табл. 1). Оба фактора оказывали достоверное влияние на изменение урожайности зерна пшеницы. Лучшие условия для формирования урожая яровой пшеницы складывались после овса: без удобрений – 0,82 т/га, на фоне N₃₀ – 0,96 т/га, что было больше, чем после подсолнечника на 0,11 и 0,08 т/га (15,5 и 9,1%), пшеницы в севообороте – на 0,05...0,14 и 0,03...0,12 т/га (6,5...20,6% и 3,2...14,3%), пшеницы при бессменном возделывании – на 0,36 и 0,32 т/га (78,3 и 50,0%). Азотные удобрения, как и после парового предшественника, обеспечивали повышение урожайности зерна пшеницы в среднем по севооборотам на 0,16 т/га (22,5%), по отношению к неудобренному фону, при окупаемости азота прибавкой урожая зерна 4,00...6,00 кг/кг.

По данным Росстата, средняя за 2016–2023 гг. урожайность яровой мягкой пшеницы в хозяйствах всех категорий Ключевского района Алтайского края составляла 0,83 т/га, что значительно ниже, чем отмеченная в опыте урожайность пшеницы после пара как на неудобренных, так и особенно на удобренных фонах. Вместе с тем урожайность пшеницы в опыте после непаровых предшественников на неудобренных фонах во всех случаях существенно уступала средне-районному значению этого показателя, превосходя его в севооборотах лишь на фоне внесения удобрений,

а при бессменном возделывании культуры оставалась на 0,19 т/га, или на 22,9%, ниже.

Урожайность зерна овса, возделываемого по непаровым предшественникам, незначительно уступала урожайности пшеницы после пара, составляла 0,92 т/га и определялась вкладом как удобрений (доля влияния 59,0%), так и предшественников (40,7%) (табл. 2). Оба фактора оказывали достоверное влияние на изменение урожайности зерна овса. В традиционном зернопаровом севообороте овес в заключительном поле формировал урожайность на неудобренном фоне 0,78 т/га, на фоне N₃₀ – 0,96 т/га. Добавление одного-двух полей подсолнечника в зернопаровой севооборот с трансформацией его в зернопаропропашной севооборот во всех случаях положительно сказывалось на росте и развитии растений овса – на неудобренном фоне урожайность зерна возрастала с 0,78 до 0,81...0,94 т/га, а при внесении N₃₀ – с 0,96 до 0,97...1,09 т/га. Наиболее благоприятные в опыте условия для формирования урожая культуры складывались после пшеницы в севооборотах с паром и одним полем (16,7%) подсолнечника, обеспечивавшие на неудобренном фоне получение урожайности 0,94 т/га, при внесении N₃₀ – 1,09 т/га, что, в сравнении с размещением овса после двух полей пшеницы в зернопаровом севообороте, было больше соответственно на 0,16 и 0,13 т/га (20,5 и 13,5%). Азотные удобрения обеспечивали достоверный рост урожайности овса в среднем по севооборотам на 0,16 т/га (19,0%) при окупаемости азота удобрений дополнительным урожаем зерна 5,00...6,00 кг/кг.

По данным Росстата, средняя за 2016–2023 гг. урожайность зерна овса в хозяйствах всех категорий Ключевского района Алтайского края составляла 0,86 т/га, что значительно (на 0,13...0,23 т/га, или на 15,1...26,7%) ниже, чем отмеченная в опыте урожайность культуры

Табл. 2. Урожайность овса и подсолнечника в зависимости от севооборота, предшественника и удобрений (среднее за 2016–2023 гг.), т/га

Севооборот, предшественник (фактор А)	Удобрение (фактор В)			Окупаемость азота, кг/кг
	0	N ₃₀	среднее	
Овес				
Пар – пшеница – пшеница – овес	0,78	0,96	0,87	6,00
Пар – пшеница – пшеница – овес – пшеница – подсолнечник	0,94	1,09	1,01	5,00
Пшеница – подсолнечник – овес – подсолнечник	0,81	0,97	0,89	5,33
Пар – пшеница – пшеница – овес – пар – подсолнечник – под- солнечник	0,84	0,99	0,91	5,00
Среднее	0,84	1,00	0,92	5,33
НСР ₀₅ для факторов: А – 0,08; В – 0,05; АВ – 0,08; частных разли- чий – 0,11				
Доля влияния факторов, %: А – 31,5; В – 68,2; АВ – 0,3				
Подсолнечник				
Пар – пшеница – пшеница – под- солнечник	0,87	1,05	0,96	6,00
Пар – пшеница – пшеница – овес – пшеница – подсолнечник	0,82	1,05	0,94	7,67
Пшеница – подсолнечник – овес – подсолнечник	0,79	1,04	0,91	8,33
Пшеница – подсолнечник – овес – подсолнечник	0,67	0,91	0,79	8,00
Пар – пшеница – пшеница – овес – пар – подсолнечник – под- солнечник	0,95	1,14	1,04	6,33
Пар – пшеница – пшеница – овес – пар – подсолнечник – под- солнечник	0,63	0,90	0,77	9,00
Среднее	0,79	1,01	0,90	7,33
НСР ₀₅ для факторов: А – 0,10; В – 0,06; АВ – 0,10; частных разли- чий – 0,14				
Доля влияния факторов, %: А – 41,4; В – 57,5; АВ – 1,1				

после всех предшественников на удобренных фонах. В то же время урожайность овса в опыте на неудобренных фонах в большинстве случаев заметно уступала среднерайонному значению этого показателя, превосходя его лишь в зернопаропропашном 6-польном севообороте с одним полем подсолнечника.

Подсолнечник в условиях сухой степи в среднем за 2016–2023 гг. формировал в опыте урожайность маслосемян 0,90 т/га, что было сопоставимо с урожайностью зерна пшеницы после пара и овса (см. табл. 2). Варьирование урожайности подсолнечника определялось действием удобрений (доля влияния фактора 57,5%) и предшественников (41,4%). Оба фактора оказывали достоверное влияние на изменение урожайности маслосемян подсолнечника. Лучшие условия для формирования урожая культуры закономерно складывались после чистого пара (на фоне без удобрений – 0,95 т/га, при внесении N_{30} – 1,14 т/га) и по второй пшенице после пара в 4-польном зернопаропропашном севообороте (соответственно 0,87 и 1,05 т/га), в сравнении с размещением подсолнечника по подсолнечнику и по овсу (0,63...0,67 и 0,90...0,91 т/га). Применение азотных удобрений под подсолнечник обеспечивало наиболее высокие прибавку урожая маслосемян и окупаемость азота дополнительным урожаем, составлявшие в зависимости от севооборота соответственно 0,18...0,27 т/га и 6,00...9,00 кг/кг.

По данным Росстата, средняя за 2016–2023 гг. урожайность маслосемян подсолнечника в хозяйствах всех категорий Ключевского района Алтайского края составляла 0,63 т/га, что значительно (на 0,04...0,51 т/га, или на 6,3...81,0%) ниже, чем отмеченная в опыте урожайность культуры после всех предшественников на удобренных и удобренных фонах. Среднерайонному уровню соответствовал лишь уровень урожайности культуры при повторных ее посевах без применения удобрений.

Продуктивность 1 га пашни в среднем за 2016–2023 гг. составляла 0,76 тыс. зерн. ед., варьировала от 0,46 до 1,13 тыс. зерн. ед. и зависела от набора культур в севообороте (вклад фактора 74,2%) и от азотных удобрений (24,2%) (табл. 3). Оба фактора оказывали достоверное влияние на изменение продуктивности пашни. Максимальная ее величина в опыте отмечена в 4-польном зернопаропропашном севообороте с долей подсолнечника 50% – на фоне без удобрений она составляла 0,88, при внесении N_{30} – 1,13 тыс. зерн. ед./га, а минимальная – в севообороте с отсутствием подсолнечника и при бесменном возделывании пшеницы (соответственно фонам удобренности 0,46...0,57 и 0,64...0,68 тыс. зерн. ед./га, или в 1,5...1,9 и в 1,7...1,8 раза ниже). Продуктивность севооборотов с долей подсолнечника 16,7 и 25,0% была примерно одинаковой, составляя на неудобренном и удобренном фонах 0,73...0,74 и 0,88...0,90 тыс. зерн. ед., а с долей подсолнечника 28,6% – соответственно 0,65 и 0,81 тыс. зерн. ед./га. Несовпадение уровня продуктивности пашни доле подсолнечника в севооборотах обусловлено разными условиями для роста и развития растений этой культуры. В частности, размещение подсолнечника после подсолнечника приводит к снижению его урожайности на неудобренном фоне в 1,5, а на удобренном в 1,3 раза, по сравнению с первой культурой. Существенный рост отдачи от азотных удобрений, влияние которых во всех севооборотах было достоверным, отмечен только в 4-польном зернопаропропашном севообороте с долей подсолнечника 50% – 8,33 зерн. ед./кг против 3,33...5,33 зерн. ед./кг в других севооборотах. Азотные удобрения обеспечивали достоверный рост продуктивности пашни в среднем по севооборотам

Табл. 3. Продуктивность 1 га пашни в зависимости от севооборота и азотных удобрений (среднее за 2016–2023 гг.), тыс. зерн. ед.

Севооборот (фактор А)	Удобрение (фактор В)			Окупаемость азота, зерн. ед./кг
	0	N_{30}	среднее	
Пар – пшеница – пшеница – овес	0,57	0,68	0,62	3,67
Пар – пшеница – пшеница – овес	0,74	0,90	0,82	5,33
овес – пшеница – подсолнечник				
Пар – пшеница – пшеница – подсолнечник	0,73	0,88	0,81	5,00
Пар – пшеница – пшеница – овес	0,65	0,81	0,73	5,33
овес – пар – подсолнечник – подсолнечник				
Пшеница – подсолнечник – овес	0,88	1,13	1,00	8,33
– подсолнечник				
Бессменная пшеница	0,46	0,64	0,55	6,00
Среднее	0,67	0,84	0,76	5,67
НСР ₀₅ для факторов: А – 0,09; В – 0,05; АВ – 0,09; частных различий – 0,13				
Доля влияния факторов, %: А – 74,2; В – 24,2; АВ – 1,6				

на 0,17 тыс. зерн. ед./га (25,4%) при окупаемости азота удобрений 5,67 зерн. ед./кг.

Выводы. На каштановых почвах сухой степи влияние азотных удобрений на изменение урожайности яровой мягкой пшеницы по чистому пару было определяющим (доля вклада фактора 87,4%), овса и подсолнечника – сильным (соответственно 68,2 и 57,5%), пшеницы по непаровым предшественникам – значительным (36,8%), продуктивности пашни – существенным (24,2%). Влияние севооборота на изменение продуктивности пашни было определяющим (74,2%), урожайности пшеницы по непаровым предшественникам – сильным (62,5%), подсолнечника и овса – значительным (соответственно 41,4% и 31,5%), пшеницы после пара – слабым (11,7%).

Наиболее благоприятные условия для пшеницы и подсолнечника складывались после пара в зернопаропропашных севооборотах, для пшеницы по непаровым предшественникам – после овса, для овса – после пшеницы в зернопаропропашных севооборотах с одним полем подсолнечника.

Продуктивность пашни в севооборотах без подсолнечника и удобрений была минимальной в опыте (0,46...0,57 тыс. зерн. ед./га). При насыщении севооборотов подсолнечником до 16,7...25% величина этого показателя возрастала, по сравнению с зернопаровым севооборотом и бессменной пшеницей, на 0,16...0,28 тыс. зерн. ед./га (28,1...60,9%), а до 50% – на 0,31...0,42 тыс. зерн. ед./га (54,4...91,3%). Внесение азотных удобрений под культуры зернопаропропашных и зернопропашных севооборотов обеспечивало увеличение продуктивности пашни на 0,15...0,25 тыс. зерн. ед./га (20,5...28,4%) по отношению к неудобренному фону при окупаемости 1 кг азота до 8,33 зерн. ед.

Существенное превышение уровня урожайности яровой пшеницы, овса и подсолнечника в опыте над среднерайонным уровнем в хозяйствах всех категорий свидетельствует о перспективности совершенствования севооборотов и применения азотных удобрений для повышения продуктивности и устойчивости растениеводческой отрасли в сухостепной зоне Алтайского края, а также замедления процессов опустынивания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена в соответствии с Соглашением № 05-9/ВИП-ГЗ от 01.04.2024 г. между ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской

академии наук» и ФГБНУ «Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий» в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (источник финансирования – Соглашение № 169-15-2023-001 от 01.03.2023 г. Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликтов интересов.

Литература.

1. Кирюшин В. И. Организация территориально-го и внутрихозяйственного землеустройства на ландшафтно-экологической основе // *Достижения науки и техники АПК*. 2024. Т. 38. № 5. С. 4–9. doi: 10.53859/02352451_2024_38_5_4.
2. Оптимизация посевных площадей Ставропольского края на основе агроресурсного потенциала / Е. В. Письменная, М. Ю. Азарова, В. А. Стукало и др. // *Земледелие*. 2019. № 7. С. 8–11. doi: 10.24411/0044-3913-2019-10701.
3. Агротехнические приемы повышения продуктивности пашни в Приенисейской Сибири / А. А. Шпедт, В. Н. Романов, Ю. Н. Трубников и др. // *Вестник КрасГАУ*. 2022. № 7. С. 11–19.
4. Средообразующая роль и продуктивность яровой пшеницы, овса и подсолнечника в степи юга Западной Сибири / А. А. Гаркуша, В. И. Усенко, В. И. Кравченко, и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2020. Т. 34. № 7. С. 5–9. doi:10.24411/0235-2451-2020-10701.
5. Кирюшин В. И. Методология комплексной оценки сельскохозяйственных земель // *Почвоведение*. 2020. № 7. С. 871–879.
6. Влияние севооборота на эффективность использования пашни при возделывании полевых культур без обработки почвы / В. К. Дриггер, Р. С. Стукалов, Р. Г. Гаджиумаров и др. // *Земледелие*. 2019. № 6. С. 28–32. doi: 10.24411/0044-3913-2019-10607.
7. Николаев М. Н. Выявление уязвимых для дефицита влаги зернопроизводящих территорий на основе мезозонирования зоны неустойчивого увлажнения при изменении климата в европейской части России // *Сельскохозяйственная биология*. 2024. Т. 59. № 3. С. 473–491.
8. Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)» / А. Л. Иванов, Г. С. Куст, И. М. Донник и др. / Под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. Том 2. М.: ООО «Издательство МБА», 2019. 476 с.
9. Лукин С. В. Динамика агроэкологического состояния почв Белгородской области при длительном сельскохозяйственном использовании // *Почвоведение*. 2023. № 12. С. 1671–1685.
10. Эффективность азотных удобрений и гербицидов в зернопаровом севообороте в зависимости от способа обработки каштановой почвы в Кулундинской степи / В. И. Усенко, А. А. Гаркуша, Д. В. Пургин и др. // *Земледелие*. 2019. № 6. С. 33–39. doi: 10.24411/0044-3913-2019-10608.
11. Формирование засоренности посевов в зернопаровом севообороте в зависимости от способа обработки почвы и применения средств химизации / Д. В. Пургин, В. И. Усенко, В. И. Кравченко и др. // *Земледелие*. 2019. № 8. С. 6–14. doi: 10.24411/0044-3913-2019-10802.

Поступила в редакцию 24.05.2024

После доработки 22.07.2024

Принята к публикации 01.10.2024

ПОТЕНЦИАЛ ПРОДУКТИВНОГО ДОЛГОЛЕТИЯ БОБОВО-МЯТЛИКОВОЙ СМЕСИ НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2024 г. **В. С. Бойко**, доктор сельскохозяйственных наук,
А. Ю. Тимохин, кандидат сельскохозяйственных наук

Омский аграрный научный центр,
644012, Омск, пр. Королева, 26
E-mail: boicko.vasily2011@yandex.ru

Исследования проводили с целью изучения влияния условий минерального питания на рост, развитие и урожайность сухого вещества смеси козлятника с кострцом в лесостепи Западной Сибири. Работу выполняли в 2000–2021 гг. в стационарном полевом опыте на лугово-черноземной среднетяжелосуглинистой почве в Омской области. Опыт закладывали в выводном поле по схеме, которая предусматривала изучение следующих вариантов: калийное удобрение (фактор А) – K_0 , K_{60} ; азотное удобрение (фактор В) – N_0 , N_{30} , N_{60} ; обеспеченность почвы подвижным фосфором (фактор С) – средняя (фон 0 – 70...80 мг/кг по Чирикову), повышенная (фон I – 120, фон II – 140 мг/кг), высокая (фон III – 150...160 мг/кг). Наиболее сбалансированным было соотношение бобового и мятликового компонентов на фонах с повышенным и высоким содержанием подвижного фосфора в почве. Без внесения азотных удобрений конкурентная способность козлятника в таких условиях возрастает. В годы, когда проводили орошения, урожайность травосмеси в вариантах с достаточным уровнем фосфора (повышенное и высокое содержание) достигала 8...9 т/га сухой массы против 6,35 т/га на фоне естественного плодородия почвы. В дальнейшем, при отсутствии полива, картина изменилась в сторону общего снижения урожайности до 5...6 т/га сухой массы в удобренных вариантах против 3,60...4,81 т/га без удобрений. Во втором десятилетии достоверный рост урожайности в вариантах без азотных удобрений в 2011–2015 гг. в среднем по фактору составлял 0,49 т/га, в 2016–2021 гг. – 0,99 т/га, вследствие повышения доли козлятника в ботаническом составе травостоя.

POTENTIAL OF PRODUCTIVE LONGEVITY OF LEGUM-MINT GRASS MIXTURE IN THE SOUTH OF WESTERN SIBERIA

V. S. Boiko, A. Yu. Timokhin

Omsk agrarian scientific center,
644012, Omsk, prosp. Koroleva, 26
E-mail: boicko.vasily2011@yandex.ru

Perennial legume-bluegrass herbaceous stands stabilize forage production for highly productive livestock farming and make a significant contribution to the nitrogen balance of agroecosystems in Western Siberia. The studies were conducted to study the effect of mineral nutrition conditions on the growth, development and dry matter yield of a mixture of goat's rue and brome grass in the forest-steppe of Western Siberia. The work was carried out in 2000...2021 in a stationary field experiment on meadow-chnozem medium-deep medium-humus heavy loamy soil in the Omsk region. The experiment was laid out in the hatchery field of the 8-field crop rotation (eastern galega, eastern galega + brome, spring barley, field pea, sweet sorghum, alfalfa + brome, forage beans, millet + rapeseed) according to the scheme providing for the study of the following options: potassium fertilizer (factor A) – K_0 , K_{60} ; nitrogen fertilizer (factor B) – N_0 , N_{30} , N_{60} ; soil supply with mobile phosphorus (factor C) – average (70...80 mg/kg according to F. V. Chirikov, background 0), increased (background I – 120, background II – 140 mg/kg), high (150...160 mg/kg, background III). The most balanced ratio of legume and bluegrass components was on the backgrounds with increased and high content of mobile phosphorus in the soil. Without the application of nitrogen fertilizers against these backgrounds, the competitive ability of goat's rue increases, which is ecologically and economically effective. Against the background of irrigation, the yield of the grass mixture reaches 8 ... 9 t/ha of dry mass in variants with a sufficient level of phosphorus (increased and high content) at 6.35 t/ha without fertilizers. In subsequent years, in the absence of irrigation, the picture changed towards a general decrease in yield to 5 ... 6 t/ha of dry mass in fertilized variants at 3.60 ... 4.81 t/ha in the variant without fertilizers. In the second decade, a reliable manifestation of yield growth in variants without nitrogen fertilizers is by 0.49 in 2011 ... 2015 and by 0.99 t/ha in 2016 ... 2021 on average by factor, due to an increase in the share of goat's rue in the botanical composition.

Ключевые слова: кормопроизводство, козлятник (*Galega orientalis*), кострец (*Bromus inermis*), травосмеси, долголетие, минеральное питание.

Keywords: forage production, goat's rue (*Galega orientalis*), rump (*Bromus inermis*), grass mixtures, longevity, mineral nutrition.

У растений многокомпонентных бобово-мятликовых смесей листья располагаются в разных ярусах, а корневая система – в различных слоях почвы, что позволяет им лучше и полнее использовать тепло и свет, питательные вещества и влагу [1, 2]. Содержание белка в зеленой массе растений мятликового компонента при совместном выращивании с бобовыми повышается, что объясняется использованием ими части азота, фиксируемого из воздуха, бобовой культурой [3, 4, 5].

Травосмеси более устойчивы к неблагоприятным условиям внешней среды и сорнякам, чем отдельные

компоненты, меньше повреждаются вредителями, накапливают больше корневых и пожнивных остатков, улучшают микробный статус и физико-химические свойства почвы [6, 7].

Однако бобовые виды в травосмесях сохраняются только первые два-три года, а затем вытесняются мятликовыми видами. Одна из причин такой ситуации состоит в том, что большинство бобовых трав уступают по долголетию мятликовым, на 4...5 год жизни они снижают продуктивность, в то время как мятликовые, используя биологический азот, накопленный в почве

бобовыми, продолжают активно расти и развиваться. Поэтому важны как подбор компонентов, так и способы посева и использования травостоев.

Как правило, в условиях Сибири на орошаемых и богарных сенокосах целесообразно включать в травосмеси костреч безостый, который по продуктивности превосходит большинство мятликовых трав. В рекомендованной структуре использования орошаемой пашни, да и на кормовой площади в условиях богары, значительное место отводится многолетним бобово-мятликовым травосмесям [8].

Помимо люцерны, эспарцета, хорошим компонентом бобово-мятликовых травосмесей в лесостепи служит козлятник [9]. По биологии он выгодно отличается от большинства бобовых высоким продуктивным долголетием и способностью с возрастом вытеснять из структуры травостоя сорные виды [10, 11]. В связи с этим необходимо тщательное изучение вопросов, связанных с созданием и использованием смешанных травостоев козлятника с мятликовыми травами. Предложенный ранее раздельно-рядовой способ выращивания многолетних бобово-мятликовых травосмесей вывел решение указанной проблемы на новый качественный уровень, позволив сохранять долю бобового компонента на высоком уровне длительное время [12].

Однако при создании высокопродуктивных смешанных травостоев длительного использования важно обеспечить для них оптимальный уровень минерального питания [13], особенно в условиях орошения, где происходит интенсивный вынос макроэлементов из почвы.

Цель исследований – изучение динамики ботанического состава, биометрических показателей и урожайности козлятнично-кострецово-й смеси в зависимости от уровня минерального питания и длительности возделывания.

Методика. Работу выполняли в 2000–2021 гг. на опытном поле ФГБНУ «Омский АНЦ» в южной лесостепи Омского Прииртышья (55.046561°N 73.454574°E). Объектами исследований служили разновозрастная смесь козлятника с кострецом и лугово-черноземная среднеспособная, среднегумусная, тяжелосуглинистая почва с нейтральной реакцией среды ($\text{pH}_{\text{вод.}}$ пахотного слоя – 7,1), содержанием гумуса в слое 0...0,4 м – 5,9...6,4 %, мощностью гумусового горизонта – 0,45 м, с низкой исходной обеспеченностью нитратным азотом в слое 0...0,4 м (по Грандваль-Ляжу), средней – подвижным фосфором и высокой – подвижным калием в слое 0...0,2 м (по Чирикову).

Стационарный полевой опыт закладывали в вывонном поле по схеме, предусматривающей изучение следующих вариантов:

калийное удобрение (фактор А) – K_{60} , K_{120} ;
азотное удобрение (фактор В) – N_{30} , N_{60} , N_{90} ;
обеспеченность почвы подвижным фосфором (фактор С) – средняя (фон 0 – 70...80 мг/кг по Чирикову), повышенная (фон I – 120, фон II – 140 мг/кг), высокая (фон III – 150...160 мг/кг).

Различные фоны обеспеченности почвы подвижным фосфором сформированы в начальный период исследований в стационарном опыте (1978–1985 гг.) посредством создания положительного баланса этого элемента. В последующие 10 лет (1986–1995 гг.) их поддерживали внесением фосфорсодержащих удобрений в размере среднегодового выноса.

Поперек созданных фонов в соответствующих вариантах вносили удобрения: азотные (N_{30} , N_{60}) под каждый из двух укосов, калийные (K_{60}) – весной, в период возобновления вегетации.

Посев травосмеси проводили в 2000 г. беспорочно сеялкой СЗТ-3,6 раздельно-рядовым способом, норма высева козлятника – 3,0, костреца – 1,8 млн всхожих семян на 1 га. Суть способа состоит в одновременном посеве мятликовой культуры (костреца) из зернового ящика через 0,6 м и бобовой культуры (козлятника) из ящика для мелкосемянного компонента через 0,15 м. Площадь элементарной делянки общая составляла 360 м² (18 м × 20 м), учетная – 78 м², уборку осуществляли кормоуборочным комбайном Е-280 с весовым устройством. Повторность трехкратная. Учетные данные обрабатывали методом дисперсионного анализа. Весь период исследований на одном травостое с 2001 по 2021 гг. разбит на интервалы (2001–2005, 2006–2010, 2011–2015, 2016–2021 гг.), по которым приведены средние экспериментальные данные. Год формирования травостоя (2000 г.) нетипичный, в сравнении с последующими периодами.

Метеоусловия в период исследований были разнообразными по тепло- и влагообеспеченности как календарного года, так и вегетационных периодов (ГТК по Селянинову за период с температурой выше 10 °C от 0,52 до 1,58 и суммой температур от 1803 до 2523 °C), тем самым отражая особенности климата территории южной лесостепи Омского Прииртышья и в целом Западной Сибири. Наблюдения и анализы проводили по общепринятым в земледелии, агрохимии и растениеводстве методикам.

Первые 10 лет (2001–2010 гг.) травостой использовали в режиме орошения дождеванием (ДКШ-64 «Волжанка»), в дальнейшем (2011–2021) – в условиях естественного увлажнения. Оросительная норма в засушливом 2000 г. формирования травостоя составила 1500 м³/га. В последующие годы она изменялась от 0 до 2400 м³/га. В среднем оросительная норма составила 1238 м³/га при поливной норме 150...450 (в среднем 344) м³/га и кратности полива 3,6. Внутрисезонное распределение оросительной нормы в мае, июне, июле и августе составило 10,3; 31,8; 33,3 и 24,3 % соответственно.

Результаты и обсуждение. Питательный режим почвы формировался вследствие мобилизации почвенного плодородия и внесения минеральных удобрений. Содержание нитратного азота как весной, в период возобновления вегетации в вариантах без удобрений, так и осенью, после проведения двух укосов, было низким или очень низким в слое 0...0,4 м – 2,6...5,5 и 1,2...8,6 мг/кг почвы соответственно. То есть азот текущей мобилизации относительно полно использовался вегетирующим агроценозом.

По содержанию калия особых закономерностей не установлено. В слое 0...0,2 м на протяжении всего периода оно было высоким – 200...300 мг/кг почвы. В слое 0,2...0,4 м наблюдали аналогичную картину, за исключением последнего пятилетия, когда его содер-

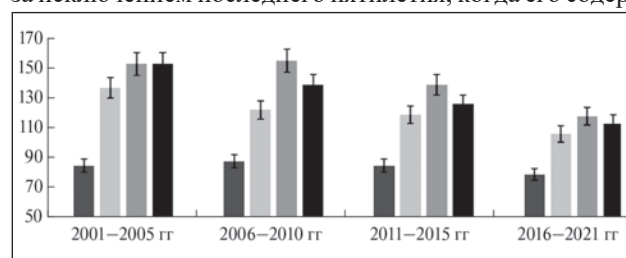


Рис. 1. Содержание подвижного фосфора в слое почвы 0...0,2 м по временным интервалам развития травостоя, мг/кг: ■ – 0 фон; ■ – I фон; ■ – II фон; ■ – III фон.

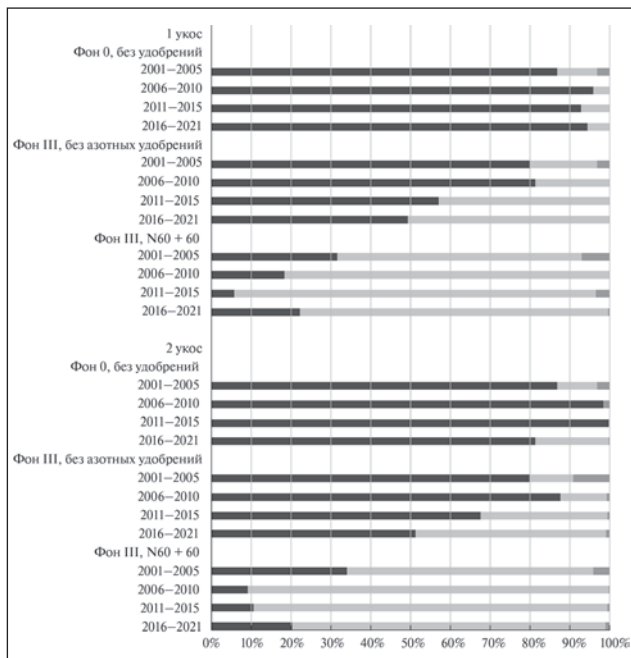


Рис. 2. Ботанический состав травосмеси по временным интервалам развития, %:
■ — козлятник; □ — костреч; ▒ — сорняк.

жание снизилось до 94...122 мг/кг. Подобную ситуацию отмечали при анализе калийного режима почвы полей ресположенного рядом севооборота [14].

Более динамичным было содержание подвижного фосфора, особенно на фонах с высокой обеспеченностью этим элементом. В слое 0...0,2 м его содержание из-за интенсивного выноса снизилось за 20 лет со 152 до 112...117 мг/кг почвы (рис. 1).

Почва на участках с повышенным содержанием (фоны I и II) осталась в той же градации, снижение произошло со 136 до 105 мг/кг. На фоне без удобрений картина была стабильной как в пахотном (78...87 мг/кг), так и в подпахотном (70...80 мг/кг) слоях. Ежегодное снижение на фонах с интенсивным выносом элемента составило 1,5...2,0 мг/кг почвы.

В первый год козлятник и костреч в смеси росли и развивались медленно, в силу своих биологических особенностей, поэтому угнетались сорняками. В последующие годы жизни, благодаря более интенсивному росту культурных видов, происходило снижение засоренности травосмеси, а содержание сеяных трав резко возрастало. Доля сорняков в биомассе в среднем за 2...6 годы жизни (2001–2005 гг.) в первом и втором укосах находилась примерно на одинаковом уровне и составляла 3...13 %.

В дальнейшем сорные виды в травостое практически отсутствовали вследствие высокой фитоценотической активности обеих многолетних культур, в среднем по агроценозу их масса не превышала 1 %. Доля сеяных трав в значительной степени зависела от условий минерального питания. В варианте без удобрений преобладал бобовый компонент, в максимально удобренном варианте на фоне с повышенным и высоким содержанием фосфора и внесении N_{60} под каждый из двух укосов доля костреча в 2006–2010 гг. составляла соответственно 96 и 82 %, в 2011–2015 гг. — 93 и 91 %, в 2016–2021 гг. — 95 и 77 % (рис. 2).

В последний период лет (2016–2021 гг.) доля козлятника в первом укосе в удобренном варианте увели-

чилась, вероятно, из-за снижения фитоценотической активности костреча даже на фоне интенсивного азотного питания. Во втором укосе картина была аналогичной. То есть в контрольных и наиболее удобренных вариантах травостой становился практически однокомпонентным, что нецелесообразно для использования в производстве. В первые 5...10 лет наиболее сбалансированный по ботаническому составу травостой формировался на фоне повышенного содержания фосфора и внесения N_{30} под каждый укос. При более длительном использовании (15...20 лет) наиболее сбалансированное соотношение бобового и мятликового компонентов отмечали на фоне с повышенным содержанием фосфора, без внесения азотных удобрений.

Показатели линейного роста компонентов травосмеси также зависели от уровня минерального питания, но в меньшей степени, чем ботанический состав. Например, высота козлятника в первом укосе в среднем за 2...6 годы жизни увеличивалась на фоне с высоким содержанием фосфора с 91 до 96 см. Аналогичным образом она увеличивалась и от калийной подкормки при слабой зависимости от азотных удобрений. Во втором укосе различия между вариантами были еще менее выраженными. То же можно сказать и о кострече, высота которого увеличивалась на 5...7 см при повышении обеспеченности фосфором и на 2...3 см от калийной и азотной подкормок.

Во втором укосе заметным было влияние только азотных подкормок. В целом, травостой как в первом, так и втором укосах был высокорослым, достигая высоты 1 м, что свидетельствует о хорошем соответствии условий выращивания потребностям растений.

Костреч в первые годы жизни был высокорослым при внесении $N_{30...60}$. Затем эта тенденция (+5 см) установилась в варианте без азотных удобрений, где костреч отличался меньшей облиственностью и удлинненными генеративными частями растений. Козлятник свободнее произрастал в вариантах без азотных удобрений, развивая более высокие (+5...10 см) растения.

Динамика линейного роста более выражена как по укосам, так и периодам лет. В первые годы использования травостоя высота костреча в первом укосе в среднем по опыту достигала 116 см, во втором — 99 см. Высота козлятника по укосам практически не менялась — 94...95 см. В 2006–2010 гг. величина этого показателя у растений костреча в первом укосе в среднем уменьшилась до 109 см, во втором — до 90 см, у козлятника — соответственно до 78 и 73 см (рис. 3).

В последующее пятилетие высота костреча в первом укосе достигала 103 см, во втором — 62 см, козлятника — соответственно 70 и 56 см. И в завершающий период ис-

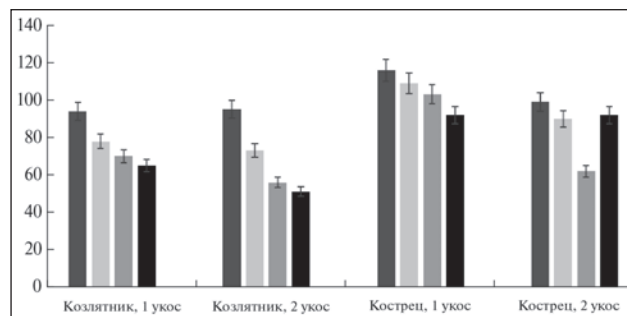


Рис. 3. Высота растений по временным интервалам развития травосмеси в среднем по вариантам опыта, см:
■ — 2001–2005; □ — 2006–2010; ▒ — 2011–2015; ■ — 2016–2021 гг.

Урожайность козлятниково-кострецовой травосмеси по временным интервалам развития, т/га сухой массы

Удобрения		Фон обеспеченности P ₂ O ₅ (фактор С)				Среднее по фактору	
калийные (фактор А)	азотные (фактор В)	0	I	II	III	A	B
кг д.в/га							
2001–2005 гг.							
0	0	6,35	8,99	9,05	9,39	8,68	8,58
	30+30	6,33	8,73	9,36	9,63		
	60+60	6,95	9,45	9,66	10,29		8,91
60	0	8,46	8,74	8,46	9,19	9,13	
	30+30	8,66	9,05	9,69	9,85		9,23
	60+60	8,87	9,06	9,73	9,84		
Среднее (С)		7,60	9,00	9,32	9,70		8,91
НСР ₀₅ : А – 0,46; В – 0,56; С – 0,65; для частных различий – 1,60							
2006–2010 гг.							
0	0	3,60	4,96	4,97	5,00	4,56	4,65
	30+30	3,60	4,53	4,82	4,77		
	60+60	3,47	4,95	5,10	4,90		4,63
60	0	3,78	4,78	4,99	5,19	4,79	
	30+30	3,79	4,43	6,32	4,80		4,72
	60+60	4,78	5,16	4,69	4,77		
Среднее (С)		3,84	4,80	5,15	4,91		4,67
НСР ₀₅ : А – 0,26; В – 0,32; С – 0,37; для частных различий – 0,91							
2011–2015 гг.							
0	0	3,89	5,92	5,07	5,47	4,91	5,07
	30+30	3,57	5,24	5,25	5,10		
	60+60	4,16	5,10	4,80	5,40		4,58
60	0	3,63	5,52	5,52	5,50	4,69	
	30+30	4,05	4,90	4,27	4,25		4,76
	60+60	4,10	5,11	4,60	4,77		
Среднее (С)		3,93	5,30	4,92	5,08		4,80
НСР ₀₅ : А – 0,39; В – 0,47; С – 0,55; для частных различий – 1,35							
2016–2021 гг.							
0	0	4,81	5,33	5,75	5,72	4,86	5,18
	30+30	3,79	4,92	5,18	5,25		
	60+60	3,62	4,64	4,78	4,55		4,70
60	0	3,52	5,01	5,35	5,94	4,56	
	30+30	3,98	4,56	5,01	4,88		4,26
	60+60	3,96	4,38	3,94	4,17		
Среднее (С)		3,95	4,81	5,00	5,09		4,71
НСР ₀₅ : А – 0,46; В – 0,56; С – 0,65; для частных различий – 1,59							

пользования травосмеси (2016–2021 гг.) высота костреца в обоих укосах была одинаковой, в среднем 92 см, козлятника – в первом укосе – 65 см, во втором – 51 см. То есть временной фактор играл более существенную роль, чем условия минерального питания.

Уровень минерального питания оказывал влияние на ботанический состав, а через него – на урожайность травосмеси. Самой низкой она была в год посева (2000 г.) – не более 6 т/га зеленой массы и зависела в основном от содержания в почве фосфора.

В дальнейшем (2001–2005 гг.) урожайность травосмеси значительно возрастала. Наиболее продуктивный травостой формировался на фонах с повышенной и высоким содержанием подвижного фосфора в почве – от 8,99 до 9,39 т/га сухой массы без азотных и калийной подкормок (см. табл.).

Положительное влияние калия проявилось только на фоне со средним содержанием фосфора, прибавка составила в среднем 2,12 т/га, или 32,4 % при урожайности сухой массы без удобрений – 6,35 т/га. Содержание подвижного фосфора на уровне повышенной и высокой обеспеченности увеличивало сбор сухой массы на 18,4...27,6 %. Азотные подкормки (N_{30...60}) под каждый укос слабо влияли на продуктивность травосмеси. Только внесение 60 кг д.в./га под каждый укос достоверно повышало сбор сухой массы на 0,65 т/га в среднем по фактору.

В первые пять лет использования травостоя урожайность была наиболее высокой, в последующие годы картина изменилась в сторону ее общего снижения

до 5...6 т/га сухой массы в удобренных вариантах при 3,60...4,81 т/га на контроле. В период 7...11 лет жизни действие калийных и азотных удобрений было незначительным при положительном влиянии последствие фосфора, прибавка, по отношению к фону обеспеченности 0, составила 0,9...1,31 т/га сухой массы.

Аналогичная закономерность по влиянию фонов с повышенным содержанием фосфора сохранялась в 2011–2015 и 2016–2021 гг. при отсутствии положительного влияния калийной подкормки. Во втором десятилетии отмечен достоверный рост урожайности в вариантах без азотных удобрений: в 2011–2015 гг. – на 0,49 и в 2016–2021 гг. – на 0,99 т/га в среднем по фактору, очевидно из-за более высокой доли козлятника в ботаническом составе. Превалирование костреца в вариантах с азотными подкормками (N₆₀ под каждый из двух укосов), особенно в последний период, достоверно снизило урожайность, в сравнении с вариантами без азотных удобрений, где почти половина биомассы приходилась на более урожайную бобовую культуру.

Выводы. В структуре кормопроизводства, в том числе орошаемого, лесостепи Западной Сибири существенные площади могут и должны занимать травостой на основе костреца в смеси с козлятником с высоким потенциалом продуктивного долголетия.

Для козлятниково-кострецовой травосмеси первостепенное значение имеет оптимизация условий минерального питания. Для этого следует создавать фон с повышенной или высокой обеспеченностью почвы фосфором. В таких условиях урожайность травосмеси при орошении в первые пять лет достигает 8,99...9,39 т/га сухой массы против 6,35 т/га в варианте без удобрений. Применение азотных удобрений (N_{30...60}) под каждый укос способствует увеличению доли костреца на этом фоне в первом укосе до 24...41 %, во втором – до 23...43 %.

В последующие годы, при отсутствии полива, картина изменилась в сторону общего снижения урожайности до 5...6 т/га сухой массы в удобренных вариантах при 3,60...4,81 т/га без удобрений. В период 7...11 лет жизни действие калийных и азотных удобрений было незначительным при положительном последствии фосфора, прибавка составила 0,90...1,31 т/га сухой массы, по отношению к фону с многолетним отрицательным балансом этого элемента, и такая закономерность сохранялась с увеличением возраста травостоя.

Во втором десятилетии достоверное увеличение урожайности отмечено в вариантах без азотных удобрений в 2011–2015 гг. – на 0,49 т/га, в 2016–2021 гг. – на 0,99 т/га в среднем по фактору, вследствие повышения доли козлятника в ботаническом составе травосмеси.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБНУ «Омский аграрный научный центр» на выполнение государственного задания. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Лукашов В. Н., Исаков А. Н. Продуктивное долголетие козлятника восточного и травосмесей с его участием // *Земледелие*. 2017. № 2. С. 26–28.

2. Иванова М. В., Плотников А. А. Сравнительная эффективность бобово-злаковых травостоев на основе козлятника восточного (*Galéga orientalis* Lam.) // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 1. С. 10–13. doi: 10.24411/0235-2451-2019-10103.
3. Дронова Т. Н., Бурцева Н. И. Кормовые конвейеры для высокопродуктивного крупного рогатого скота на орошаемых землях // Орошаемое земледелие. 2020. № 1. С. 25–28. doi: 10.35809/2618-8279-2020-1-5.
4. Степанов А. Урожайность козлятничко-злаковых травосмесей / А. Степанов // Животноводство России. 2022. № 10. С. 57–61. doi: 10.25701/ZZR.
5. Храмов С. Ю., Степанов А. Ф. Сравнительная оценка продуктивности бобово-злаковых травосмесей с участием козлятника восточного в подтаежной зоне Западной Сибири // Агрофорсайт. 2022. № 1 (38). С. 3–10.
6. Многолетние травостои на основе новых сортов козлятника восточного и интенсивных видов злаковых трав / Д. А. Вагунин, А. Д. Капсамун, Н. Н. Иванова и др. // Бюллетень науки и практики. 2018. Т. 4. № 10. С. 185–191. doi: 10.5281/zenodo.1461953.
7. Магомедов К. Г., Камилов Р. К. Высококачественные агрофитоценозы на кормовых угодьях // Научные известия. 2020. № 21. С. 18–24. doi: 10.34905/PC.2020.12.81.003.
8. Бойко В. С. Полевое кормопроизводство на орошаемых черноземах в лесостепи Западной Сибири. Омск: ИП Макшеевой Е. А., 2019. 312 с.
9. Вагунин Д. А., Иванова Н. Н. Формирование высокопродуктивных бобовозлаковых агроценозов долголетнего пользования на основе козлятника восточного // Кормопроизводство. 2023. № 4. С. 8–14.
10. Сафина Н. В. Семенная продуктивность козлятника восточного в условиях Среднего Поволжья // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3 (59). С. 43–47. doi: 10.18286/1816-4501-2022-3-43-47.
11. Многолетние травы в кормопроизводстве Западной Сибири / В. И. Дмитриев, В. С. Бойко, А. Ю. Тимохин и др. // АгроЭкоИнфо. 2018. № 4 (34). С. 53.
12. Патент № 2208921 С2 Российская Федерация, МПК А01В 79/00, А01С 7/00. Способ возделывания многолетних трав: № 99109733/13; заявл. 05.05.1999; опубл. 27.07.2003 / В. С. Бойко; заявитель Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства)
13. Анисимова Т. Ю. Влияние минеральных удобрений и подсева трав на трансформацию ботанического состава травостоя на выработанном торфянике // Агрохимия. 2023. № 7. С. 19–26. doi: 10.31857/S0002188123070037.
14. Бойко В. С., Якименко В. Н., Тимохин А. Ю. Изменение калийного состояния почв лесостепи Западной Сибири при длительном сельскохозяйственном использовании // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 11. С. 66–71. doi: 10.18412/1816-0395-2019-11-66-71.

Поступила в редакцию 25.08.2024

После доработки 21.09.2024

Принята к публикации 08.10.2024

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В РАСТЕНИЯХ ГОРОХА

© 2024 г. **Е. В. Дубовик**, доктор биологических наук, **Д. В. Дубовик**, доктор сельскохозяйственных наук, **А. Н. Морозов**, кандидат сельскохозяйственных наук

Курский федеральный аграрный научный центр,
305021, Курск, ул. Карла Маркса, 70б
E-mail: dubovikdm@yandex.ru

Исследования проводили с целью оценки уровня накопления горохом меди, цинка, марганца, кобальта и железа при использовании различных технологий его возделывания. Работу выполняли в 2020–2023 гг. на черноземе типичном в Курской области. Изучали четыре агротехнологии возделывания гороха, основанные на различных способах основной обработки почвы: традиционную, дифференцированную, минимальную, прямого посева. Содержание меди было наибольшим в корнях при минимальной технологии (13,37 мг/кг), в соломе и семенах – при прямом посеве (6,16 и 5,74 мг/кг). Максимальное в опыте количество цинка в корнях обеспечивали традиционная технология и прямой посев (34,10 и 34,63 мг/кг), в соломе – дифференцированная (13,35 мг/кг), в семенах – традиционная и дифференцированная (28,06 и 28,86 мг/кг) технологии. Наиболее высокое содержание марганца в корнях отмечали при дифференцированной технологии (369,95 мг/кг), в соломе и семенах – при прямом посеве (68,11 и 55,30 мг/кг). Максимальное в опыте количество кобальта в корнях зафиксировано при прямом посеве (7,05 мг/кг), в соломе – при дифференцированной технологии (4,44 мг/кг), в семенах – при минимальной технологии и прямом посеве (3,51 мг/кг). Содержание железа в корнях при традиционной и минимальной технологиях, а также при прямом посеве существенно не различалось, при дифференцированной – снижалось на 16,3...26,0 мг/кг. В соломе гороха наименьшее количество железа было при дифференцированной технологии (270,27 мг/кг). При прямом посеве отмечена наибольшая концентрация железа в зерне (135,7 мг/кг). Коэффициент биологического накопления микроэлементов в семенах был выше, чем в корнях и соломе. Наиболее высокие величины этого показателя в семенах для меди (24,33), марганца (27,68), кобальта (12,14) и железа (9,19) зафиксированы при прямом посеве, для цинка – при дифференцированной (28,36) и минимальной (28,31) технологиях.

THE INFLUENCE OF CULTIVATION TECHNOLOGY ON THE CONTENT OF TRACE ELEMENTS IN PEA PLANTS

E. V. Dubovik, D. V. Dubovik, A. N. Morozov

Federal Agricultural Kursk Research Center,
305021, Kursk, ul. Karla Marksa, 70 b
E-mail: dubovikdm@yandex.ru

The purpose of the research is to assess the level of accumulation of copper, zinc, manganese, cobalt and iron by peas using various cultivation technologies. The work was carried out in 2020–2023 on chernozem typical of the Kursk region. Four agrotechnologies of pea cultivation were studied, based on various methods of basic tillage: traditional, differentiated, minimal, direct sowing. The copper content was highest in the roots with minimal technology (13.37 mg/kg), in straw and grain – with direct sowing (6.16 and 5.74 mg/kg). The maximum amount of zinc in the roots was provided by traditional technology and direct sowing (34.10 and 34.63 mg/kg), in straw – differentiated (13.35 mg/kg), in grain – traditional and differentiated (28.06 and 28.86 mg/kg) technologies. The highest content of manganese in the roots was with differentiated technology (369.95 mg/kg), in straw and grain – with direct sowing (68.11 and 55.30 mg/kg). The maximum amount of cobalt in the roots was observed with direct sowing (7.05 mg/kg), in straw – with differentiated technology (4.44 mg/kg), in grain – with minimal technology and direct sowing (3.51 mg/kg). The iron content in the roots did not differ significantly with traditional, minimal technologies and direct sowing, and with differentiated, it decreased by 16.3...26.0 mg/kg. In pea straw, the lowest amount of iron was found with differentiated technology (270.27 mg/kg). During direct sowing, the highest concentration of iron in the grain was noted (135.7 mg/kg). The coefficient of biological accumulation of trace elements by grain was higher than by roots and straw. The highest values of this grain index for copper (24.33), manganese (27.68), cobalt (12.14) and iron (9.19) were noted with direct sowing, and for zinc – with differentiated (28.36) and minimal (28.31) technologies.

Ключевые слова: горох посевной (*Pisum sativum* L.), медь, цинк, марганец, кобальт, железо, технология возделывания, биологическое накопление, баланс.

Keywords: seed peas (*Pisum sativum* L.), copper, zinc, manganese, cobalt, iron, cultivation technology, biological accumulation, balance.

Одна из наиболее древних продовольственных зернобобовых культур, как в мире, так и в Российской Федерации – горох (*Pisum sativum* L.) [1]. В России за последние годы значительно увеличилось как площади посевов этой культуры, так и ее урожайность. В 2023 г. площадь, занятая горохом, составляла порядка 2 млн га, что на 23 % больше, чем в предыдущие годы, а валовой сбор семян превысил 4,7 млн т, или увеличился на 30 % [2]. Повышение спроса на продукцию этой культуры обусловлено ее высокой пищевой ценностью. Помимо

высокого содержания белка (23...30 %), семена гороха содержат большое количество макро- и микроэлементов: со 100 г гороха в организм человека поступает в среднем 8 % суточной нормы кальция, 28 % – калия, 37 % – железа, 39 % – магния, 43 % – фосфора, 45 % – цинка, 63 % – марганца, 73 % – меди [3].

Кроме пищевой ценности горох, как сельскохозяйственная культура, имеет большую агрономическую ценность. Клубеньковые бактерии, обитающие на корнях его растений, благодаря симбиотической азотфик-

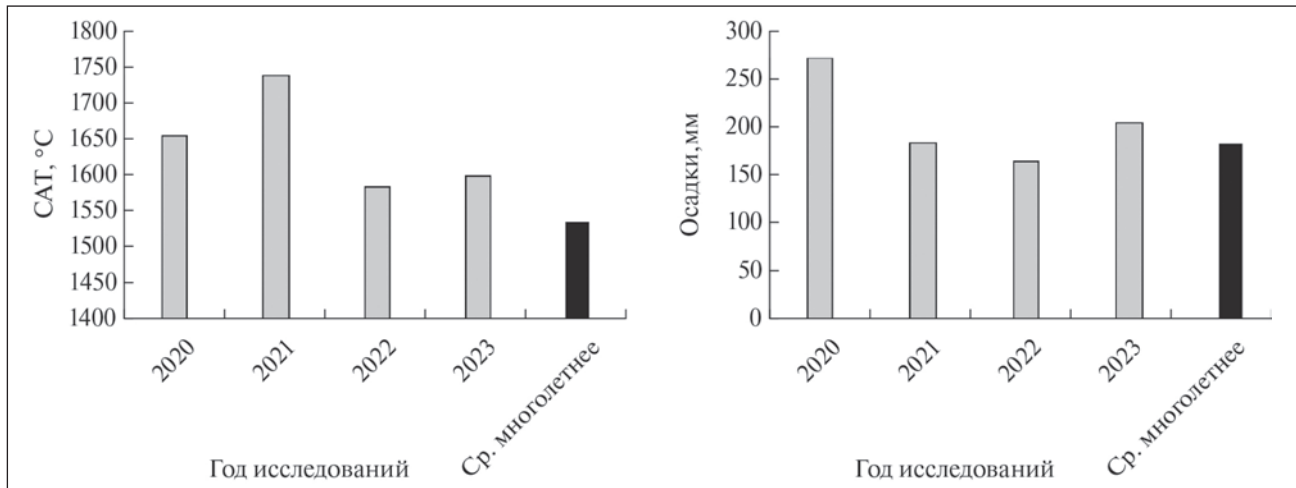


Рис. 1. Сумма активных температур и количество осадков в годы проведения исследований.

сации, обогащают почву азотом [4, 5]. Непродолжительный вегетационный период этой культуры способствует тому, что она служит хорошим предшественником для озимых культур [6].

При этом для получения высоких урожаев семян гороха высокого качества необходима разработка современных технологий возделывания [7]. Агротехнические приемы, составляющие технологии возделывания гороха, оказывая непосредственное влияние на физико-химические процессы, происходящие в почве, определяют уровень накопления микроэлементов в растениях [8, 9, 10]. Данных о влиянии технологии возделывания гороха на уровень содержания микроэлементов в почве и накопление их растениями крайне мало, и зачастую они противоречивы [11, 12].

Цель исследований – оценить уровень накопления горохом меди, цинка, марганца, кобальта и железа в зависимости от технологий его возделывания для их совершенствования.

Методика. Работу выполняли на опытном поле Курского федерального аграрного научного центра (Курская область, Курский район, п. Черемушки) в 2020–2023 гг. в четырехпольном севообороте, развернутом в пространстве и времени, со следующим чередованием культур: горох – озимая пшеница – соя – яровой ячмень.

Изучали четыре агротехнологии возделывания гороха, основанные на различных способах основной обработки почвы: традиционная – вспашка с оборотом пласта на глубину 20...22 см; дифференцированная в севообороте – под горох мелкая (дискование на 8...10 см); минимальная – поверхностная обработка почвы (дискование на 6...8 см); прямой посев – посев сеялкой Дон 114.

Первые три технологии предусматривали основное внесение минеральных удобрений в дозе $N_{15}P_{39}K_{39}$, а также интегрированную систему защиты растений, сочетающие механические обработки и применение химических препаратов. В рамках технологии прямого посева осуществляли основное внесение минеральных удобрений в дозе $N_5P_{13}K_{13}$, припосевное – в дозе $N_{10}P_{26}K_{26}$. Использовали химическую систему защиты растений, которая предусматривала применение гербицидов сплошного действия осенью после уборки предшественника и весной до посева гороха.

Варианты в полевом опыте размещали систематически в один ярус. Площадь посевной делянки 6000 м² (60 м × 100 м), повторность трехкратная. Сорт гороха – Ягуар.

Почва опытного участка – чернозем типичный мощный тяжелосуглинистый. В среднем по опыту содержание гумуса в пахотном слое составляло 5,3 %, подвижного фосфора и калия (по Чирикову) – 200 и 127 мг/кг соответственно, азота щелочногидролизуемого (по Корнфилду) – 155 мг/кг. Реакция почвенной среды слабокислая ($pH_{KCl} = 5,3$ ед.).

Урожайность гороха учитывали при уборке комбайном Сампо-500 с последующим взвешиванием и пересчетом на 14 %-ную влажность и 100 %-ную чистоту. После уборки определяли запасы корневых остатков гороха в пахотном слое, а также количество соломы [13]. Для определения накопления микроэлементов горохом изучено их содержание в различных частях растений – корнях, соломе, зерне.

Валовое содержание микроэлементов в почве (Cu, Zn, Mn, Co, Fe) определяли методом спекания почвы с карбонатом натрия с дальнейшей обработкой HNO_3 (1:1) и H_2O_2 (конц.) и атомно-абсорбционным окончанием [14]. Содержание подвижных соединений микроэлементов в почве определяли в вытяжке ацетатно-аммонийного буфера (ААБ) pH 4,8, соотношение почва: раствор – 1:10. Содержание микроэлементов в семенах, соломе и корнях гороха определяли методом сухого озоления и кислотного сжигания (мокрого озоления) [15]. Все измерения проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре ААС-3.

Статистическую обработку полученных данных осуществляли методами дисперсионного и регрессионного анализов с использованием программ Microsoft Excel и Statistica.

Для оценки интенсивности поступления микроэлементов в растения рассчитывался коэффициент биологического поглощения (КБП), представляющий собой отношение содержания элемента в золе растения (или определенной его части) к валовому содержанию элемента в почве [16].

В годы проведения исследований сумма активных температур (САТ) в 2020 г. превышала среднемноголетнюю норму на 119 °C, в 2021 г. – на 204 °C, в 2022 г. – на 50 °C, в 2023 г. – на 64 °C (рис. 1). Количество выпавших атмосферных осадков в 2020 г. было выше нормы на 91 мм, в 2021 г. – на уровне среднемноголетних значений, в 2022 г. – ниже на 17 мм, в 2023 г. – выше на 22 мм.

Результаты и обсуждение. Применяемые технологии возделывания гороха не оказывали существенного влияния на содержание валовых форм микроэлементов

Табл. 1. Содержание микроэлементов в почве (среднее за 2020–2023 гг.), мг/кг

Технология	Cu	Zn	Mn	Co	Fe
Валовые формы					
Традиционная	8,38±0,16	30,39±0,36	166,5±4,16	11,18±0,32	499,4±4,99
Дифференцированная	8,35±0,11	30,84±0,25	161,5±2,10	10,69±0,27	511,2±1,53
Минимальная	7,53±0,12	30,12±0,21	156,5±4,70	10,92±0,34	511,9±5,12
Прямого посева	8,13±0,11	30,97±0,22	147,8±5,76	9,97±0,42	509,0±8,14
НСР ₀₅	1,93	1,86	18,81	1,69	20,71
Кларк почвы (К), мг/кг	20	50	850	10	38000
Подвижные формы					
Традиционная	0,40±0,01	1,37±0,05	35,40±1,06	0,43±0,01	260,7±1,30
Дифференцированная	0,40±0,01	1,35±0,04	33,43±0,84	0,47±0,01	259,1±1,55
Минимальная	0,45±0,01	1,33±0,04	31,50±0,41	0,46±0,02	262,8±0,79
Прямого посева	0,48±0,01	1,34±0,06	32,53±0,59	0,50±0,02	262,5±1,31
НСР ₀₅	0,10	0,18	3,80	0,05	3,11

в почве. Количество меди было ниже кларка (К) почвы [17] в 2,5 раза, цинка – в 1,6 раза, марганца – в 5,4 раза, железа – в 74,8 раза (табл. 1). Содержание валового кобальта в почве находилось на уровне кларка. Содержание подвижных форм микроэлементов в почве, в зависимости от технологии, также существенно не изменялось.

Наиболее высокое в опыте накопление меди отмечено в корнях гороха (табл. 2). Ее максимальное содержание зафиксировано при минимальной технологии (13,37 мг/кг). При возделывании гороха по традиционной технологии величина этого показателя снижалась на 1,40 мг/кг, по дифференцированной – на 1,26 мг/кг, при прямом посеве – на 0,70 мг/кг.

Содержание меди в соломе гороха было в среднем в 2,2 раза ниже, чем в корнях. По мере минимизации технологии происходило повышение ее концентрации с максимумом при прямом посеве (6,16 мг/кг). При традиционной технологии величина этого показателя снижалась на 0,56 мг/кг, при дифференцированной – на 0,77 мг/кг, при минимальной – на 0,35 мг/кг.

Семена гороха накапливали меньше меди, чем корни, в 2,4 раза, солома – в 1,1 раза. Отмечен рост содержания меди в семенах от традиционной технологии к дифференцированной (+0,70 мг/кг), минимальной (+1,26 мг/кг) и прямому посеву (+1,40 мг/кг).

Накопление меди корнями растений обусловлено меньшей подвижностью этого элемента в надземных частях растений, а также способностью корней удерживать медь от переноса в вегетирующие побеги [18].

Наибольшее в опыте содержание цинка зафиксировано в корнях гороха. Здесь его количество было выше, чем в соломе, в 3,0 раза, в семенах – в 1,2 раза. Вероятно, такой характер накопления этого элемента обусловлен тем, что выделяемые корнями гороха экссудаты могут участвовать в мобилизации почвенных форм цинка

путем его связывания в комплексы, облегчающие диффузию катионов Zn^{2+} к корням [19].

Традиционная технология и прямой посев по уровню накопления цинка корнями существенно не различались, его количество варьировало в пределах 34,10...34,63 мг/кг. Минимальное в опыте содержание этого элемента в корнях отмечено при дифференцированной обработке (29,88 мг/кг).

Количество цинка в соломе в зависимости от применяемой технологии имело обратную связь с его содержанием в корнях ($r = -0,98$). Меньшее количество цинка в соломе отмечено при прямом посеве и традиционной технологии (8,99...9,65 мг/кг), большее – при дифференцированной (13,35 мг/кг).

По содержанию цинка в семенах традиционная, дифференцированная и минимальная технологии существенно не различались. Величина этого показателя составляла 27,28...28,86 мг/кг. Минимальным в опыте уровнем накопления цинка характеризовались семена, выращенные на фоне прямого посева (24,86 мг/кг).

Наибольшее содержание марганца в горохе отмечали в корнях: выше в среднем в 5,8 раза, чем в соломе, и в 7,5 раза, чем в семенах, что вызвано акропетальным характером распределения этого элемента [20].

При дифференцированной технологии зафиксировано самое высокое количество марганца в корнях. Относительно нее на фоне традиционной технологии величина этого показателя снижалась на 13,09 мг/кг. Минимизация технологий возделывания гороха способствовала значительному снижению содержания марганца в корнях: при минимальной технологии на 39,13 мг/кг, при прямом посеве – на 44,45 мг/кг.

В то же время при минимальной технологии и прямом посеве, по сравнению с традиционной и дифференцированной технологиями, отмечено повышение уровня

Табл. 2. Содержание микроэлементов в частях растений гороха (среднее за 2020–2023 гг.), мг/кг абсолютно сухого вещества

Технология	Cu	Zn	Mn	Co	Fe
Корни					
Традиционная	11,97±0,44	34,10±0,58	356,86±4,28	5,97±0,23	974,96±13,65
Дифференцированная	12,11±0,21	29,88±0,66	369,95±4,81	6,72±0,27	958,65±22,05
Минимальная	13,37±0,13	31,18±0,28	330,82±4,30	6,83±0,30	984,62±5,91
Прямого посева	12,67±0,15	34,63±0,62	325,50±3,58	7,05±0,33	984,55±3,94
НСР ₀₅	0,64	3,55	12,82	0,52	13,77
Солома					
Традиционная	5,60±0,03	9,65±0,34	53,48±1,07	3,48±0,13	296,94±10,99
Дифференцированная	5,39±0,16	13,35±0,31	53,55±1,29	4,44±0,12	270,27±4,86
Минимальная	5,81±0,04	11,47±0,41	63,70±1,27	3,71±0,16	312,69±4,06
Прямого посева	6,16±0,07	8,99±0,31	68,11±1,02	4,11±0,16	320,04±5,12
НСР ₀₅	0,29	1,21	3,64	0,37	14,62
Семена					
Традиционная	4,34±0,10	28,06±0,31	48,23±1,45	2,67±0,11	116,13±1,39
Дифференцированная	5,04±0,07	28,86±0,43	45,36±1,41	2,95±0,06	109,97±1,21
Минимальная	5,60±0,09	27,28±0,87	36,75±0,92	3,51±0,12	107,45±0,97
Прямого посева	5,74±0,09	24,86±0,32	55,30±1,38	3,51±0,15	135,73±3,53
НСР ₀₅	0,44	1,62	4,71	0,46	15,81

марганца в соломе на 10,2 и 14,6 мг/кг. Между содержанием марганца в корнях и соломе гороха установлена весьма высокая обратная связь ($r = -0,96$).

В семенах гороха количество марганца в среднем было меньше, чем в соломе, в 1,3 раза. Максимальным в опыте уровнем накопления этого элемента в семенах характеризовалась продукция, выращенная по технологии прямого посева (55,30 мг/кг), наименьшим – по минимальной технологии (36,75 мг/кг). Традиционная и дифференцированная технологии по количеству марганца в семенах существенно не различались.

Наиболее высокая концентрация кобальта отмечена в корнях гороха, в среднем выше в 1,7 раза, чем в соломе, и в 2,1 раза, чем в семенах. Минимизация технологии способствовала повышению содержания кобальта в корнях. Так, по сравнению с традиционной, при дифференцированной технологии оно возросло на 0,75 мг/кг, при минимальной – на 0,86 мг/кг, при прямом посеве – на 1,08 мг/кг.

В соломе гороха наименьшее количество кобальта отмечено при традиционной (3,48 мг/кг), а наибольшее – при дифференцированной технологии (4,44 мг/кг). Содержание кобальта в семенах гороха при традиционной и дифференцированной технологиях существенно не различалось и варьировало в пределах 2,67...2,95 мг/кг. При переходе на минимальную технологию и прямой посев оно повышалось на 0,56...0,84 мг/кг.

Железо наиболее интенсивно накапливали корни гороха, где его содержание было выше, чем в соломе, в 3,3 раза, а по сравнению с семенами – в 8,3 раза. Такой характер распределения этого элемента обусловлен тем, что его поглощение растениями начинается в апопласте эпидермальных клеток корня. В аэробных условиях железо окисляется и осаждается в форме нерастворимых солей, формируя так называемый апопластный пул, в котором концентрируется до 95 % этого элемента, содержащегося в корне [21]. Величины этого показателя при традиционной и минимальной технологиях, а также прямом посеве существенно не различались, его количество варьировало в пределах 975,0...984,6 мг/кг, а при дифференцированной технологии снижалось на 16,3...26,0 мг/кг.

Наименьшее содержание железа в соломе гороха отмечали при возделывании культуры по дифференцированной технологии (270,27 мг/кг). Переход на минимальную технологию и прямой посев сопровождался повышением величины этого показателя соответственно на 15,75 и 23,1 мг/кг, относительно традиционной технологии.

Количество железа в семенах гороха при традиционной, дифференцированной и минимальной технологиях существенно не различалось и составляло 107,45...116,13 мг/кг. При прямом посеве наблюдали значительное повышение величины этого показателя на 19,60...28,28 мг/кг.

Для расчета коэффициентов биологического поглощения (КБП) изучаемых микроэлементов было определено их содержание в золе гороха (табл. 3). Наиболее высокой зольностью характеризовались корни растений – в среднем 49,3 %, что выше, чем в соломе, в 5,0 раз, по сравнению с семенами – в 15,4 раза.

Содержание в золе корней меди при традиционной и минимальной технологиях существенно не различалось и было выше, чем при дифференцированной, на 2,26...2,76 мг/кг, а по сравнению с прямым посевом – на 1,36...1,86 мг/кг. Наиболее высокую концентрацию меди в золе соломы гороха отмечали при прямом посеве (62,83 мг/кг), что выше, чем при традиционной техноло-

Табл. 3. Содержание микроэлементов в золе растений гороха (среднее за 2020–2023 гг.), мг/кг золы

Технология	Зола, % от сухо- го веще- ства	Cu	Zn	Mn	Co	Fe
Корни						
Традиционная	45,6	26,25	74,77	782,58	13,10	2138,08
Дифференци- рованная	50,5	23,99	59,17	732,58	13,31	1898,32
Минимальная	50,0	26,75	62,36	661,63	13,66	1969,25
Прямого посева	50,9	24,89	68,04	639,49	13,85	1934,28
НСП ₀₅	2,5	1,56	2,31	12,24	0,53	38,86
Солома						
Традиционная	9,7	57,76	99,50	551,37	35,85	3061,24
Дифференци- рованная	9,9	54,47	134,82	540,91	44,88	2730,00
Минимальная	9,9	58,72	115,90	643,41	37,50	3158,48
Прямого посева	9,8	62,83	91,71	694,97	41,91	3265,71
НСП ₀₅	0,3	2,72	13,43	25,58	1,71	48,97
Семена						
Традиционная	3,4	127,73	825,18	1418,61	78,56	3415,59
Дифференци- рованная	3,3	152,73	874,62	1374,55	89,35	3332,51
Минимальная	3,2	175,09	852,60	1148,44	109,73	3357,90
Прямого посева	2,9	197,83	857,38	1906,80	121,08	4680,25
НСП ₀₅	0,3	8,11	18,46	28,91	5,11	35,61

гии, на 5,07 мг/кг, дифференцированной – на 8,36 мг/кг, минимальной – на 4,11 мг/кг. Содержание меди в золе семян повышалось по мере снижения интенсивности технологии. По сравнению с традиционной технологией, ее количество увеличивалось при дифференцированной – на 25,00 мг/кг, при минимальной – на 47,36 мг/кг и при прямом посеве – на 70,10 мг/кг.

Максимальное в опыте содержание цинка в золе корней отмечено при традиционной технологии (74,77 мг/кг), а минимальное – при дифференцированной (59,17 мг/кг). В золе соломы гороха наиболее высокое содержание этого элемента отмечено при дифференцированной технологии – 134,82 мг/кг, что выше, чем при традиционной, на 35,32 мг/кг, при минимальной – на 18,92 мг/кг и при прямом посеве – на 43,11 мг/кг. По количеству цинка в золе семян минимальная технология и прямой посев существенно не различались. По сравнению с ними, при дифференцированной технологии отмечено повышение величины этого показателя на 17,24...22,02 мг/кг, а при традиционной – снижение на 27,42...32,20 мг/кг.

Содержание марганца в золе корней снижалось от традиционной технологии к прямому посеву на 50,00...143,09 мг/кг. Максимальное в опыте количество этого элемента в золе соломы зафиксировано при прямом посеве (694,97 мг/кг), минимальное – при дифференцированной технологии (540,91 мг/кг). В золе семян гороха самая высокая концентрация марганца отмечена при прямом посеве (1906,80 мг/кг), что выше, чем при традиционной технологии, в 1,34 раза, при дифференцированной – в 1,39 раза, при минимальной – в 1,66 раза.

Количество кобальта в золе корней постепенно повышалось от традиционной технологии к прямому посеву на 0,21...0,75 мг/кг. В золе соломы максимальное в опыте его содержание отмечено при дифференцированной технологии (44,88 мг/кг), а минимальное – при традиционной (35,85 мг/кг). В золе семян гороха концентрация кобальта увеличивалась по мере снижения интенсивности технологии на 10,79...42,52 мг/кг.

Наибольшее содержание железа в золе корней гороха отмечено при традиционной технологии (2138,08 мг/кг). В золе соломы оно достигало максимума при прямом посеве (3265,71 мг/кг), что выше, чем при традиционной технологии, на 2447 мг/кг, при дифференцированной –

Табл. 4. Коэффициенты биологического поглощения микроэлементов растениями гороха (среднее за 2020–2023 гг.)

Технология	Cu	Zn	Mn	Co	Fe
Корни					
Традиционная	3,13	2,46	4,70	1,17	4,28
Дифференцированная	2,87	1,92	4,54	1,24	3,71
Минимальная	3,55	2,07	4,23	1,25	3,85
Прямого посева	3,06	2,20	4,33	1,39	3,80
НСР ₀₅	0,17	0,13	0,19	0,14	0,10
Солома					
Традиционная	6,89	3,27	3,31	3,21	6,13
Дифференцированная	6,52	4,37	3,35	4,20	5,34
Минимальная	7,80	3,85	4,11	3,43	6,17
Прямого посева	7,73	2,96	4,70	4,20	6,42
НСР ₀₅	0,15	0,12	0,16	0,17	0,29
Семена					
Традиционная	15,24	27,15	8,52	7,03	6,84
Дифференцированная	18,29	28,36	8,51	8,36	6,52
Минимальная	23,25	28,31	7,34	10,05	6,56
Прямого посева	24,33	27,68	12,90	12,14	9,19
НСР ₀₅	0,82	0,16	1,14	1,08	1,04

на 535,71, при минимальной технологии – 107,23 мг/кг. Наибольшее содержание железа в золе семян зафиксировано при прямом посеве (4680,25 мг/кг), наименьшее – при дифференцированной технологии (3332,51 мг/кг).

Величина КБП всех изучаемых в опыте микроэлементы превышала 1 (табл. 4), что позволяет отнести их к группе сильного и энергичного накопления, для которой характерна биофильная аккумуляция [22].

КБП меди корнями гороха достигал максимума в опыте при минимальной технологии, а минимума – при дифференцированной. Кроме того, при дифференцированной технологии отмечен наименьший КБП меди в соломе (6,52). Минимальная технология и прямой посев обеспечили рост КБП этого элемента относительно традиционной технологии соответственно на 0,91 и 0,84 ед. В семенах гороха отмечен рост КБП по мере снижения интенсивности технологии. Так, по сравнению с традиционной, при дифференцированной технологии он увеличился на 3,05 ед., при минимальной – на 8,01 ед., при прямом посеве – на 9,09 ед. В среднем КБП меди для семян гороха был выше, чем для корней, в 6,4 раза, для соломы – в 2,8 раза.

Максимальный в опыте КБП цинка для корней гороха зафиксирован при традиционной технологии (2,46), что на 0,26...0,54 ед. выше, чем при других изучаемых технологиях. Увеличение КБП цинка соломой отмечено при дифференцированной технологии, по сравнению с традиционной, в 1,3 раза, минимальной – в 1,1 раза, прямым посевом – в 1,5 раза. В семенах гороха цинка накапливалось в 12,9 раза больше, чем в корнях, и в 7,7 раза больше, чем в соломе.

КБП марганца для корней гороха был самым высоким при традиционной технологии (4,70), а самым низким – при минимальной (4,23). В соломе культуры повышение КБП этого элемента от традиционной технологии к прямому посеву составляло от 0,04 до 1,39 ед. Для семян гороха максимальный в опыте КБП марганца отмечен при прямом посеве (12,90 ед.), что выше, чем при других технологиях, в 1,5...1,8 раза. КБП этого элемента для семян был в 2,1 раза выше, чем для корней, и в 2,4 раза, чем для соломы.

Максимальный в опыте КБП кобальта для корней гороха фиксировали при прямом посеве (1,39), что выше, чем при остальных технологиях, на 0,14...0,22 ед. Для соломы КБП этого элемента был наиболее высоким при дифференцированной технологии и прямом посеве (4,20). Для семян гороха отмечен рост КБП от традиционной технологии к прямому посеву в 1,2...1,7 раза. Биологическое накопление кобальта в семенах было самым

высоким – больше, чем в корнях, в 7,5 раза, по сравнению с соломой – в 2,5 раза.

Усиление биологического поглощения железа корнями гороха выявлено при традиционной технологии на 0,43...0,57 ед. относительно других применяемых технологий. Для соломы наименьший КБП отмечен при дифференцированной технологии (5,34), при других технологиях он был значительно выше и изменялся несущественно (6,13...6,42). Наибольший уровень биологического накопления железа фиксировали в семенах гороха – выше, чем в корнях, в 1,9 раза, по сравнению с соломой – в 1,2 раза. При этом рост КБП на фоне прямого посева, по сравнению с другими технологиями, составлял 1,3...1,4 раза.

С учетом продуктивности гороха и содержания химических элементов в различных частях растений были рассчитаны их запасы (табл. 5). Накопление корнями меди относительно традиционной технологии при дифференцированной снижалось на 2,6 %, а при прямом посеве и минимальной технологии повышалось соответственно на 2,6 и 7,7 %.

Дифференцированная и минимальная технологии способствовали снижению запасов меди в соломе на 11,8 и 5,9 %, по сравнению с традиционной технологией и прямым посевом. Уровень запасов меди в семенах при минимизации технологии возрастал на 20...30 %.

Накопление корнями цинка при традиционной технологии и прямом посеве находилось на одном уровне, а при дифференцированной и минимальной – снижалось на 11,8 и 14,5 % соответственно. В соломе наибольшее количество этого элемента накапливалось при дифференцированной технологии, а наименьшее – при прямом посеве. В семенах отмечено постепенное снижение накопления цинка от традиционной технологии к прямому посеву на 4,8...8,1 %.

Наиболее интенсивное накопление марганца корнями наблюдали при дифференцированной технологии, а наименьшее – при минимальной. Максимальное его накопление соломой обеспечил прямой посев – на 11,7...31,7 % больше, чем при других технологиях. В семенах оно было наименьшим при минимальной технологии, а наибольшим – при прямом посеве.

Накопление кобальта в корнях имело тенденцию к повышению от традиционной технологии к прямому посеву на 10,5...15,8 %. В соломе при дифференцированной технологии и прямом посеве оно находилось на одном уровне, а при традиционной и минимальной технологиях снижалось на 8,3 и 16,7 % соответственно. В семенах накопление этого элемента увеличивалось от традиционной технологии к прямому посеву на 16,6...33,3 %.

Табл. 5. Накопление микроэлементов растениями гороха (среднее за 2020–2023 гг.)

Технология	Масса, т/га	Содержание микроэлементов, кг/га				
		Cu	Zn	Mn	Co	Fe
Корни						
Традиционная	3,23	0,039	0,110	1,153	0,019	3,149
Дифференцированная	3,14	0,038	0,094	1,162	0,021	3,010
Минимальная	3,12	0,042	0,097	1,032	0,021	3,072
Прямого посева	3,19	0,040	0,110	1,038	0,022	3,141
Солома						
Традиционная	3,11	0,017	0,030	0,166	0,011	0,923
Дифференцированная	2,71	0,015	0,036	0,145	0,012	0,732
Минимальная	2,69	0,016	0,031	0,171	0,010	0,841
Прямого посева	2,80	0,017	0,025	0,191	0,012	0,896
Семена						
Традиционная	2,21	0,010	0,062	0,107	0,006	0,257
Дифференцированная	2,06	0,010	0,059	0,093	0,006	0,227
Минимальная	2,12	0,012	0,058	0,078	0,007	0,228
Прямого посева	2,31	0,013	0,057	0,128	0,008	0,314

Накопление железа в корнях в зависимости от технологий изменялось незначительно – на уровне 2,4...4,4 %. Самым высоким в соломе оно было при традиционной, а самым низким – при дифференцированной технологии. Накопление железа семенами при традиционной и минимальной технологиях снижалось на 11,3...11,7 %, а при прямом посеве повышалось на 22,2 %, по сравнению с традиционной технологией.

Выводы. Технология возделывания гороха не оказывала существенного влияния на содержание валовых и подвижных форм микроэлементов в почве. Наиболее высокое в опыте содержание изученных микроэлементов отмечено в корнях гороха, а наименьшее, за исключением цинка, – в семенах.

В корнях гороха максимальное содержание меди было при использовании минимальной технологии (13,37 мг/кг). По уровню накопления корнями цинка традиционная технология и прямой посев существенно не различались (34,10...34,63 мг/кг) и имели преимущество перед дифференцированной технологией (29,88 мг/кг). Самое высокое количество марганца в корнях отмечено при дифференцированной технологии. Минимизация технологий способствовала уменьшению его содержания на 39,13...44,45 мг/кг. Максимальное в опыте количество кобальта в корнях гороха обеспечила технология прямого посева. Содержание железа в корнях при традиционной и минимальной технологиях, а также прямом посеве существенно не различалось, а при дифференцированной – снижалось на 16,3...26,0 мг/кг.

В соломе гороха по мере минимизации технологии концентрация меди возрастала до максимума в опыте при прямом посеве (6,16 мг/кг). Наименьшее количество цинка в соломе отмечено при прямом посеве (8,99 мг/кг), а наибольшее – при дифференцированной технологии (13,35 мг/кг). При минимальной технологии и прямом посеве, по сравнению с традиционной и дифференцированными технологиями, в соломе происходило повышение уровня марганца на 10,2 и 14,6 мг/кг. Количество кобальта в соломе было наименьшим при традиционной технологии (3,48 мг/кг), а наибольшим – при дифференцированной (4,44 мг/кг). Меньше всего железа в соломе гороха отмечали при его возделывании по дифференцированной технологии (270,27 мг/кг).

В семенах гороха рост содержания меди от традиционной технологии к прямому посеву составлял 0,7...1,4 мг/кг. Минимальное количество цинка выявлено в семенах, выращенных при прямом посеве (24,86 мг/кг). Наибольший уровень марганца в семенах отмечен при прямом посеве (55,30 мг/кг), наименьший – при минимальной технологии (36,75 мг/кг). Содержание кобальта в семенах при традиционной и дифференцированной технологиях существенно не различалось, а при переходе на минимальную технологию и прямой посев повышалось на 0,56...0,84 мг/кг. При прямом посеве отмечено повышение концентрации железа в семенах на 19,60...28,28 мг/кг.

Коэффициент биологического накопления микроэлементов для семян выше, чем для корней и соломы: для меди – в 6,4 и 2,8 раза, для цинка – в 12,9 и 7,7 раза, для марганца – в 2,1 и 2,4 раза, для кобальта – в 7,5 и 2,5 раза, для железа – в 1,9 и 1,2 раза соответственно. Более высокие КБП меди, марганца, кобальта и железа для семян гороха отмечены при прямом посеве, цинка – при дифференцированной и минимальной технологиях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБНУ «Курский федеральный аграрный на-

учный центр» по теме государственного задания № FGZU-2024-0001. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство этим конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Ludvíková M., Griga M. Pea transformation: History, current status and challenges // *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*. 2022. No. 3. P. 127–161. doi: 10.17221/24/2022-CJGPB.
2. Горох. Посевные площади, валовые сборы и урожайность в 2023 году // Экспертно-аналитический центр агробизнеса «АБ-Центр» www.ab-centre.ru. URL: <https://ab-centre.ru/news/goroh-posevnye-ploschadi-valovye-sbory-i-urozhaynost-v-2023-godu> (дата обращения: 21.06.2024).
3. Hacisalihoglu G., Beisel N. S. Characterization of pea seed nutritional value within a diverse population of *Pisum sativum* // *PLoS One*. 2021. No. 4. e. 0259565. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0259565> (дата обращения: 01.06.2024). doi: 10.1371/journal.pone.0259565.
4. Симбиотическая фиксация атмосферного азота у бобовых растений как генетико-селекционный признак / К. К. Сидорова, М. Н. Глянченко, Т. М. Мищенко и др. // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2015. № 19 (1). С. 50–57.
5. *Field Pea in European Cropping Systems: Adaptability, Biological Nitrogen Fixation and Cultivation Practices* / A. Karkanis, G. Ntatsi, Ch-K. Kontopoulou, et al. // *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2016. Vol. 44. No. 2. P. 325–336. doi: 10.15835/nbha44210618.
6. Попов А. С. Благообеспеченность посевов твердой озимой пшеницы при возделывании по различным предшественникам // *Достижения науки и техники АПК*. 2019. Т. 33. № 11. С. 10–13. doi: 10.24411/0235-2451-2019-11102.
7. Вошедский Н. Н., Кулыгин В. А. Влияние элементов технологии возделывания на урожайность новых сортов гороха в богарных условиях Ростовской области // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 8. С. 14–19. doi: 10.53859/02352451_2021_35_8_14.
8. Труфанова А. А. Оценка качества фитомассы гороха при внесении традиционных комплексных удобрений и акваринов // *Вестник КрасГАУ*. 2022. № 3. С. 79–86. doi: 10.36718/1819-4036-2022-3-79-86.
9. Зубкова Т. В., Мотылева С. М., Виноградов Д. В. Исследование влияния органических и минеральных удобрений на урожайность рапса и зольный состав его маслосемян // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2022. № 1 (57). С. 77–84.
10. Дубовик Д. В., Дубовик Е. В., Морозов А. Н. Микроэлементы в яровом ячмене в зависимости от способа основной обработки почвы // *Земледелие*. 2023. № 7. С. 11–15.
11. Arslan M. Variation of some seed trace element contents in Grass Pea (*Lathyrus sativus* L.) genotypes from Turkey // *Fresenius Environmental Bulletin*. 2017. Vol. 26. No. 5. P. 3676–3684.
12. Photosynthesis, yielding and quality of pea seeds depending on the row spacing and sowing density / R. E. Tobiasz-

- Salach, M. Jańczak-Pieniążek, D. Bobrecka-Jamro, et al. // *Journal of Water and Land Development*. 2022. Special Issue. P. 146–155. doi: 10.24425/jwld.2022.143730.
13. Васильев И. П., Туликов А. М., Баздырев Г. И. Практикум по земледелию. М.: КолосС, 2004. 424 с.
14. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства / А. В. Кузнецов, А. П. Фесон, С. Г. Самохвалов и др. М.: Изд-во ЦИНАО, 1992. 61 с.
15. Практикум по агрохимии / В. Г. Минеев, В. Г. Сычев, О. А. Амелянчик и др. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
16. Добровольский В. В. Основы биогеохимии. М.: Изд-во Академия, 2003. 400 с.
17. Дьяченко В. В., Матасова И. Ю. Региональные кларки химических элементов в почвах Европейской части юга России // *Почвоведение*. 2016. № 10. С. 1159–1166. doi: 10.7868/S0032180X16100063.
18. Transcriptome analysis shows that alkalinity affects metabolism in the roots of *Mesembryanthemum crystallinum* / Y. X. Hei, J. Liu, Z. X. Zhang, et al. // *Biologia plantarum*. 2023. Vol. 67. P. 114–125. doi: 10.32615/bp.2023.009.
19. Impact of zinc and iron agronomic biofortification on grain mineral concentration of finger millet varieties as affected by location and slope / D. Teklu, D. Gashu, E. J. M. Joy, et al. // *Frontiers in Nutrition*. 2023. Vol. 10. P. 1159833. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/nutrition/articles/10.3389/fnut.2023.1159833/full> (дата обращения: 01.06.2024). doi: 10.3389/fnut.2023.1159833.
20. Витковская С. Е., Яковлев О. Н. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение марганца и железа в системе почва – растение // *Агрохимия*. 2017. № 11. С. 44–51. doi: 10.7868/S0002188117110059.
21. Excessive iron accumulation in the pea mutants *dgl* and *brz*: subcellular localization of iron and ferritin / R. Becker, R. Manteuffel, D. Neumann, et al. // *Planta*. 1998. Vol. 207. P. 217–223. doi: 10.1007/s004250050475.
22. Лукин С. В. Оценка макро- и микроэлементного состава растений гороха, белого люпина и сои // *Вестник Российской сельскохозяйственной науки*. 2018. № 6. С. 76–79. doi: 10.30850/vrsn/2018/6/76-79.

Поступила в редакцию 31.07.2024

После доработки 16.09.2024

Принята к публикации 08.10.2024

Растениеводство, защита и биотехнология растений

УДК: 632.93

DOI 10.31857/S2500262724050043 EDN SJAORT

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ НА МИКРОМИЦЕТЫ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ КАРТОФЕЛЯ В УСЛОВИЯХ НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

© 2024 г. **А. А. Новиков**, доктор сельскохозяйственных наук,
К. А. Родин, кандидат сельскохозяйственных наук, **С. В. Мельник**, **А. С. Кажгалев**

Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия –
филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова,
400002, Волгоград, ул. им. Тимирязева, 9
E-mail: alexeynovikov@inbox.ru

Исследования проводили с целью сравнения влияния различных систем защиты растений на количественный состав почвенных микромицетов при выращивании картофеля в условиях Нижнего Поволжья. Работу выполняли в 2021–2023 гг. в Волгоградской области на светло-каштановых тяжелосуглинистых почвах при орошении дождеванием в посадках сорта Гулливер. Оценивали степень заражения клубней картофеля при трех вариантах системах защиты: I – биологическая; II – химическая (контроль); III – интегрированная. В почвенных образцах перед посадкой количество сапрофитных микромицетов составляло 71,93...91,8 %, среди которых наиболее распространенными были грибы рода *Penicillium* sp. (33,6...44,2 тыс. КОЕ/г). Кроме них, были отмечены представители родов *Trichoderma* sp. (0...2,5 тыс. КОЕ/г), *Aspergillus* sp. (1,24...19,7 тыс. КОЕ/г) и *Rhizopus* sp. (0...8,1 тыс. КОЕ/г), а также патогенные грибы рода *Fusarium* sp. (5,8...9,92 тыс. КОЕ/г). После применения биологических средств защиты растений в почвенных образцах зафиксирована более высокая доля сапрофитных (*Penicillium* sp., *Trichoderma* sp., *Aspergillus* sp., *Rhizopus* sp.) микромицетов (73,9 %), чем после использования химических средств (61 %) и интегрированной системы (59,6 %). В том числе представителей рода *Penicillium* sp. в варианте с биологическими средствами защиты растений было больше, чем при применении химических препаратов, на 15,6 %, *Trichoderma* sp. – на 70 %, *Aspergillus* sp. – на 77,8 %. Количество патогенных микромицетов (*Fusarium* sp.) в почвенных образцах после использования биологических соединений составляло 26,1 %, химических препаратов – 38,9 %, интегрированной системы – 40,3 %. Использование биологических средств защиты растений при выращивании картофеля в условиях Нижнего Поволжья при орошении можно считать перспективным приемом для повышения сапрофитности и уменьшения патогенности почвенной микрофлоры.

THE INFLUENCE OF VARIOUS PLANT PROTECTION SYSTEMS ON MICROMYCETES IN POTATO CULTIVATION IN THE CONDITIONS OF THE LOWER VOLGA REGION

A. A. Novikov, K. A. Rodin, S. V. Mel'nik, A. S. Kazhgaliev

All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture,
Kostyakov Federal Scientific Center of Hydraulic Engineering and Amelioration,
400002, Volgograd, ul. im. Timiryazeva, 9
E-mail: alexeynovikov@inbox.ru

The research was carried out in order to compare the effect of various plant protection systems on the quantitative composition of soil micromycetes when growing potatoes in irrigated of the Lower Volga region. The work was carried out in 2021–2023 in the Volgograd region on light chestnut heavy loamy soils under irrigation by sprinkling in Gulliver cultivar plantings. The degree of infection of potato tubers was assessed on three variants of protection systems: I – biological; II – chemical (control); III – integrated. The experience was laid out in three-fold repetition, the accounting area of the plot was 294 m². In the pre-sowing soil samples, the number of saprophytic micromycetes was 71.93...91.8 %, among which the most common were fungi of the genus *Penicillium* sp. (33.6...44.2 thousand CFU/g), and the rest are represented by fungi of the genus *Trichoderma* sp. (0...2.5 thousand CFU/g), *Aspergillus* sp. (1.24...19.7 thousand CFU/g), and *Rhizopus* sp. (0...8.1 thousand CFU/g). Representatives of the genus *Fusarium* sp. are noted among the pathogens. (5.8...9.92 thousand CFU/g). A higher percentage of saprophytic (*Penicillium* sp., *Trichoderma* sp., *Aspergillus* sp., *Rhizopus* sp.) micromycetes (73.9 %) than after the use of chemicals (61 %) and an integrated system (59.6 %). Thus, representatives of the genus *Penicillium* sp. were 15.6 % more than with the use of chemicals, *Trichoderma* sp. by 70 %, *Aspergillus* sp. by 77.8 %. The number of pathogenic micromycetes (*Fusarium* sp.) in soil samples after the use of biological compounds was 26.1 %, chemical compounds 38.9 %, integrated system 40.3 %. Thus, the use of biological protective agents in potato cultivation in the conditions of the Lower Volga region during irrigation contributes to an increase in saprophytivity and a decrease in the pathogenicity of soil microflora and is a promising technique.

Ключевые слова: картофель (*Solanum tuberosum* L.), микромицеты, патогены, сапрофиты, защита растений, биологические средства, химические средства.

Keywords: potatoes, *solanum tuberosum*, micromycetes, pathogens, saprophytes, plant protection, biological agents, chemical agents.

Нижнее Поволжье расположено в аридной климатической зоне. Высокие температуры и малое количество атмосферных осадков формируют жесткие условия для ведения сельского хозяйства. Для того чтобы нивели-

ровать их неблагоприятное влияние на рост и развитие культурных растений, применяют различные системы орошения. При этом дополнительное увлажнение способствует развитию и распространению фитопатогенов [1].

Картофель – одна из важнейших сельскохозяйственных культур, которая вносит существенный вклад в обеспечение продовольственной безопасности страны. Обладая высокой пластичностью, культура способна формировать высокую урожайность, в том числе в условиях крайне засушливого климата Нижнего Поволжья. Однако картофель сильно восприимчив к большому числу патогенов. Это обусловлено высоким содержанием в клубнях воды и крахмала, что формирует благоприятную среду для развития микроорганизмов [2]. Микромицеты – основной биотический стрессор, действие которого приводит к потере урожайности при выращивании культуры и хранении продукции [3].

Поскольку картофель размножается вегетативным путем, первичным источником инфекции считают семенные клубни. Кроме того, благодаря сапрофитному типу питания и разнообразию клеточных структур, обеспечивающих размножение, микромицеты способны долгое время сохраняться в почве [4].

Согласно анализу урожая, выращенного в Саратовской области в 2018–2021 гг., основными патогенами в клубнях были *Rhizoctonia* sp., *Alternaria* sp. и *Phytophthora* sp. [5]. В 2019 г. в Республике Татарстан доля пораженного *Fusarium* sp. урожая составила 18,8...35% [4]. В микрофлоре 152 образцов зараженного картофеля, собранных в разных регионах Алжира, было выявлено 13 видов *Fusarium* sp. и *Neocosmospora* sp. [6]. Таким образом, распространение патогенных микромицетов не зависит от почвенно-климатических условий.

Для защиты картофеля от патогенов применяют биологические и химические препараты [7, 8]. При этом в зависимости от условий окружающей среды некоторые химические соединения могут находиться в почве более 10 лет и мигрировать в воду, воздух и растения, тем самым влияя на здоровье населения. Использование химических средств для защиты растений от патогенов оказывает сильное негативное влияние на агробиоценоз. Это происходит из-за разрушения структуры биоценоза и появления у патогенных микроорганизмов устойчивости к применяемым средствам, из-за чего возникает необходимость в большем расходе препарата или применении новых химических соединений. Нарушение структуры биоценоза также приводит к снижению биоресурсной функции почв, которая обеспечивает секвестрацию углерода, минерализацию органических соединений и играет важную роль в поддержании питания растений [9].

В качестве альтернативы химическим веществам возможно использование биологических препаратов, которые содержат активные комплексы метаболитов и живые культуры микроорганизмов [10, 11, 12]. Их действие селективно, направлено против определенных патогенов и не влияет на сапрофитные микроорганизмы. Однако использование таких препаратов требует определенных условий среды и соблюдения ряда правил для достижения оптимального эффекта [13, 14]. Интегрированная система защиты растений предусматривает применение химических средств защиты растений в сочетании с биологическими.

Например, использование биологических препаратов при выращивании картофеля в Краснодарском крае способствовало частичному балансированию состава почвенных микроорганизмов, улучшало биометрические показатели растений, повышало урожайность и качество клубней. Применение биопрепарата СХП1 на территории Астраханской области увеличивало полевую всхожесть картофеля на 14,8%, урожайность – на 19,8%. Кроме того, препарат был эффективен против *Alternaria* sp. [15].

Таким образом, результаты исследований, проведенных в различных регионах, свидетельствуют об эффективности применения биологических средств защиты растений картофеля. Однако для условий Нижнего Поволжья не установлены закономерности их воздействия на микробиологическое состояние почвы при орошении.

Цель исследования – установить влияние химической и биологической систем защиты растений на содержание микромицетов в почве при выращивании картофеля на орошении в Нижнем Поволжье.

Методика. Исследования проводили в 2021–2023 гг. в Советском районе города Волгограда в посадках картофеля сорта Гулливер. Схема опыта предусматривала изучение трех вариантов системы защиты растений (СЗР) – биологической, химической (контроль) и интегрированной.

При биологической СЗР осуществляли следующие мероприятия:

клубни перед посадкой обрабатывали препаратами Геостим Фит А (3 л/т), Геостим Фит Ж (2 л/т), Гумел Люкс (2 л/т) и Гелиос Супер (2 л/т) в баковой смеси; при появлении единичных всходов проводили обработку баковой смесью препаратов Геостим Фит Ж (1,5 л/га) в сочетании с БСка-3 (4 л/га) и Импровер (50 мл/га), после чего выполняли междурядную обработку для заделки биологических препаратов в прикорневую область; вегетирующие растения в фазы активного роста, смыкания в рядке, бутонизации и цветения опрыскивали биопрепаратами в составе баковой смеси: Геостим Фит Ж (1,5 л/га), БСка-3 (4 л/га), Импровер (50 мл/га), Бфтим (4 л/га), Гумел Люкс (1,0 л/га), Гелиос Азот (3,0 л/га), Гелиос Трио (0,5 л/га) и Гелиос Супер (2 л/га). При превышении численности колорадского жука экономического порога вредоносности добавляли Инсетим (4,0 л/га) [16].

Химическая СЗР (контроль) предусматривала следующие мероприятия:

обработка клубней инсектицидом Максим в дозе 0,2 л/т;

при смыкании рядов растений опрыскивание фунгицидом Ревус, КС (0,6 л/га) в сочетании с инсектицидом Регент, ВДГ (0,025 л/га);

в фазах бутонизации и цветения обработка фунгицидом Луна Транкливити (0,6 л/га) и инсектицидом Регент, ВДГ (0,025 л/га) [16].

Интегрированная система заключалась в применении биологической схемы и дополнительной обработке клубней перед посадкой фунгицидом Максим (0,2 л/т).

Почва участка – светло-каштановая тяжелосуглинистая. Мощность гумусового горизонта – 0,00...0,26 м. Содержание гумуса в пахотном горизонте низкое – 1,19%. Почва участка характеризуется низкой обеспеченностью гидролизуемым азотом – 31,0 мг/кг почвы (по Шмелевой и Тютереву), средней – подвижным фосфором – 44,0 мг/1,0 кг почвы (P_2O_5 , по Мачигину) и повышенной – калием – 316,0 мг/кг почвы (K_2O , ГОСТ 2642785 в модификации ЦИНАО). Реакция почвенного раствора (рН) 7,4. Сумма обменных оснований (S) – 42,1 мг-экв./100 г почвы (по Каппену).

В период вегетации картофеля в 2021 г. сумма атмосферных осадков составляла 42% ($\Sigma=202,8$ мм), в 2022 и 2023 гг. – 61% ($\Sigma=162,8$ мм) и 73% ($\Sigma=136,8$ мм) от среднегодовой нормы соответственно. При этом гидротермический коэффициент (ГТК) в 2021 г. был равен 0,6; в 2022 и 2023 гг. – 0,4.

Посадку в 2021 г. проводили 6 мая, в 2022 г. – 19 мая и в 2023 г. – 5 мая, уборку – соответственно 17, 27

Табл. 1. Количество микромицетов в почве перед посадкой картофеля и после уборки на фоне применения различных средств защиты, тыс. КОЕ/г абсолютно сухой почвы

Год	<i>Penicillium</i>	<i>Trichoderma</i>	<i>Aspergillus</i>	<i>Rhizopus</i>	<i>Fusarium</i>
Перед посадкой					
2021	33,6	0	19,7	8,1	5,8
2022	40,9	0	1,2	0	9,9
2023	44,2	2,5	5,1	2,5	7,6
Среднее	39,6±3,1 ^{b*}	0,8±0,8 ^b	8,7±5,6 ^a	3,5±2,4 ^a	7,8±1,2 ^b
Биологическая СЗР					
2021	59,6	4,7	7,0	0,0	26,9
2022	65,9	5,1	0,0	3,8	16,5
2023	77,7	2,6	3,9	0,0	18,1
Среднее	67,7±5,3 ^a	4,1±0,8 ^a	3,6±2 ^b	1,3±1,2 ^b	20,5±3,2 ^a
Химическая СЗР					
2021	72,3	1,1	0,0	3,4	45,2
2022	34,1	1,2	2,4	2,4	30,5
2023	64,8	1,3	0,0	8,9	12,7
Среднее	57,1±11,7 ^a	1,2±0,1 ^b	0,8±0,8 ^b	4,9±2 ^a	29,5±9,4 ^a
Интегрированная СЗР					
2022	47,6	2,4	0,0	1,2	30,5
2023	54,4	1,3	2,6	2,6	47,9
Среднее	34,0±3,4 ^b	1,2±0,5 ^b	0,9±1,3 ^b	1,3±0,7 ^b	26,1±8,7 ^a

*Здесь и в табл. 2 разными буквами обозначены величины, которые статистически значимо различаются по U-критерию Манна – Уитни при $p \leq 0,05$.

и 21 сентября. Способ полива – дождевание. Водный режим почвы поддерживали на уровне не ниже 80% НВ в слое 0,4 м.

Предшественник – соя. Опыт закладывали методом расщепленных делянок при одноярусном систематическом размещении вариантов. Повторность опыта трехкратная, учетная площадь делянки по системе защиты растений 294 м².

Качество семенного материала на всхожесть определяли по ГОСТ 12038-84. Фитопатологическую оценку клубней проводили по ГОСТ 59551-2021. Статистическую обработку данных выполняли с использованием U-критерия Манна – Уитни.

Результаты и обсуждение. Перед посадкой картофеля количество *Penicillium* sp., которые выступают антагонистами грибов рода *Fusarium* ssp. [17], в почве в 2022 и 2023 гг. было больше, чем в 2021 г., на 21 и 31%. Грибы рода *Trichoderma* sp. отмечали в почвенных образцах 2023 г., а в 2021 и 2022 гг. их не обнаружили. *Trichoderma* sp. используют для оздоровления почв, поскольку представители этого рода выделяют вещества, которые способствуют разложению растительных остатков, и супрессивные соединения, ингибирующие развитие фитопатогенов [18]. Количество *Aspergillus* sp. почве в 2022 и 2023 гг., было меньше, чем в 2021 г.,

Табл. 2. Доля сапрофитных и паразитарных микромицетов в почве после применения различных средств защиты

Система защиты	Год	Сапрофитные микромицеты, %	Паразитарные микромицеты, %
Перед посадкой	2021	91,8	8,2
	2022	71,9	28,1
	2023	87,8	12,2
	среднее	83,8±6,1 ^a	16,6±6,1 ^a
Биологическая	2021	63,7	36,6
	2022	78,9	21,1
	2023	79,3	20,7
	среднее	73,9±5,1 ^a	26,1±5,2 ^a
Химическая	2021	50,3	49,7
	2022	47,1	52,9
	2023	85,7	14,3
	среднее	61±12,4 ^{ab}	38,9±12,4 ^{ab}
Интегрированная	2022	64,3	35,7
	2023	55	45
	среднее	59,6±4,7 ^b	40,3±4,7 ^b

на 93,7% и 74,1% соответственно. *Aspergillus* sp. относят к высшим плесневым грибам, которые встречаются преимущественно в почвах южной зоны [19]. Количество *Rhizopus* sp. в 2023 г., по сравнению с 2021 г., было меньше на 69,1%, а в 2022 г. они отсутствовали. Представители этого рода – нитчатые сапрофитные грибы – растут во влажном и теплом климате [20]. Увлажнение почвы при выращивании сельскохозяйственных культур на территории Нижнего Поволжья способствует созданию благоприятной среды для их развития. Численность представителей рода *Fusarium* sp. в 2022 г. была больше, чем в 2021 г., на 71%, а в 2023 г. – меньше на 23,4% (табл. 1).

В целом наибольшее количество сапрофитных микроорганизмов перед посадкой наблюдали в 2021 и 2023 гг. – соответственно 91,8% и 87,8% от общей численности микрофлоры. Однако в 2022 г. доля патогенных микромицетов достигала 28,07%. Степень зараженности посадочного материала *Fusarium* sp., *Alternaria* sp. и бактериями во все годы исследования была высокой.

После сбора урожая картофеля количество почвенных микромицетов менялось в зависимости от используемого способа защиты растений. Доля сапрофитных микромицетов при использовании биологических препаратов снижалась на 11,8%, а в вариантах с химической и интегрированной системами – на 27,2 и 28,9% (табл. 2).

Количество *Penicillium* sp. в почве при использовании биологической системы защиты растений было больше, чем в варианте с химической, на 15,6%, с интегрированной – на 49%. Средняя численность *Trichoderma* sp. при применении биологических средств была на 70% больше, чем при использовании химических веществ и интегрированной системы. Наибольшее количество *Aspergillus* sp. отмечено в варианте с биологической СЗР, после применения химической и интегрированной СЗР оно было ниже соответственно на 77,8% и 75%. Численность *Rhizopus* sp. на фоне биологической и интегрированной систем была одинаковой, а при использовании химических препаратов она была выше на 276%. Наибольшее количество грибов рода *Fusarium* sp. отмечено при использовании химических соединений, при интегрированной системе и применении биологических препаратов оно было меньше соответственно на 11,5% и 30,5% (см. табл. 1).

Урожай характеризовался высокой зараженностью *Fusarium* sp. и бактериями при использовании всех трех изучаемых систем защиты. Степень зараженности клубней *Alternaria* sp. в варианте с биологической СЗР была меньше, чем при химической и интегрированной системах, *Phoma* sp. при использовании биологических и химических средств – ниже, чем в варианте с интегрированной защитой (табл. 3).

Табл. 3. Степень зараженности урожая при использовании различных систем защиты

Система защиты растений	Год	Микроорганизм			
		<i>Fusarium</i>	<i>Alternaria</i>	<i>Phoma</i>	Бактерии
Биологическая	2021	+++	+	-*	+++
	2022	+++	++	+	+++
	2023	++	+	+	+
	среднее	+++	++	-	+++
Химическая	2021	+++	++	-	+++
	2022	++	+++	+	+++
	2023	+++	+++	+	+++
	среднее	+++	+++	++	+++

* – отсутствие заражения, + – низкая зараженность, ++ – средняя зараженность, +++ – высокая зараженность.

Выводы. Использование различных систем защиты растений при выращивании картофеля в условиях Нижнего Поволжья влияет на состав почвенных микромицетов. Биологическая СЗР обеспечивает большее сохранение сапрофитных микромицетов в сравнении с химической. Так, численность представителей рода *Penicillium* sp. в варианте с применением только биологических препаратов была выше, чем при использовании химических, на 15,6%, *Trichoderma* sp. – на 70%, *Aspergillus* sp. – на 77,8%, а микромицетов рода *Fusarium* sp. – меньше на 43,9%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России FNFR-2023–0001 «Комплексная оценка биологического потенциала перспективных отечественных сортов картофеля и разработка агротехнологии устойчивого производства семенных клубней для условий орошаемого земледелия».

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

- Новиков А. А. Рациональное использование водных ресурсов картофеля при его выращивании в орошаемых звеньях севооборотов на черноземах // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 5. С. 37–41.
- Действие биологических препаратов на численность патогенных и сапрофитных микромицетов, колонизирующих клубни картофеля / А. В. Широков, Л. И. Пусенкова, Е. Ю. Лобастова и др. // Сельскохозяйственная биология. 2012 № 1. С. 117–120.
- Khedher S. B., Mejdoub-Trabelsi B., Tounsi S. Biological potential of *Bacillus subtilis* V26 for the control of *Fusarium* wilt and tuber dry rot on potato caused by *Fusarium* species and the promotion of plant growth // Biological Control. 2021. Vol. 152. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S104996442030671X> (дата обращения: 21.07.2024). doi: 10.1016/j.biocontrol.2020.104444.
- Фузариозное поражение клубней картофеля / Р. М. Потехина, Л. Е. Матросова, Е. Ю. Тарасова и др. // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2020. № 22. С. 484–486.
- Еськов И. Д., Теняева О. Л., Шаповалов А. Г. Защита картофеля от болезней при гребневой технологии возделывания в лесостепной зоне Поволжья // Биосфера. 2022. Т. 14. № 4. С. 319–322. doi: 10.24855/biosfera.v14i4.696.
- Identification and pathogenicity of *Fusarium* spp. Associated with tuber dry rot and wilt of potato in Algeria / N. Azil, E. Stefanczyk, S. Sobkowiak, et al. // European Journal of Plant Pathology. 2021. Vol. 159. No. 3. P. 495–509.
- Дзедзедзе Х. Т., Газданова И. О., Бекмурзов Б. В. Биологическая борьба с фитофторозом картофеля, вызываемым *Phytophthora infestans* // Аграрный вестник Урала. 2023. Т. 23. № 9. С. 2–10.
- Защита картофеля при хранении / В. Н. Зейрук, Г. Л. Белов, С. В. Васильева и др. // Достижения науки и техники АПК. 2022. Т. 36. № 2. С. 27–31.
- Семенов М. В. Микробиологические индикаторы экологических функций почв // Почвоведение: горизонты будущего. Шестая конференция молодых ученых почвенного института им. В. В. Докучаева. М.: Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 2022. С. 11.
- Павлюшин В. А., Новикова И. И., Бойкова И. В. Микробиологическая защита растений в технологиях фитосанитарной оптимизации агроэкосистем: теория и практика (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2020. Т. 55. № 3. С. 421–438. doi: 10.15389/agrobiology.2020.3.421rus.
- Брескина Г. М., Масютенко Н. П., Чуян Н. А. Биопрепараты как средство восстановления здоровья черноземных почв // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 2 (58). С. 25–31.
- Экологическое состояние ризосферы перспективных сортов яровой мягкой пшеницы при применении биопрепаратов / Н. Н. Шулико, И. А. Корчагина, Е. В. Тукмачева и др. // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 10. С. 21–27.
- Моделирование эффективности штаммов *Bacillus subtilis* в зависимости от природно-климатических факторов при возделывании мягкой пшеницы / Л. Е. Колесников, И. И. Новикова, В. А. Павлюшин и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2023. № 4. С. 29–37.
- Эффективность лабораторного образца биопрепарата на основе *Bacillus velezensis* 336g при различных способах его применения для защиты от болезней озимых колосовых / А. М. Асатурова, Н. М. Сидоров, Н. С. Томашиевич и др. // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 5. С. 28–33.
- Изучение влияния биопрепарата на основе *Bacillus atrophaeus* на урожайность картофеля / О. Б. Сопрунова, В. Е. Сопрунова, Ш. Б. Байрамбеков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2020. Т. 8. № 4. С. 86–95.
- Родин К. А., Новиков А. А., Новиков А. Е. Совершенствование технологии возделывания картофеля при разных системах защиты растений в условиях Нижнего Поволжья // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13. № 4. С. 349–361. doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-4-349-361.
- Селиванова Г. А., Гаврилова М. Ю. Снижение инфекционного потенциала почв свекловичного агроценоза ЦЧР путем интродукции антагонистов из рода *Penicillium* // Защита картофеля. 2020. № 1. С. 19–20.
- Соколова Л. М. Патокомплексное разнообразие микробиоты в аллювиально-луговой, среднесуглинистой почве // Инновационные идеи молодых исследователей: сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции. Уфа: Издательство «НИИ Вестник науки», 2023. С. 28–38.
- Сердюк О. А. Почвенная микофлора агроценозов яровых рапса и рыжика // Масличные культуры. 2024. № 1. Т. 197. С. 119–124. doi: 10.25230/2412-608X-2024-1-197-119-124.
- A fungus-based soil improvement using *Rhizopus oryzae* inoculum / C. Jerez Lazo, N. Lee, P. Tripathi, et al. // International Journal of Geo-Engineering. 2024. Vol. 15. No. 1. Article 18. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40703-024-00218-0> (дата обращения: 22.07.2024). doi: 10.1186/s40703-024-00218-0.

Поступила в редакцию 24.08.2024

После доработки 18.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

Агропочвоведение и агроэкология

УДК 631.84+633.11

DOI 10.31857/S2500262724050052 EDN SIXPRS

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМЫ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ^{15}N И ИНОКУЛЯЦИИ СЕМЯН БИОПРЕПАРАТАМИ

© 2024 г. А. А. Завалин, академик РАН, Дж. Ньямбосе, кандидат биологических наук,
Л. С. Чернова, кандидат сельскохозяйственных наук

Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д. Н. Прянишникова
127434, Москва, ул. Прянишникова, 31а
E-mail: zavalin.52@mail.ru

Исследование проводили с целью изучения влияния различных доз азотного удобрения и биопрепаратов на функционирование агроэкосистемы яровой пшеницы на темно-серой лесной почве. Работу выполняли в двух закладках микрополевого опыта в 2020–2021 гг., схема которого предполагала изучение следующих вариантов: $\text{N}_{45}\text{P}_{45}\text{K}_{45}$ (фон), фон + Экстрасол на основе штамма Ч-13 (стандарт), фон + эндофитный штамм V 167, фон + эндофитный штамм 417, $\text{N}_{90}\text{P}_{45}\text{K}_{45}$. Биопрепараты на основе исследуемых микроорганизмов применяли путем инокуляции семян яровой пшеницы в день посева. При внесении N_{45} и N_{90} на фоне РК растения потребляют соответственно от 46 и 42 % меченого удобрения для формирования урожая. Применение биопрепаратов на фоне N_{45} повышает использование N-удобрения до 51...53 %. В почве закрепляется 33...36 % от внесенной дозы ^{15}N , при инокуляции биопрепаратами величина этого показателя снижается до 30 %. При внесении аммиачной селитры теряется 33...36 % ^{15}N , инокуляция семян биопрепаратами сокращает потери до 16...18 %. Использование биопрепаратов приводит к тому, что после уборки яровой пшеницы в почве остается на 0,47...0,51 г/м² минерального азота меньше, что свидетельствует о лучшем его использовании растениями. По отношению реимобилизованного азота к мобилизованному (РИ: $M = 25...31$ %) агроценоз яровой пшеницы при внесении азотного удобрения и инокуляции семян биопрепаратами функционирует в режиме резистентности, а уровень воздействия характеризуется как предельно допустимый. По критерию нормирования, который оценивается по отношению нетто-минерализованного азота к реимобилизованному (Н-М: $M = 2,24...2,98$), агроценоз яровой пшеницы находится в режиме стресса или резистентности. Применение эндофитного биопрепарата на основе штамма V 417 приводит к тому, что агроценоз яровой пшеницы функционирует в режиме резистентности при допустимом уровне воздействия.

ASSESSMENT OF THE STABILITY OF SPRING WHEAT AGROCENOSIS WITH APPLICATION OF ^{15}N AND SEED INOCULATION WITH BIOLOGICS

A. A. Zavalin, J. Nyambose, L. S. Chernova

Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry,
127550, Moskva, ul. Pryanishnikova, 31 a,
E-mail: zavalin.52@mail.ru

The purpose of the research is to study the effect of various doses of nitrogen fertilizers and biological products on the functioning of the agroecosystem of spring wheat on dark gray forest soil. The work was performed in two tabs of the micropole experiment in 2020–2021, the scheme of which assumed the study of the following options: $\text{N}_{45}\text{P}_{45}\text{K}_{45}$ (background), background + Extrasol based on strain H-13 (standard), background + endophytic strain V 167, background + endophytic strain 417, $\text{N}_{90}\text{P}_{45}\text{K}_{45}$. When applying N_{45} and N_{90} against the background of PK, plants consume 46 and 42 % of labeled fertilizer to form a crop, respectively. When using biologics against the background of N_{45} , the use of N-fertilizer reaches 51...53 %. 33...36 % of the applied dose of ^{15}N is fixed in the soil, when using biologics, the value of this indicator decreases to 30 %. When adding ammonium nitrate, 33...36 % of ^{15}N is lost, and when using biological products, losses are reduced to 16...18 %. The use of biological preparations for seed inoculation leads to the fact that after harvesting spring wheat, there is less mineral nitrogen in the soil by 0.47...0.51 g/m², which indicates its best use by plants. According to the criterion of the ratio of reimmobilized nitrogen to mobilized nitrogen (RI: $M = 25...31$ %) the agroecosystem of spring wheat, when applying nitrogen fertilizer and inoculating seeds with biologics, functions in resistance mode and the level of exposure is estimated as the maximum permissible. According to the rationing criterion, which is estimated in relation to the ratio of net mineralized nitrogen to reimmobilized (NM: $M = 2.24...2.98$), the agroecosystem of spring wheat is in stress or resistance mode. The use of an endophytic biopreparation based on the V 417 strain leads to the fact that the agroecosystem of spring wheat functions in resistance mode at the maximum permissible level of exposure.

Ключевые слова: изотоп азота, азотное удобрение, биопрепараты, использование азота, яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.), устойчивость агроэкосистемы.

Keywords: nitrogen isotope, nitrogen fertilizer, biological products, nitrogen use, spring wheat (*Triticum aestivum* L.), agroecosystem stability.

Для формирования урожая и регулирования качества производимого зерна яровой пшеницы необходимо внесение азотных минеральных удобрений [1, 2]. Для оптимизации питания растений азотом и улучшения окружающей среды можно использовать специальные препараты, созданные на основе разных штаммов активных бактерий [3, 4], среди которых особую нишу

занимают эндофитные микроорганизмы [5]. Применение биопрепаратов на их основе в результате фиксации азота атмосферы улучшает обеспеченность растений этим элементом, повышает использование почвенных запасов азота, фосфора и калия, увеличивает потребление элементов питания из вносимых минеральных удобрений, микроорганизмы, входящие в состав биопрепаратов,

могут контролировать распространение патогенных микроорганизмов [3, 5]. Препараты, созданные на основе активных штаммов микроорганизмов, применяемые при выращивании различных полевых сельскохозяйственных культур, повышают устойчивость агроэкосистемы к изменяющимся внешним условиям [5, 6].

Эффективность использования растениями азотных удобрений при комплексном применении их с другими средствами химизации и биологизации в агротехнологиях яровой пшеницы может быть оценена по потокам азота в системе почва и растения, включая размеры накопления этого элемента в растениях, или коэффициент использования, закрепление азота в почве, потери (преимущественно газообразные) [7, 8, 9]. В исследованиях со стабильным изотопом ^{15}N доказано, что коэффициент использования азота растениями яровой пшеницы на большинстве типов почв России изменяется от 40 до 45 % от вносимой дозы, 30...40 % его закрепляется в почве и до 20...25 % составляют потери [8, 9]. В последние годы получил развитие новый подход к оценке режимов функционирования агроэкосистем, где их исследуют как функциональные модели взаимодействия компонентов (почва–микроорганизмы–растения–атмосфера), интегрированные потоками азота [10, 11].

Цель исследования – определить устойчивость агроэкосистемы на фоне применения удобрений и биопрепаратов при возделывании яровой пшеницы на темно-серой лесной почве с использованием критериев интегральной оценки ее режимов функционирования и уровней воздействия.

Методика. Работу выполняли в двух закладках микрополевого опыта на темно-серой лесной почве в 2020–2021 гг. Схема эксперимента предполагала изучение следующих вариантов: $\text{N}_{45}\text{P}_{45}\text{K}_{45}$ (фон), фон + Экстрасол на основе штамма Ч-13 (стандарт), фон + эндофитный штамм V 167, фон + эндофитный штамм 417, $\text{N}_{90}\text{P}_{45}\text{K}_{45}$.

Методика закладки и проведения опыта, характеристика удобрений и микробных препаратов, вносимого азотного удобрения, погодные условия в период вегетации яровой пшеницы, методы выполнения анализов почвы и растений, а также статистической обработки результатов были изложены ранее [7]. В опыте высевали среднеспелый сорт Злата яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.). Темно-серая лесная почва перед закладкой опыта характеризовалась следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса (по Тюрину) – 2,9...3,0 %; подвижных форм P_2O_5 и K_2O (по Кирсанову) – соответственно 120...132 и 131...140 мг/кг; pH_{KCl} – 5,9...6,2; Нг (по Каппену) – 1,12...1,24 мг-экв/100 г.

Оценку потоков азота в агроэкосистеме проводили по данным, полученным с применением стабильного изотопа азота ^{15}N , этот метод обеспечивает получение достоверных сведений по потреблению растениями, закреплению в почве и учету потерь азота, в основном в газообразной форме [8, 9]. Кроме того, необходимо знать, сколько минерального азота ($\text{N-NO}_3 + \text{N-NH}_4$) содержится в слое почвы глубиной 0...20 см или пахотном слое после уборки исследуемой культуры.

В качестве азотного удобрения вносили аммиачную селитру в дозах 45 и 90 кг д.в./га, или 4,5 и 9,0 г/м². Для изучения использования растениями азота удобрения применяли меченую (^{15}N) аммиачную селитру ($^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$) с обогащением 47,5 ат. %. Оптимизацию фосфорно-калийного питания растений обеспечивали внесением двойного суперфосфата и хлористого калия в дозах по 45 кг/га действующего вещества. Определяли

эффективность действия двух новых биопрепаратов: первый создан на основе штамма эндофитных бактерий *Bacillus subtilis* V 417, который обладает выраженной фунгицидной активностью против спектра фитопатогенных грибов родов *Fusarium* и *Alternaria*; бактерицидной активностью против фитопатогенных бактерий *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus*, *Erwinia carotovora* subsp. *atroseptica*, *Pseudomonas syringae*, растestimлирующим эффектом по отношению к яровой пшенице. Второй биопрепарат создан на основе штамма эндофитной бактерии *Bacillus amyloliquefaciens* V 167, который обладает фунгицидной активностью против фитопатогенных грибов *Alternaria alternata*, *Fusarium culmorum*, *Fusarium graminearum*, *Fusarium sporotrichioides* и фитостимулирующим эффектом по отношению к яровой пшенице. В качестве стандарта использовали препарат Экстрасол, созданный на основе штамма *Bacillus subtilis* Ч-13, который характеризуется высокой конкурентоспособностью по отношению к другим почвенным микроорганизмам, синтезирует ростовые вещества, улучшает развитие корневых волосков и увеличивает их поглотительную способность. Микроорганизмы, на основе которых созданы все изучаемые препараты, способны фиксировать атмосферный азот. Инокуляцию семян яровой пшеницы проводили в день посева из расчета 600 г на гектарную норму высева. В растительных и почвенных образцах $\text{N}_{\text{общ}}$ определяли с использованием элементного анализатора методом сухого озоления по Дюма, изотопный состав азота – на масс-спектрометре Delta V Advantage.

Режим функционирования агроэкосистемы при возделывании яровой пшеницы в вариантах с азотным удобрением, меченым стабильным изотопом ^{15}N , и инокуляцией семян микробными препаратами оценивали по [10, 11]. Суть метода заключается в определении потоков азота в агроэкосистеме с использованием данных о накоплении этого элемента в растениях в процессе жизнедеятельности, остаточном количестве его минеральных форм в почве, способности растений к повторному использованию азота. Интегральную оценку режимов функционирования агроэкосистемы давали на основе соотношений нетто-минерализованного азота (Н-М) к (ре)иммобилизованному (РИ), выражаемому в условных единицах, а также величины рециркуляции азота во внутрипочвенном цикле (отношение РИ к минерализовавшемуся за вегетацию яровой пшеницы почвенному азоту (М), %).

Результаты и обсуждение. В результате обработки семян яровой пшеницы исследуемыми микробными препаратами в ее биомассе (зерне и побочной продукции) накапливается до 20 % биологического азота [7]. При этом наиболее эффективным оказался препарат на основе эндофитного штамма V 417, при использовании которого величина этого показателя была равна 25 %. Внесение азотных минеральных удобрений под яровую пшеницу на темно-серой лесной почве, как и на других типах почв, стимулирует минерализацию почвенного азота и образование дополнительного «экстра»-азота [8]. При использовании микробных биопрепаратов содержание дополнительного азота в биомассе яровой пшеницы находилось на уровне 8,5 %, тогда как при внесении аммиачной селитры величина этого показателя достигала 11,5...12,1 %. Эффективность применения минеральных азотных удобрений характеризует коэффициент использования азота растениями, который по дозам N_{45} и N_{90} на фоне РК-удобрений составлял соответственно 46 % и 42 %. В варианте с азотным удобрением в количестве N_{45} и обработкой семян яровой пшеницы биопрепарата-

**Использование ^{15}N растениями и параметры функционирования агроэкосистемы
при возделывании яровой пшеницы (среднее за 2020–2021 гг.)**

Показатель	Вариант				
	$\text{N}_{45}\text{P}_{45}\text{K}_{45}$ (фон – Ф)	Ф + Экстра- сол на основе штамма Ч-13 (стандарт)	Ф + эндофит- ный штамм V 167	Ф + эндофит- ный штамм V 417	$\text{N}_{90}\text{P}_{45}\text{K}_{45}$
Доза внесения ^{15}N , г/м ²	4,5	4,5	4,5	4,5	9,0
Накопление общего азота в урожае, г/м ² (НСР ₀₅ 0,80)	13,63±1,02	15,01±1,09	15,42±1,27	15,17±0,90	15,72±0,88
Вынос ^{15}N урожаем, г/м ²	2,06±0,02	2,29±0,05	2,40±0,03	2,34±0,02	3,77±0,05
Закрепление ^{15}N в 0...20 см слое почвы, г/м ²	1,45±0,02	1,45±0,05	1,39±0,03	1,31±0,03	3,12±0,01
Потери ^{15}N удобрения, г/м ²	0,99±0,01	0,76±0,01	0,72±0,01	0,85±0,02	2,16±1,02
Остаточный минеральный азот в почве после учета урожа, г/м ²	1,77±0,35	1,30±0,21	1,39±0,20	1,34±0,10	1,81±0,33
Вынос яровой пшеницей азота из почвы, г/м ²	11,57	12,72	13,02	12,83	11,95
Иммобилизация (И) N, г/м ²	8,14	8,05	7,54	7,18	9,89
Газообразные потери, г/м ²	9,61	4,02	3,50	7,26	11,25
Минерализация (М), г/м ²	31,10	26,09	25,45	28,62	34,90
Нетто-минерализация (Н-М), г/м ²	22,95	18,04	17,91	21,43	25,01
Реиммобилизация (РИ), г/м ²	5,14	8,05	7,54	7,18	9,89
Критерии нормирования РИ:М, %	26	31	30	25	28
Н-М:РИ, ед.	2,82	2,24	2,38	2,98	2,53

ми коэффициент усвоения изотопа ^{15}N изменялся в диапазоне от 51 % до 53 % от внесенной дозы.

При использовании меченого ^{15}N азотного удобрения в почве аккумулировалось от 33 % до 36 % от внесенного количества, а если семена яровой пшеницы обрабатывали специальным препаратом, в почве оставалось только 30 % удобрения, потому что растения использовали больше азота на формирование биомассы.

Потери азота в опыте составили 33...36 % от внесенной дозы. При выращивании яровой пшеницы с использованием семян, инокулированных изучаемыми биопрепаратами, они снижались в 2 раза – до 13...18 %. Максимальное в опыте поглощение яровой пшеницей азота из удобрения (42 %) отмечено в варианте с дозой N_{90} , его фиксация в почве при этом была равна 36 %, потери – 23 % от внесенного количества.

Накопление общего азота в зерне и соломе яровой пшеницы в нашем опыте при применении микробных препаратов возрастало в результате увеличения массы зерна и побочной продукции в 1,2 раза – с 13,6 до 15,7 г/м² (см. табл.). Благодаря инокуляции семян и увеличению дозы аммиачной селитры до N_{90} содержание общего азота в растениях повышалось в 1,10...1,15 раза. Применение изучаемых микробных препаратов и внесение аммиачной селитры в дозе N_{90} увеличивало содержание меченого азота удобрения в биомассе яровой пшеницы, включающей зерно и солому, в 1,11...1,82 раза, по отношению к фону $\text{N}_{45}\text{P}_{45}\text{K}_{45}$.

В ходе эксперимента установлено, что увеличение дозы аммиачной селитры сопровождалось повышением неучтенных потерь азота минерального удобрения из почвы. Использование биопрепаратов, содержащих штаммы Ч-13 и V 167, для обработки семян достоверно снижало их на 11...27 %, по сравнению с другими вариантами эксперимента. Максимальное остаточное количество минерального азота в почве после сбора урожая (1,77 и 1,81 г/м²) выявлено в вариантах с применением аммиачной селитры без биопрепаратов.

Инокуляция семян яровой пшеницы биопрепаратами сопровождалась тенденцией к снижению остаточного количества минерального азота в темно-серой лесной почве на 21...27 %, по сравнению с применением $\text{N}_{45}\text{P}_{45}\text{K}_{45}$, что свидетельствует о лучшем его использовании растениями на формирование биомассы [7].

Накопление ^{15}N в биомассе яровой пшеницы имело явную тенденцию к увеличению при использовании эндофитных биопрепаратов, иммобилизация этого элемента в почве снижалась, более высокой она была при внесении

дозы N_{90} . Суммарное содержание азота в минеральной форме, которое включает в себя азот, внесенный в виде минерального удобрения, азот, оставшийся в почве после выращивания культуры, а также азот удобрения, который был иммобилизован и закреплен в темно-серой лесной почве, варьировало от 25,4 до 34,9 г/м². При внесении N_{90} отмечено максимальное в опыте количество минерализованного азота, в варианте с N_{45} величина этого показателя в почве была ниже, а при инокуляции семян биопрепаратами содержание минерализованного азота имело тенденцию к снижению и составляло 25,4...28,6 г/м². Все это свидетельствует о большем его использовании растениями на формирование биомассы [8]. Количество нетто-минерализованного азота, включающего N аммиачной селитры, N-остаточный минеральный и N-закрепленный в почве, изменялось от 17,9 до 25,0 г/м². Инокуляция семян изучаемыми микробными препаратами приводила к его снижению до 18,0...21,4 г/м², при этом более значимым было действие биопрепаратов, изготовленных с использованием штаммов Ч-13 и V 167.

В ходе эксперимента установлено, что соотношение между количеством (ре)иммобилизованного азота (РИ) и минерализовавшегося почвенного азота (М) варьировало в диапазоне от 25 % до 31 %, что характеризует уровень воздействия применяемых удобрений и биопрепаратов на агроэкосистему яровой пшеницы как допустимый и предельный. При использовании азотного удобрения в дозах N_{45} и N_{90} агроэкосистема яровой пшеницы функционирует в режиме резистентности, при этом уровень воздействия на нее оценивается как предельно допустимый. Соотношение РИ: М при использовании стандартного биопрепарата Ч-13 и эндофитного V 167 повышается до 30...31 %, что характеризует режим функционирования агроэкосистемы как резистентность, а уровень воздействия – как предельно допустимый.

По соотношению нетто-минерализованного (Н-М) азота к реиммобилизованному (РИ), изменявшемуся по вариантам опыта от 2,24 до 2,98 ед., уровень воздействия на агроэкосистему яровой пшеницы на темно-серой лесной почве оценивается как предельно допустимый, при внесении аммиачной селитры в дозе N_{45} величина этого показателя составляет 2,82, N_{90} – 2,53. Применение биопрепаратов на основе штаммов Ч-13, V 167 и V 417 поддерживает состояние агроэкосистемы в режиме функционирования, оцениваемом как резистентность. Уровень воздействия на агроэкосистему при этом считается минимальным и не выходит за пределы допустимого.

Выводы. В результате исследований с использованием стабильного изотопа азота ^{15}N установлено, что формирование массы зерна и соответствующего ей количества соломы яровой пшеницы на одну пятую от общего потребления обеспечивает биологический азот, поступающий в результате ассоциативной азотфиксации. Наибольшее его количество, соответствующее $\frac{1}{4}$ общего накопления в растениях, отмечено при инокуляции семян яровой пшеницы эндофитным штаммом V 417. При внесении азотного удобрения в количестве N_{45} наблюдали повышение урожайности яровой пшеницы благодаря этому источнику на 15 %, а при удвоении дозы доля ^{15}N удобрений возрастает до 24 %. Применение под яровую пшеницу аммиачной селитры в результате увеличения минерализации почвенного азота повышает долю «экстра-азота» в урожае до 11,5...12,1 %. При инокуляции семян биопрепаратами, величина этого показателя снижается до 8,5 %.

Коэффициент использования ^{15}N растениями при внесении N_{45} составляет 46 %, а на фоне применения биопрепаратов возрастает до 51...53 %. В темно-серой лесной почве закрепляется 32 % ^{15}N от внесенного с дозой N_{45} , на фоне биопрепаратов величина этого показателя снижается до 29 %. Неучтенные газообразные потери ^{15}N в агроэкосистеме яровой пшеницы на темно-серой лесной почве достигают 33...36 % от внесенной дозы минеральных удобрений, микроорганизмы, входящие в состав биопрепаратов, уменьшают их в 2 раза. После уборки яровой пшеницы в темно-серой лесной почве при использовании биопрепаратов обнаружено меньшее количество минерального азота, по сравнению с вариантами с внесением азотного удобрения в обеих дозах, что свидетельствует о более эффективном использовании его растениями. Состояние режима функционирования агроэкосистемы яровой пшеницы, оцениваемое по соотношению РИ: М (%) и Н-М: РИ при внесении азотного удобрения в форме аммиачной селитры и инокуляции семян биопрепаратами, характеризуется как резистентность, а уровень воздействия на агроэкосистему при этом считается минимальным и не выходит за пределы допустимого.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств гранта РНФ № 22-26-00105. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство этим конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Кирюшин В. И. Научно-инновационное обеспечение приоритетов развития сельского хозяйства // Почвоведение. 2019. Т. 33. № 3. С. 5–10. doi: 10.24411/0235-2451-2019-10301.
2. Шафран С. А. Баланс азота в земледелии России и его регулирование в современных условиях // Агрохимия. 2020. № 6. С. 14–21. doi: 10.31857/S0002188120060113.
3. Шабаетов В. П. Отзывчивость растений на применение азотфиксирующих бактерий в различных почвенных условиях // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 4. С. 51–54. doi: 10.31857/S0002188121090106.
4. Алферов А. А., Чернова Л. С., Кожемяков А. П. Эффективность применения биопрепарата на яровой пшенице в Европейской части России на разных фонах минерального питания // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 6. С. 17–21.
5. Эндофитные бактерии – основа комплексных микробных препаратов для сельского и лесного хозяйства / В. К. Чеботарь, А. В. Щербаков, С. Н. Масленникова и др. // Агрохимия. 2016. № 11. С. 65–70.
6. Здоровая почва – условие устойчивости и развития агро- и социосфер (проблемно-аналитический обзор) / М. С. Соколов, В. М. Семенов, Ю. Я. Спиридонов и др. // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2020. № 1. С. 12–21. doi: 10.31857/S0002332920010142.
7. Использование яровой пшеницей азота удобрений при инокуляции семян биопрепаратами / А. А. Завалин, Дж. Ньямбосе, Л. С. Чернова и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 6. С. 9–13. doi: 10.31857/S2500262722060023.
8. Кореньков Д. А. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений. М.: Агроконсалт, 1999. 296 с.
9. Завалин А. А., Соколов О. А., Шмырева Н. Я. Развитие агрохимических исследований с изотопом ^{15}N в России // Плодородие. 2021. № 3. С. 56–56. doi: 10.256880/S19948603.2021.120.10.
10. Помазкина Л. В. Новый интегральный подход к оценке режимов функционирования агроэкосистем и экологическому нормированию антропогенной нагрузки, включая техногенное загрязнение почв // Успехи современной биологии. 2004. Том. 124. № 1. С. 66–76.
11. Сравнительная оценка состояния агроэкосистем на разных типах почв Прибайкалья, загрязненных фторидами алюминиевого производства / Л. В. Помазкина, Л. Г. Котова, Л. Г. Зорина и др. // Почвоведение. 2008. № 6. С. 717–725.

Поступила в редакцию 14.08.2024

После доработки 03.09.2024

Принята к публикации 01.10.2024

ПОКАЗАТЕЛИ ПОЧВЕННОГО ПЛОДОРОДИЯ ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ УДОБРЕНИЙ

© 2024 г. **С. И. Тютюнов**, доктор сельскохозяйственных наук, академик РАН, **Е. В. Навольнева**, кандидат сельскохозяйственных наук, **К. В. Дорохин**, **И. В. Логвинов**, **А. С. Пойменов**

Белгородский федеральный аграрный научный центр Российской академии наук,
308001, Белгород, ул. Октябрьская, 58
E-mail: NavEkaVika@gmail.com

Исследования проводили с целью изучения действия и последствий различных систем удобрений и обработки почвы на основные показатели плодородия чернозема типичного. Работу выполняли в длительном полевом опыте в зернопропашном севообороте в условиях Белгородской области. Почва опытного участка – чернозем типичный среднемогучий малогумусный тяжелосуглинистый на лессовидном суглинке. Схема опыта предусматривала изучение действия минеральных удобрений в дозах $N_{64}P_{64}K_{64}$ и $N_{128}P_{128}K_{128}$; органических удобрений с насыщенностью севооборота 8 и 16 т/га севооборотной площади навоза крупного рогатого скота и комбинаций органических и минеральных удобрений. Удобрения применяли на фоне трех способов основной обработки почвы: вспашка, безотвальная и минимальная обработка. За шесть ротаций пятипольного севооборота, без применения удобрений, потери гумуса составили 0,06...0,27%, при фактическом содержании 4,96...5,15%, содержание подвижного фосфора сократилось на 2,8...9,2 мг/кг до 47,6...51,2 мг/кг, а подвижного калия сохранялось практически на исходном уровне – 108,4...116,2 мг/кг. Наилучшее содержание основных питательных элементов в почве обеспечивает использование органоминеральной системы с внесением минеральных удобрений в дозах $N_{64}P_{64}K_{64}$ или $N_{128}P_{128}K_{128}$ на фоне 8 т/га севооборотной площади навоза. При этом содержание гумуса достигает 5,30...5,64%, подвижного фосфора – 222,6...255,1 мг/кг, подвижного калия – 156,6...173,5 мг/кг. При длительном применении навоза с насыщенностью севооборота 16 т/га содержание гумуса составляло 5,34% (в среднем по способу основной обработки почвы), фосфора и калия – 122,0 и 143,3 мг/кг соответственно.

INDICATORS OF SOIL FERTILITY OF CHERNOZEM TYPICAL AFTER PROLONGED USE OF VARIOUS FERTILIZER SYSTEMS

S. I. Tyutyunov, E. V. Navolneva, K. V. Dorokhin, I. V. Logvinov, A. S. Poimenov

Belgorod Federal Agrarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
308001, Belgorod, ul. Oktyabrskaya, 58
E-mail: NavEkaVika@gmail.com

The research was carried out in order to study the effect and aftereffect of various fertilizer systems on the main indicators of fertility of typical chernozem. The work was carried out in a long-term field experience in the grain crop rotation in the conditions of the Belgorod region. The soil of the experimental site is typical medium-sized low-humus heavy loam chernozem on loess-like loam. The scheme of the experiment provided for the study of the effect of mineral fertilizers, in doses of $N_{64}P_{64}K_{64}$ and $N_{128}P_{128}K_{128}$; organic fertilizers with crop rotation saturation of 8 and 16 t/ha of the crop area (s.p.) and combinations of organic and mineral fertilizers. Three methods of basic tillage were analyzed: plowing, non-tillage and minimal tillage. During six rotations of the five-field crop rotation, without the use of fertilizers, humus losses amounted to 0.06...0.27%, with an actual content of 4.96...5.15%; the content of mobile phosphorus decreased by 2.8...9.2 mg/kg, and was at the level of 47.6...51.2 mg/kg; and mobile potassium remained almost at the same level (108.4...116.2 mg/kg). To obtain the optimal content of the main nutrients in the soil, it is necessary to use an organomineral fertilizer system. In particular: the use of mineral fertilizers in doses of $N_{64}P_{64}K_{64}$ or $N_{128}P_{128}K_{128}$ for a background of 8 t/ha of bovine manure (cattle). At the same time, the humus content in these variants reached the maximum value and amounted to 5.30...5.64%, mobile phosphorus 222.6...255.1 mg/kg and mobile potassium 156.6...173.5 mg/kg. Or long-term use of cattle manure with a crop rotation saturation of 16 t/ha. At this level of fertilization, the humus content was 5.34% (on average according to the method of basic tillage), phosphorus and potassium 122.0 and 143.3 mg/kg, respectively.

Ключевые слова: минеральные и органические удобрения, основная обработка почвы, гумус, подвижный фосфор, подвижный калий, длительный полевой опыт.

Keywords: mineral and organic fertilizers, basic tillage, humus, mobile phosphorus, mobile potassium, long-term field experience.

В условиях интенсификации сельскохозяйственного производства увеличивается нагрузка на ключевой элемент агроэкосистемы – почву. Это создает настоятельную необходимость в обеспечении сохранения и восстановления плодородия почвы, которое служит основой сельскохозяйственного производства, формирования высоких урожаев и обеспечения продовольственной безопасности [1].

Для поддержания и восстановления почвенного плодородия необходим системный подход, который предусматривает использование органических (навоз, компост, сидераты и др.) и минеральных (азотных, фосфорных,

калийных и др.) удобрений, а также эффективную обработку почвы [2, 3].

Следует внимательно относиться к содержанию питательных веществ в формах, доступных для усвоения растениями. Поскольку, например, при нехватке доступного фосфора происходит замедление процессов белкового синтеза, в тканях растений наблюдается увеличение уровня нитратного азота и другие негативные процессы [4]. При этом на черноземах для увеличения содержания доступных форм этого элемента на 1 мг на 100 г почвы требуется внести от 80 до 120 кг/га фосфорных удобрений [5]. В условиях недостатка влаги на черноземе

типичном наибольшее влияние на уровень подвижного фосфора в пахотном слое оказывает поверхностная обработка с использованием дисковых борон [6].

Содержание подвижных форм калия в черноземах значительно снижается в пропашных севооборотах и с ростом глубины обработки почвы [7]. Резкое их уменьшение наблюдается в отсутствии калийсодержащих удобрений, а также может быть связано с погодными условиями [8]. Длительное систематическое применение удобрений способствует обогащению верхнего слоя почвы элементами питания в целом.

Среди агротехнологических приемов, оказывающих значительное влияние на состояние почвы, особое место занимает механическая обработка [9]. Известно, что при уменьшении ее глубины наблюдается рост содержания гумуса, подвижного фосфора и калия в почве [10]. Тем не менее при глубокой вспашке формируется более однородный плодородный слой, в то время как при поверхностной обработке происходит дифференциация пахотного горизонта по содержанию ключевых минеральных элементов, необходимых для питания растений [11]. В связи с этим необходимо дальнейшее изучение изменений агрохимических показателей почвы под влиянием разных способов ее основной обработки.

Долгосрочные полевые эксперименты представляют собой мощный инструментарий для анализа изменений плодородия почвы. Они предоставляют объективные и ценные данные, отражающие варьирование агрохимических и агрофизических показателей почвы, которые характеризуют ее плодородие, под воздействием различных факторов.

Цель исследования – оценить влияние продолжительного использования нескольких систем удобрений и действие разных способов основной обработки почвы на ключевые показатели плодородия типичного чернозема в зернопропашном севообороте для оптимизации агротехнических приемов, способствующих воспроизводству плодородия почвы.

Методика. Работу проводили в юго-западной части Центрально-Черноземного района, в условиях долгосрочного полевого эксперимента, заложенного в 1987 г. в Белгородском районе в Белгородской области. Его полная факториальная схема предусматривает изучение трех типов севооборотов с различной насыщенностью пропашными культурами. В представленной работе рассмотрена часть выборки, которая включает данные полученные в зернопропашном севообороте со следующим чередованием культур: горох – озимая пшеница – сахарная свекла – ячмень – кукуруза на силос. Один из анализируемых факторов (А) – способ основной обработки почвы (вспашка, безотвальная и минимальная обработка); второй (В) – органические и минеральные удобрения в различных дозах и комбинациях. Объект исследования – чернозем типичный среднесиловый малогумусный тяжелосуглинистой разновидности на лессовидном суглинке. Перед закладкой опыта почва пахотного слоя характеризовалась следующими показателями: содержание подвижного фосфора (по Чирикову) – 67...78 мг/кг, подвижного калия (по Чирикову) – 95...112 мг/кг, гумуса (ГОСТ 26213-91) – 5,2...5,3 %.

Органические удобрения вносили в виде навоза крупного рогатого скота, который заделывали под сахарную свеклу в дозах 40 т/га и 80 т/га, что соответствует насыщенности севооборота 8 и 16 т/га севооборотной площади (с.п.). Минеральные удобрения вносили ежегодно, а их дозы зависели от культуры севооборота. Одинарная доза в расчете на 1 га севооборотной площади составляла $N_{64}P_{64}K_{64}$, удвоенная – $N_{128}P_{128}K_{128}$. Кроме

того, рассматривали следующие сочетания доз органических и минеральных удобрений: навоз 8 т/га с.п. + $N_{64}P_{64}K_{64}$; навоз 8 т/га с.п. + $N_{128}P_{128}K_{128}$; навоз 16 т/га с.п. + $N_{64}P_{64}K_{64}$; навоз 16 т/га с.п. + $N_{128}P_{128}K_{128}$. В качестве контроля использовали вариант без удобрений.

Для оценки изменения плодородия чернозема типичного определяли следующие показатели: содержание общего гумуса (по Тюрину, ГОСТ 26213-91); подвижных форм фосфора и калия (по Чирикову в модификации ЦИНАО). Для выявления направленности изменений содержания фосфора и калия был проведен расчет их баланса в 6 ротации севооборота. Пробы почвы отбирали после уборки озимой пшеницы на глубину пахотного слоя.

Результаты и обсуждение. Без применения удобрений за шесть ротаций зернопропашного севооборота происходило снижение содержания гумуса, в сравнении с годом закладки опыта, которое составляло от 0,06 % при минимальной обработке почвы до 0,27 % в варианте со вспашкой (табл. 1).

Использование минеральной системы удобрений к шестой ротации увеличивало содержание гумуса в верхнем слое почвы (0...30 см), в сравнении с вариантом без применения удобрений, до 5,16...5,34 % пропорционально дозам удобрений с наибольшей величиной этого показателя на фоне минимальной обработки почвы. Достоверный рост содержания гумуса составил 0,11...0,22 % ($HCP_{05}=0,06$). Если рассматривать динамику изменения во времени, при минимальной обработке почвы содержание гумуса на фоне внесения минеральных удобрений возросло, по сравнению с годом закладки опыта, на 0,12...0,14 %, а при безотвальной, наоборот, сократилось – на 0,10...0,14 %.

Органические удобрения в течение шести ротаций оказали положительное влияние на содержание гумуса в почве. При этом если от минеральных удобрений максимальный в опыте рост составил 0,22 %, то при внесении органических – 0,35 %, содержание гумуса достигало 5,11...5,45 % с большей величиной этого показателя, как и при использовании минеральных удобрений, на фоне минимальной обработки почвы. Согласно результатам математической обработки влияние органических удобрений и способа основной обработки было статистически достоверным. Анализируя временные изменения, следует отметить, что при вспашке и минимальной обработке почвы на фоне 8 т/га севооборотной площади навоза содержание гумуса увеличивалось соответственно на 0,01 и 0,33 %, при 16 т/га – на 0,11 и 0,23 %, а при проведении безотвальной обработки – снизилось на 0,02...0,43 %.

Результаты анализа совместного воздействия минеральных и органических удобрений свидетельствуют о том, что на фоне 8 т/га севооборотной площади подстилочного навоза содержание гумуса с ростом дозы минеральных удобрений увеличивалось на 0,08...0,32 %, по сравнению с одинарной дозой органических удобрений. Самая высокая величина этого показателя (5,64 %) отмечена при сочетании одинарной дозы органических удобрений и двойной минеральных. В варианте с применением 16 т/га севооборотной площади подстилочного навоза рост содержания гумуса от одинарной дозы минеральных удобрений, по сравнению с использованием только органических, составил 0,02...0,17 %. В сочетании с двойной дозой минеральных удобрений такого эффекта не наблюдали. Временная динамика содержания гумуса свидетельствует о положительном действии органоминеральной системы удобрения. Например, разница с годом закладки опыта при использовании максимальных в опыте доз удобрений достигала 0,30 %.

Табл. 1. Влияние агротехнических приемов на содержание гумуса в пахотном слое почвы, %

Уровень удобрения	Вспашка		Безотвальная обработка		Минимальная обработка		Баланс (±), т/га
	год заклад- ки ¹	6 рота- ция	год заклад- ки	6 рота- ция	год заклад- ки	6 рота- ция	
Без удобрений	5,23	4,96	5,22	5,05	5,21	5,15	-0,32
$N_{64}P_{64}K_{64}$	5,18	5,09	5,26	5,12	5,16	5,30	-0,52
$N_{128}P_{128}K_{128}$	5,13	5,18	5,26	5,16	5,22	5,34	-0,66
Навоз, 8 т/га	5,21	5,22	5,13	5,11	4,99	5,32	1,17
Навоз, 8 т/га + $N_{64}P_{64}K_{64}$	5,20	5,33	5,17	5,22	5,20	5,54	0,98
Навоз, 8 т/га + $N_{128}P_{128}K_{128}$	5,06	5,30	5,22	5,36	5,02	5,64	0,85
Навоз, 16 т/га	5,20	5,31	5,68	5,25	5,22	5,45	2,94
Навоз, 16 т/га + $N_{64}P_{64}K_{64}$	5,12	5,33	5,24	5,42	5,27	5,53	2,86
Навоз, 16 т/га + $N_{128}P_{128}K_{128}$	5,22	5,33	5,13	5,30	5,15	5,45	2,84
$HCP_{05} = 0,06$							

¹1987 г.

Такое увеличение можно объяснить ростом количества побочной продукции с повышением урожая при высоких дозах удобрений.

Изменение баланса гумуса во времени носило схожую направленность с его фактическим содержанием. Без применения удобрений и с использованием только минеральных форм он был отрицательным. Применение органических удобрений отдельно и в сочетании с минеральными обеспечивало бездефицитный баланс гумуса. Например, при использовании навоза КРС в дозе 16 т/га в шестой ротации он составил 2,94 т/га, что на 3,26 т/га больше, чем на фоне естественного плодородия почвы.

В нашем эксперименте основным источником пополнения фосфора в почве были удобрения. При внесении только их минеральных форм в дозах P_{64} и P_{128} баланс этого элемента был бездефицитным – соответственно 15,9 и 71,9 кг/га. На фоне естественного плодородия почвы и при использовании только органических удобрений формировался отрицательный баланс фосфора от 1,8 до 31,2 кг/га. В вариантах с совместным внесением минеральных и органических удобрений вынос фосфора значительно возрастал, однако баланс этого элемента оставался положительным и при максимальном уровне удобрённости составил 106,5 кг/га.

Балансовые методы расчета, основанные на учете прихода и расхода питательных элементов, дают только приблизительную картину, поскольку не учитывают такие факторы, как потери в результате фиксации в почве, вымывания и др. или, наоборот, мобилизацию из труднодоступных форм. Поэтому более точным и объективным критерием оценки эффективности системы удобрения служит фактическое изменение обеспеченности почвы минеральным элементом за ротацию севооборота.

Содержание фосфора в год закладки опыта варьировало в пределах 46,7...62,7 мг/кг (табл. 2), что для черноземов типичных находится на границе между группами с низкой и средней обеспеченностью. Систематическое внесение органических и минеральных удобрений способствовало росту величины этого показателя. Оптимальный уровень подвижного фосфора в почве был достигнут при использовании 16 т/га севооборотной площади навоза крупного рогатого скота – от 100,8 до 149,3 мг/кг в зависимости от основной обработки почвы. Применение минеральных удобрений в дозе $N_{64}P_{64}K_{64}$ или 16 т/га навоза к шестой ротации увеличивало обеспеченность почвы подвижным фосфором до повышенной (101...150 мг/кг). Дальнейшее увеличение содержания этого элемента до 157,5...175,4 мг/кг

и переход почвы в категорию высокообеспеченных (151...200 мг/кг) наблюдали при совместном внесении одинарных доз органических и минеральных удобрений. Использование 8 т/га навоза в сочетании с минеральными в дозе $N_{128}P_{128}K_{128}$ увеличило содержание подвижного фосфора в почве до 255,1 мг/кг, 16 т/га навоза – до 337,7 мг/кг, что соответствует очень высокой обеспеченности. Наибольшую величину этого показателя отмечали при совместном применении двойных доз обоих видов удобрений по вспашке.

Анализируя действие фактора А (обработка почвы), можно отметить, что вспашка способствовала увеличению содержания подвижного фосфора. Такое воздействие наблюдали на всех уровнях удобрений, за исключением варианта с внесением только $N_{64}P_{64}K_{64}$. Например, при использовании только минеральных удобрений в дозе $N_{128}P_{128}K_{128}$ на фоне вспашки содержание фосфора было больше, чем при проведении безотвальной и минимальной обработки, соответственно на 54,4 и на 24,6 мг/кг, при внесении 16 т/га навоза – на 33,5 и 48,5 мг/кг, а в варианте с удвоенными дозами – на 42,2 и 48,2 мг/кг. Это можно объяснить более активным процессом минерализации, который происходит при отвальной обработке почвы.

Долгое время считали, что накопление подвижного фосфора в почве оказывает исключительно положительное воздействие, способствуя росту и развитию растений. Однако результаты последних исследований заставили пересмотреть этот взгляд, особенно в контексте интенсивного земледелия. Оказалось, что чрезмерное накопление фосфора может привести к негативным последствиям для почвы и растительности. Если содержание подвижного фосфора в почве превышает определенный порог, у растений возникает так называемая депрессия фитоценоза, которая сопровождается замедленным ростом, уменьшением биомассы и снижением продуктивности. Критическим уровнем считается концентрация подвижного фосфора в верхнем слое почвы, превышающая 400 мг/кг [12]. В нашем опыте в результате продолжительного и регулярного применения удобрений содержание фосфора в почве на глубине

Содержание подвижного калия при закладке полевого опыта, согласно градиции обеспеченности почв этим элементом, было повышенным и составляло 91,7...108,4 мг/кг. За 34 года исследований без внесения удобрений оно сохранялось на исходном уровне (110,7...116,2 мг/кг). Использование минеральных удобрений независимо от дозы способствовало накоплению калия и росту его содержание в почве, по сравнению с вариантом без удобрений, на 10,0...47,9 мг/кг. Причем если при безотвальной рыхлении почвы это увеличение носило характер тенденции, то на фоне вспашки и минимальной обработки такой рост был достоверным ($HCP_{05} = 11,04$ мг/кг). Внесение навоза также повышало содержание подвижного калия в пахотном слое. При этом его применение в дозе 8 т/га севооборотной площади при всех рассматриваемых обработках почвы обеспечивало тенденцию к росту, а в дозе 16 т/га – достоверное увеличение на 21,9...40,8 мг/кг.

Дальнейшее повышение количества подвижного калия в почве происходило при совместном внесении органических и минеральных удобрений. Использование минеральных удобрений на фоне одинарной дозы органических увеличивало содержание калия, по сравнению с вариантом без применения удобрений, на 27,7...61,2 мг/кг до 156,6...173,5 мг/кг. Наибольшая в опыте величина этого показателя отмечена при орга-

Табл. 2. Влияние агротехнических приемов на содержание подвижного фосфора и калия в пахотном слое почвы, мг/кг

Уровень удобренности	Вспашка		Безотвальная обработка		Минимальная обработка		Баланс, за ротацию (±), кг/га
	год закладки ¹	6 ротация	год закладки	6 ротация	год закладки	6 ротация	
Содержание подвижного фосфора							
Без удобрений	56,8	47,6	54,0	51,2	52,1	49,0	-31,2
N ₆₄ P ₆₄ K ₆₄	54,8	123,8	54,3	141,9	53,2	148,1	15,9
N ₁₂₈ P ₁₂₈ K ₁₂₈	56,1	204,8	51,3	150,4	52,7	180,2	71,9
Навоз, 8 т/га	53,6	113,2	53,0	67,8	47,1	75,7	-17,2
Навоз, 8 т/га + N ₆₄ P ₆₄ K ₆₄	46,7	175,4	50,0	157,5	62,7	168,3	33,5
Навоз, 8 т/га + N ₁₂₈ P ₁₂₈ K ₁₂₈	50,5	255,1	52,2	232,0	55,7	222,6	88,9
Навоз, 16 т/га	50,0	149,3	52,3	115,8	53,1	100,8	-1,75
Навоз, 16 т/га + N ₆₄ P ₆₄ K ₆₄	56,5	253,6	53,8	220,8	57,0	186,9	49,2
Навоз, 16 т/га + N ₁₂₈ P ₁₂₈ K ₁₂₈	50,6	337,7	61,7	295,5	52,4	289,5	106,5
НСР ₀₅ фактора А (обработка)=14,24; фактор В (удобрения)=14,20							
Содержание подвижного калия							
Без удобрений	100,4	112,3	97,5	110,7	108,4	116,2	-73,0
N ₆₄ P ₆₄ K ₆₄	93,5	151,1	97,4	133,4	101,7	131,4	-47,3
N ₁₂₈ P ₁₂₈ K ₁₂₈	94,0	160,2	104,5	120,7	92,5	156,2	-3,0
Навоз, 8 т/га	96,7	126,8	91,7	112,0	103,7	120,0	-67,1
Навоз, 8 т/га + N ₆₄ P ₆₄ K ₆₄	104,4	149,0	100,4	138,4	97,0	152,6	-33,8
Навоз, 8 т/га + N ₁₂₈ P ₁₂₈ K ₁₂₈	92,5	173,5	100,2	159,8	103,0	156,6	9,9
Навоз, 16 т/га	92,7	153,1	101,7	132,6	99,4	144,1	-57,9
Навоз, 16 т/га + N ₆₄ P ₆₄ K ₆₄	101,0	192,7	101,0	163,4	99,0	216,6	-23,9
Навоз, 16 т/га + N ₁₂₈ P ₁₂₈ K ₁₂₈	97,0	229,0	99,0	194,8	96,0	239,9	24,0
НСР ₀₅ : фактор А (обработка)=11,00; фактор В (удобрения)=11,04							

¹для почвенных показателей 1987 г.

номинеральной системе удобрений с двойными дозами – 239,9 мг/кг, что на 123,7 мг/кг больше, чем в варианте без удобрений, и на 143,9 мг/кг, по сравнению с годом закладки опыта.

Рассматривая влияние способа обработки почвы, следует отметить, что при отдельном применении разных видов удобрений выявлено положительное воздействие глубокой обработки почвы с оборотом пласта на накопление подвижного калия в почве. Разница с другими способами обработки при органической системе удобрений достигала 9,0...20,5 мг/кг, при минеральной – 4,0...39,7 мг/кг.

Баланс калия в шестой ротации севооборота был отрицательным практически во всех вариантах, его дефицит составлял от 3,0 кг/га (при внесении N₁₂₈P₁₂₈K₁₂₈) до 73,0 кг/га (без удобрений). Исключением были варианты с совместным внесением органических удобрений с двойной дозой минеральных, на фоне которых положительный баланс калия варьировал в диапазоне 9,9...24,0 кг/га. Отсутствие снижения содержания подвижного калия в почве во всех вариантах опыта, вероятно, обусловлено пополнением его запасов из обменных форм.

Выводы. За 34 года проведения полевого опыта содержание основных макроэлементов в почве достигло высокого и очень высокого уровня. Наилучшие условия для сохранения и воспроизводства плодородия чернозема типичного складывались при использовании органо-минеральной системы удобрений, предусматривающей внесение одной или двух доз минеральных удобрений на фоне 8 т/га севооборотной площади навоза КРС. При этом содержание гумуса достигало максимального в опыте уровня 5,64 %, а обеспеченность основными питательными элементами находилась в пределах оптимальных показателей для чернозема типичного. Кроме того, высокие показатели плодородия почвы отмечали в вариантах с внесением навоза КРС в количестве 16 т/га севооборотной площади.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета института. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Кирушин В. И. Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1130–1139.
2. Влияние систем удобрений на показатели плодородия дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Предуралья / В. Р. Ямалдинова, Н. Е. Завьялова, Д. С. Фомин и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2020. № 1. С. 29–32. doi: 10.31857/S2500-2627-2020-1-29-32.
3. Modeling the impact of climate and fertilizer on barley production / B. A. Taye, F. F. Asfaw, B. G. Yirsaw, et al. // American Journal of Biological and Environmental Statistics. 2021. № 7 (2). P. 44–51.
4. Чекмарев П. А., Лукин С. В. Мониторинг содержания подвижных форм фосфора и калия в пахотных почвах Белгородской области // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 2. С. 5–9.
5. Акулов П. Г., Азаров Б. Ф., Соловченко В. Д. Основные свойства черноземов Центрально-Черноземной России // Плодородие черноземов России. М.: ВИУА, 1998. С. 340–363.
6. Хусайнов Х. А., Тунтаев А. В., Елмурзаева Ф. Д. Содержание подвижного фосфора в черноземе типичном при различных приемах основной обработки и применения средств химизации и биологизации // Плодородие. 2023. № 1. С. 22–25.
7. Тютюнов С. И. Влияние основных факторов системы воспроизводства плодородия почв на содержание подвижного калия в черноземе типичном юго-западной части ЦЧР / С. И. Тютюнов, Е. В. Навольнева, В. В. Навальнев и др. // Земледелие. 2023. № 2. С. 8–12. doi: 10.24412/0044-3913-2023-2-8-12.
8. Сокаев К. Е., Бестаев В. В. Мониторинг плодородия основных типов и подтипов почв республики Север-

- ная Осетия – Алания на реперных участках // Плодородие. 2013. № 6. С. 31–33.
9. Влияние различных систем обработки почвы и удобрения на плодородие почвы и урожайность озимой пшеницы / А. А. Романенко, В. М. Кильдюшкин, А. Г. Солдатенко и др. // Достижения науки и техники АПК. 2016. № 3. С. 26–29.
10. Дубовик Д. В., Дубовик Е. В., Морозов А. Н. Влияние способа основной обработки на плодородие почвы при возделывании ярового ячменя // Агрохимический вестник. 2023. № 3. С. 30–35.
11. Пегова Н. А., Владыкина Н. И. Изменение показателей плодородия и продуктивности дерново-подзолистой почвы при разных системах обработки // Достижения науки и техники АПК. 2016. № 6. С. 72–76.
12. Изучение фосфорных удобрений и фосфатного состояния почв / В. И. Титова, Л. Д. Варламова, Е. В. Дабахова и др. // Агрохимический вестник. 2011. № 2. С. 3–6.

Поступила в редакцию 25.08.2024

После доработки 08.10.2024

Принята к публикации 22.10.2024

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ КАРКАСНЫМИ СОРБЕНТАМИ НА ОСНОВЕ БЕНЗОЛ-1,3,5-ТРИКАРБОКСИЛАТОВ (МВТС) И БЕНЗОЛ-1,4-ДИКАРБОКСИЛАТОВ (МВДС) РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

© 2024 г. А. Г. Муштаков¹, Е. Б. Маркова¹, кандидат химических наук, А. В. Курочкин¹, Н. А. Анистратов¹, Ю. М. Зайцева¹, Е. А. Гусева¹, Л. Г. Скворцова¹, А. Г. Чередниченко¹, доктор химических наук, А. П. Глинушкин³, доктор сельскохозяйственных наук

¹Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

²Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники (МИРЭА) –
Российский Технологический Университет,
119454, Москва, просп. Вернадского, 78

³Институт органической химии имени Н.Д. Зелинского,
119991, Москва, Ленинский просп., 47
E-mail: cherednichenko-ag@rudn.ru

Загрязнение почв и водных источников тяжелыми металлами приводит к негативным последствиям для окружающей среды, связанным с нарушением экосистемного равновесия, нанесением вреда для здоровья живых организмов и человека. Для решения этой проблемы были синтезированы металлоорганические каркасные сорбенты, способные эффективно извлекать ионы тяжелых металлов из водных растворов. Изучали закономерности процесса адсорбции ионов кадмия, свинца, меди, кобальта и никеля с использованием синтезированных каркасных сорбентов на основе бензол-1,3,5-трикарбоксилатов (МВТС) и бензол-1,4-дикарбоксилатов (МВДС). Проведенный идентификационный анализ по дифрактограммам порошков CoBTC и NiBTC показал наличие структур $[\text{Co}_3(\text{BTC})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$ и $[\text{Ni}_3(\text{BTC})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$. В отличие от NiBTC дикарбоксилат NiBDC кристаллизуется в триклинной сингонии (пространственная группа $P\bar{1}$, $Z = 1$) и соответствует кристаллической структуре $[\text{Ni}_3(\text{OH})_2(\text{BDC})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$, образец соединения CuBTC кристаллизуется в кубической сингонии с пространственной группой $Fm\bar{3}m$ ($Z = 16$) и соответствует кристаллической структуре $[\text{Cu}_3(\text{BTC})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$, а соединение CuBDC имеет структуру, принадлежащую к моноклинной сингонии. Результаты анализа изотерм низкотемпературной адсорбции азота с использованием синтезированных MOFs позволили определить важные текстурные характеристики сорбентов. Величина удельной поверхности у синтезированных сорбентов, рассчитанная методом Бруннауэра – Эммета – Теллера (БЭТ), варьирует в широких пределах. Для соединений CoBTC и NiBTC она составила соответственно 276,0 и 9,0 м²/г. Отмеченные различия связаны с наличием большого количества микропор у сорбента CoBTC. В большинстве случаев кинетические закономерности процессов адсорбции ионов тяжелых металлов можно описать уравнением псевдвторого порядка. Единственный пример протекания процесса, согласно кинетическому уравнению псевдопервого порядка, – адсорбция ионов меди на сорбенте NiBDC. Ионы кобальта, никеля и меди лучше поглощаются сорбентами, содержащими соответствующие одноименные ионы согласно правилу Панета – Фаянса. Найденная линейная зависимость между сорбционной емкостью и логарифмом отношения радиуса ионов к их электроотрицательности подразумевает, что механизм адсорбции ионов металлов на MOFs определяется физико-химическими свойствами самих ионов. Разработанные металлоорганические каркасные соединения могут быть эффективно использованы в технологиях очистки водных ресурсов от токсичных ионов тяжелых металлов.

EXTRACTION OF HEAVY METAL IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY FRAME SORBENTS BASED ON BENZENE-1,3,5-TRICARBOXYLATE (MBTC) AND BENZENE-1,4-DICARBOXYLATES (MBDC) OF VARIOUS METALS

A. G. Mushtakov¹, E. B. Markova¹, A. V. Kurochkin¹, N. A. Anistratov¹,
Yu. M. Zaitsev¹, E. A. Guseva¹, L. G. Skvortsova¹, A. G. Cherednichenko¹, A. P. Glinushkin³

¹Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia,
117198, Moscow, ul. Miklukho-Maklaya, 6

²IMIREA – Russian Technological University,
119454, Moscow, prosp. Vernadskogo, 78

³N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry,
47 Leninsky Prospekt, Moscow, 119991
119991, Moscow, Leninskii prosp., 47

Pollution of soils and water sources with heavy metals leads to negative consequences for the environment associated with disruption of ecosystem balance, harm to the health of living organisms and humans. To solve this problem, organometallic frame sorbents capable of efficiently extracting heavy metal ions from aqueous solutions have been synthesized. During the conducted research, the regularities of the adsorption of cadmium, lead, copper, cobalt and nickel ions were studied using synthesized frame sorbents based on benzene-1,3,5-tricarboxylates (MBTC) and benzene-1,4-dicarboxylates (MBDC). The identification analysis performed on diffractograms of CoBTC and NiBTC powders showed the presence of structures $[\text{Co}_3(\text{BTC})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$ and $[\text{Ni}_3(\text{BTC})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$. Unlike NiBTC, NiBDC dicarboxylate crystallizes in triclinic syngony (spatial group $P\bar{1}$, $Z = 1$) and corresponds to the crystal structure $[\text{Ni}_3(\text{OH})_2(\text{BDC})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$, the sample of the CuBTC compound crystallizes in cubic symmetry with the space group $Fm\bar{3}m$ ($Z = 16$) and corresponds to the crystal structure $[\text{Cu}_3(\text{BTC})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$, and the CuBDC compound has a structure belonging to the monoclinic symmetry. The results of the analysis of isotherms of low-temperature nitrogen adsorption using synthesized MOFs made it possible

to determine important textural characteristics of sorbents. It was noted that a strong adsorbate-adsorbent interaction is realized for CoBTC in the micropore region. It is shown that the specific surface area of synthesized sorbents, calculated by the Brunnauer-Emmett-Teller (BET) method, varies widely. Thus, for CoBTC and NiBTC compounds, it was 276.0 and 9.0 m²/g, respectively. The noted differences are due to the presence of a large number of micropores in the sorbent CoBTC. In most cases, the kinetic patterns of the adsorption of heavy metal ions can be described by a pseudo-second-order equation. The only example of the process proceeding according to the kinetic equation of the pseudo-first order is the adsorption of copper ions on the NiBDC sorbent. It is noted that cobalt, nickel and copper ions are better absorbed by sorbents containing the corresponding ions of the same name according to the Paneta-Faience rule. The linear relationship found between the sorption capacity and the logarithm of the ratio of the radius of ions to their electronegativity implies that the mechanism of adsorption of metal ions on MOFs is determined by the physicochemical properties of the ions themselves. The developed organometallic frame compounds can be effectively used in technologies for purification of water resources from toxic heavy metal ions.

Ключевые слова: металлоорганические каркасные соединения, извлечение тяжелых металлов, очистка водных источников, природоохранные технологии, процессы сорбции.

Keywords: organometallic skeleton compounds, extraction of heavy metals, purification of water sources, environmental technologies, sorption processes.

Загрязнение почвы и водных ресурсов представляет серьезную угрозу для экологии и здоровья человека. Негативные последствия могут возникать из-за чрезмерного применения удобрений, использования опасных промышленных технологий в производственной деятельности, попадания ядовитых отходов в окружающую среду [1]. Глобальной мировой проблемой стало загрязнение почвы и водных источников ионами тяжелых металлов Co²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Pb²⁺ [2, 3].

Наиболее распространенные тяжелые металлы, которые встречаются в почве и водных источниках, – свинец, ртуть, кадмий, хром, медь, никель, кобальт, мышьяк, сурьма и др. Их распространение внутри экосистемы представляет большую угрозу для здоровья человека, поскольку тяжелые металлы могут запускать хронические дегенеративные изменения в его организме [4], оказывая негативное влияние на нервную систему, печень и почки, проявляя тератогенное и канцерогенное действие [5]. На молекулярно-генетическом уровне тяжелые металлы посредством образования свободных радикалов могут повреждать комплементарную цепь спирали ДНК или провоцировать истощение сульфгидрилов белков (например, глутатиона) [6].

При поступлении тяжелых металлов в грунтовые воды они могут мигрировать в экосистемы открытых водных источников, вызывая негативные последствия для биоты. Например, эти токсичные элементы способны провоцировать различные патофизиологические изменения у фитопланктонных организмов, включая нарушение метаболических процессов, замедление роста, изменение репродуктивных функций и даже их смерть. Уменьшение численности фитопланктона может привести к нарушению баланса в экосистеме, ухудшению качества воды и созданию условий для негативного изменения кислородного режима в водоемах. Таким образом, загрязнение водных источников тяжелыми металлами представляет собой глобальную угрозу для биосферы планеты, инициирует каскад негативных изменений в существующих экосистемах, влияет на здоровье живых организмов и человека [7, 8].

Негативных последствий от воздействия тяжелых металлов в окружающую среду можно избежать, используя современные методы извлечения их ионов высокоэффективными адсорбентами, синтез которых, исследование свойств и практическое применение – актуальная задача.

Известны положительные результаты использования для извлечения тяжелых металлов ионообменных сорбентов [9], природных и синтетических цеолитов [10], активированных углей [11].

Эффективно сорбируют различные химические соединения металлоорганические каркасные соединения (Metal Organic Framework – MOFs) или координационные

полимеры (Coordination Polymers – CPs), которые состоят из неорганических металлосодержащих узлов, органических мостиковых лигандов и обладают трехмерной кристаллической каркасной структурой. Это кристаллические пористые материалы, сорбционная емкость которых обусловлена наличием пустот в каркасе [12]. MOFs уже зарекомендовали себя как потенциальные адсорбенты в процессах водоочистки для извлечения различных загрязнителей, включая некоторые тяжелые металлы [13]. Возможность глубокой функционализации MOFs или получение наночастиц на их основе позволяет варьировать характеристики сорбентов.

Цель исследования – разработка металлоорганических каркасных сорбентов (MOFs) для эффективного извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов, что позволит преодолеть негативные экологические последствия их присутствия в окружающей среде.

В процессе исследования ставилась задача глубокого анализа свойств синтезируемых сорбентов, включая изучение кинетики адсорбции, что в конечном итоге должно привести к созданию инновационных технологий очистки, способствующих улучшению экологической ситуации.

Методика. При проведении исследований использовали металлоорганические полимеры на основе бензол-1,3,5-трикарбоксилатов (MBTC) кобальта, никеля, меди и бензол-1,4-дикарбоксилатов (MBDC) никеля и меди.

Реактивы для синтеза: Co(NO₃)₂·6H₂O (ч, ХИММЕД), Ni(NO₃)₂·6H₂O (х.ч., ROTH), Cu(NO₃)₂·3H₂O (ч, ЛАВЕРНА), CdCl₂·2.5H₂O (осч, ХИММЕД), Pb(NO₃)₂ (х.ч., ХИММЕД), 1,3,5-C₆H₃(COOH)₃ = H₃BTC (98 %, ACROS ORGANICS), 1,4-C₆H₄(COOH)₂ = H₂BDC (99+ %, ACROS ORGANICS), диметилформамид = ДМФА (х.ч., ХИММЕД), C₂H₅OH = этанол (96.5 %, МИНИМЕД)

Для синтеза сорбентов навеску органического линкера (L) растворяли в 8 мл ДМФА и 8 мл этанола, навеску солей металлов растворяли в 8 мл дистиллированной воды. Полученные растворы объединяли и перемешива-

Табл.1. Условия синтеза образцов MBTC и MBDC

Образец	Прекурсор иона металла (M ²⁺)	Линкер (L)	M ²⁺ /L	pH	t, °C	τ, ч	Цвет порошка
CoBTC	Co(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	H ₃ BTC	1,3	4,7	130	24	розовый
NiBTC	Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O		1,3	4,5	130	24	салатовый
CuBTC	Cu(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O		1,6	~ 4...5	120	6	голубой
NiBDC	Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	H ₂ BDC	1,5	~ 4...5	123	22	светло-зеленый
CuBDC	Cu(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O		1,5	4,7	123	22	бледно-голубой

ли около 30 минут при комнатной температуре. Готовую смесь помещали в автоклав, который нагревали при заданной температуре (t) в течение определенного времени (τ), индивидуальных для каждого соединения (табл. 1). После нагревания полученный осадок отделяли от маточного раствора фильтрованием, промывали 3 раза дистиллированной водой и 4 раза этанолом, сушили на воздухе в течение суток при комнатной температуре ($\sim 25^\circ\text{C}$) и анализировали.

Порошковую рентгеновскую дифракцию для CoBTC, NiBTC, NiBDC, CuBDC проводили с использованием дифрактометра PowDix 600W. Источник излучения – медная трубка ($\text{CuK}\alpha$) с Ni-фильтром, напряжением в 30 кВ и током в 10 мА. Регистрацию осуществляли со скоростью 0,05 °/с, шаг сканирования – 0,01° в диапазоне углов 2θ : 5...50°. Фазовый состав CuBTC исследовали с использованием дифрактометра HZG-4. Источник излучения – медная трубка ($\text{CuK}\alpha$). Монохроматор графитовый. Съемку проводили с шагом в 0,02° (каждый шаг длился 10 с). Область регистрации от 2 до 50° 2θ . Моделирование кристаллических структур выполняли с использованием программы Mercury. Фазовый анализ проводили с привлечением соответствующих карточек из Кембриджского центра кристаллографических данных (Cambridge Crystallography Data Center – CCDC). Для CoBTC, NiBTC и CuBTC расчет параметров элементарной ячейки осуществляли с использованием программы Diana. Для NiBDC параметры ячейки были рассчитаны и уточнены методом Ле Беля с использованием программы FOX. Параметры ячейки CuBDC определяли с использованием программного обеспечения (ПО) Dicvol пакета FullProf.

ИК-спектры полученных сорбентов регистрировали на инфракрасном спектрометре с Фурье-преобразованием WQF-530A (Beijing Beifen-Ruili Analytical Instrument Co. Ltd., Китай) в диапазоне волновых чисел 350...4000 cm^{-1} с использованием приставки НРВО на алмазной призме. Спектральное разрешение прибора составляло 0,85 cm^{-1} , число сканирований – 64, графическое разрешение 1 cm^{-1} . Точность волнового числа 0,01 cm^{-1} .

Текстурные характеристики синтезированных сорбентов изучали методом низкотемпературной адсорбции азота на приборе ASAP Micrometrics 2020. Интервал относительных давлений составлял от 0,001 до 0,99 P/Ps. Образцы предварительно подвергали дегазации при 150 °C до остаточного давления 10–7 мм рт.ст.

Адсорбцию ионов тяжелых металлов Co_{2+} , Ni_{2+} , Cu_{2+} , Cd_{2+} , Pb_{2+} из водных растворов исследовали методом атомной-абсорбционной спектроскопии на приборе Shimadzu AA-7000 с электротермическим атомизатором (AAC). В качестве монохромного излучения использовали лампы с полым катодом, коррекция фона обеспечивалась дейтериевой лампой (185...430 нм), остаточную концентрацию определяли с помощью встроенного программного обеспечения по градуировочному графику из пяти значений стандартных концентраций, усредненных для трех измерений.

Сорбционные исследования проводили в статических условиях в ограниченном объеме. Адсорбционную емкость материала рассчитывали по формуле (1):

$$q_\tau = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m}, \quad (1)$$

где q_τ – количество ионов тяжелых металлов, адсорбированных в момент времени τ на сорбенте, мг/г; τ – момент времени отбора пробы, мин; C_0 – начальная

концентрация тяжелого металла, мг/г; C_e – равновесная концентрация тяжелого металла, мг/г; m – навеска сорбента, г; V – объем раствора, мл.

Степень извлечения тяжелых металлов из раствора вычисляли по формуле (2):

$$n = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\%, \quad (2)$$

где n – степень извлечения тяжелых металлов, %; C_0 – начальная концентрация тяжелого металла, мг/г; C_e – равновесная концентрация тяжелого металла, мг/г.

Результаты и обсуждение. Идентификационный анализ синтезированных соединений, определение их строения и свойств – важные аспекты изучения их сорбционных характеристик. В нашем исследовании дифрактограммы порошков CoBTC и NiBTC согласуются с расчетными дифрактограммами структур $[\text{Co}_3(\text{BTC})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$ и $[\text{Ni}_3(\text{BTC})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$. В отличие от NiBTC, дикарбоксилат NiBDC кристаллизуется в триклинной сингонии (пространственная группа $P1$, $Z = 1$). Дифракционная картина NiBDC согласуется с рассчитанной дифрактограммой кристаллической структуры $[\text{Ni}_3(\text{OH})_2(\text{BDC})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ [14]. В свою очередь образец CuBTC кристаллизуется в кубической сингонии с пространственной группой $Fm\bar{3}m$ ($Z = 16$). Дифрактограмма этого сорбента сочетается с расчетной дифрактограммой кристаллической структуры $[\text{Cu}_3(\text{BTC})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$ [15]. Дифракционная картина CuBDC не содержит отражений, отвечающих за наличие исходных компонентов и побочных продуктов. Синтезированный образец CuBDC имеет структуру, принадлежащую к моноклинной сингонии. Дополнительная информация о составе и строении син-

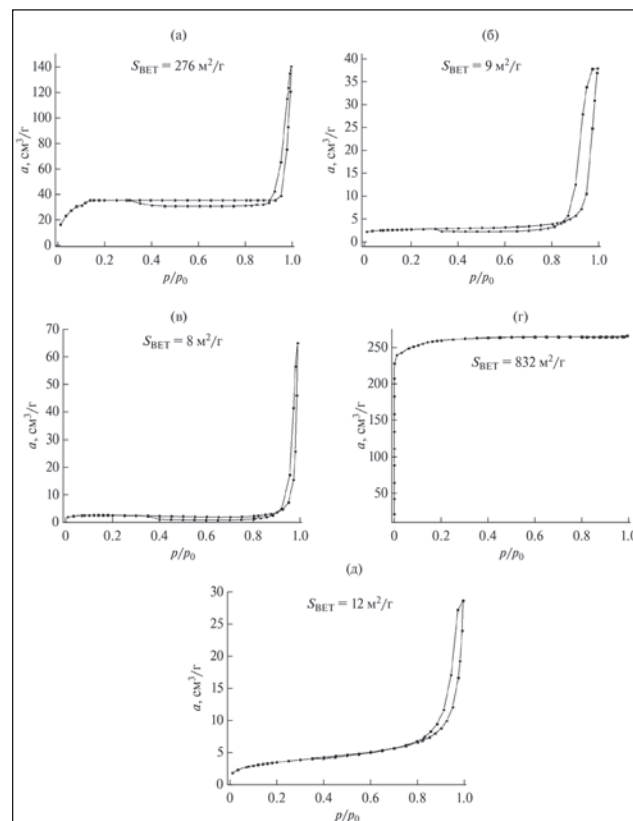


Рис. 1. Изотермы низкотемпературной адсорбции азота образцами сорбентов: а) CoBTC, б) NiBTC, в) NiBDC, г) CuBTC, д) CuBDC.

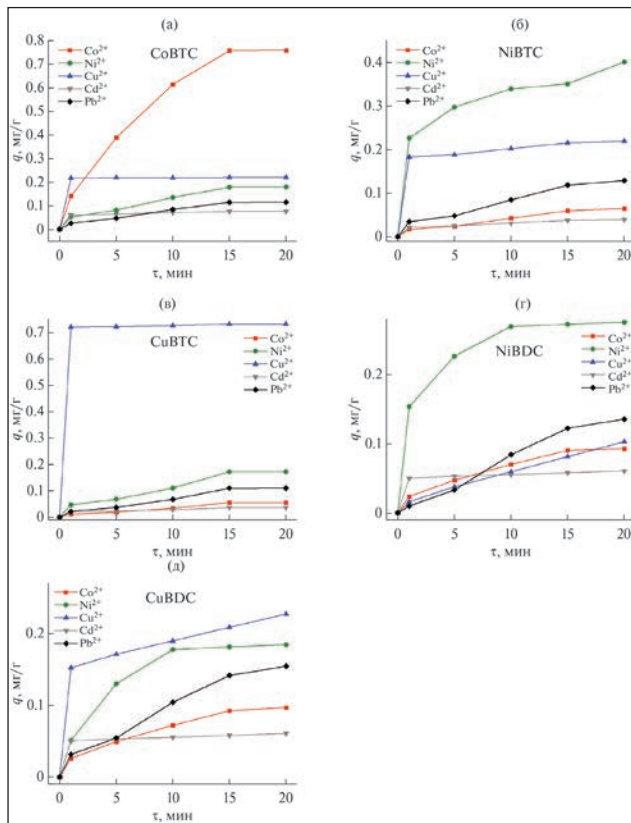


Рис. 2. Кинетические кривые адсорбции ионов тяжелых металлов на образцах: а) CoBТС, б) NiBТС, в) CuBТС, г) NiBDC, д) CuBDC.

тезированных сорбентов, полученная при регистрации ИК-спектров, хорошо согласуется с литературными данными и результатами дифрактометрии.

При исследовании процессов адсорбции важное значение имеют текстурные характеристики используемых сорбентов. Результаты анализа изотерм низкотемпературной адсорбции азота с использованием синтезированных MOFs свидетельствуют, что изотерма для CoBТС (рис. 1а) в области малых давлений характеризуется резким повышением значений адсорбции. Это указывает на сильное взаимодействие «адсорбат – адсорбент» в области микропор. Кроме того, изотерма содержит два участка гистерезиса прямого и обратного типа. Их наличие свидетельствует о различии механизмов адсорбции и десорбции, что характерно для мезопор. Первый участок гистерезиса указывает на присутствие открытых щелевидных и цилиндрических мезопор, второй свидетельствует о наличии «закрытых» мезопор цилиндрической формы. Изотерма для NiBТС (рис. 1б) имеет схожую картину с CoBТС и подтверждает наличие закрытых мезопор. Главным отличием служит практически полное отсутствие микропор, а также принадлежность гистерезиса к типу H₂ и H3 по классификации де Бюра, согласно которой мезопоры имеют цилиндрическую и щелевидную формы.

Удельная поверхность CoBТС и NiBТС, рассчитанная методом Брунауэра – Эммета – Теллера (БЭТ), составила соответственно 276,0 и 9,0 м²/г. Разница между величинами этих показателей обусловлена, главным образом, большим содержанием микропор у CoBТС.

Анализ изотермы адсорбции азота для NiBDC (рис. 1в) свидетельствует о практически полном отсутствии микропор и наличии закрытых мезопор. Однако,

судя по гистерезису в области больших давлений, мезопоры имеют только цилиндрическую форму, в отличие от NiBТС. Удельная поверхность CoBТС, рассчитанная методом БЭТ, составила 8,0 м²/г. Изотерма адсорбции азота у CuBТС (рис. 2г) в области малых давлений имеет резкий рост значений адсорбции, что указывает на наличие сильного взаимодействия «адсорбат – адсорбент» в области микропор. Кроме того, заметно малое содержание открытых мезопор цилиндрической формы. Удельная поверхность CuBТС, рассчитанная методом БЭТ, составила 832,0 м²/г. Таким образом, CuBТС характеризуется развитой пористой удельной поверхностью с преимущественным содержанием микропор и незначительным количеством мезопор цилиндрической формы. Следует отметить, что из анализа изотермы адсорбции для CuBDC можно сделать вывод об отсутствии микропор в образце, а мезопоры по классификации де Бюра относятся к закрытому щелевидному типу. Поэтому удельная поверхность образца CuBDC (12,0 м²/г) много меньше (рис. 2д), чем у CuBТС (832,0 м²/г).

Важный аспект, установленный в результате проведенных исследований, заключается в преимущественном поглощении тех ионов металлов, которые входят в состав сорбента. Так, CoBТС эффективнее поглощает ионы Co₂₊, NiBТС и NiBDC – ионы Ni₂₊, а CuBТС и CuBDC – ионы Cu₂₊ (рис. 3). Это свидетельствует о реализации правила Панета – Фаянса, согласно которому ионы сорбируются преимущественно сорбентом, имеющим в своем составе одноименный ион. При этом NiBDC и CuBDC сорбируют одноименные ионы хуже, чем NiBТС и CuBТС, из-за различий в строении металлоорганического каркаса. Следует отметить, что удельная поверхность образцов не оказывает определяющего влияния на процесс извлечения ионов тяжелых металлов. Действительно, наибольшая удельная адсорбция 0,75 мг/г отмечена для ионов кобальта при использовании CoBТС с удельной поверхностью 276,0 м²/г. При этом CuBТС с наибольшей удельной поверхностью 832,0 м²/г поглощает меньше ионов меди. Несмотря на то что удельная площадь поверхности образца NiBDC и NiBТС ниже, чем у других сорбентов, их удельная адсорбция ионов тяжелых металлов больше, чем у других образцов.

При использовании CoBТС, NiBТС и CuBТС максимальная степень извлечения наблюдается для ионов

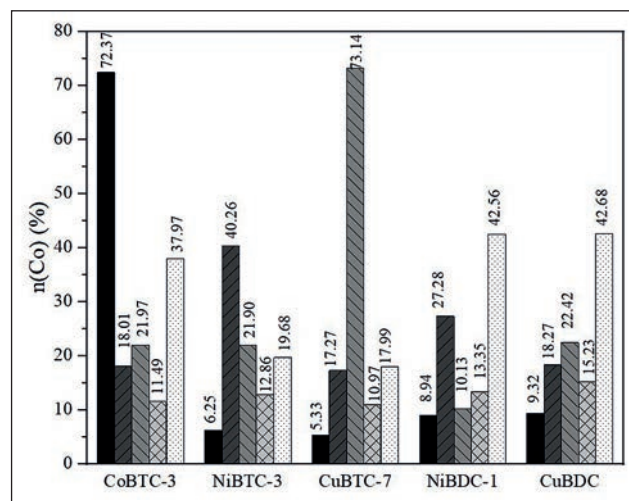


Рис. 3. Степень извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов на образцах MBТС и MBDC: ■ – Co²⁺, ■ – Ni²⁺, ■ – Cu²⁺, ▨ – Pb²⁺, ▩ – Cd²⁺.

Co²⁺, Ni²⁺, Cu соответственно (рис. 3), что также подтверждает выполнение правила Панета – Фаянса, согласно которому сорбенты наиболее эффективно удаляют ионы своих собственных металлов. Однако образцы NiBDC и CuBDC, вопреки ожиданиям, демонстрируют наибольшую степень извлечения ионов Cd²⁺, что может указывать на уникальные сорбционные свойства этих соединений.

Большую часть рассмотренных процессов адсорбции металлов хорошо описывает кинетическое уравнение псевдотортого порядка [15] (3):

$$\frac{\tau}{q_{\tau}} = \frac{\tau}{q_e} + \frac{1}{k_2 q_e^2}, \quad (3)$$

где q_{τ} – поглощение в момент времени τ , мг/г; q_e – равновесное поглощение, мг/г; k_2 – константа процесса псевдотортого порядка.

Действительно, большинство процессов адсорбции металлов на синтезированных сорбентах можно описать уравнением псевдотортого порядка, что свидетельствует о молекулярном характере взаимодействия ионов металлов с активными центрами сорбента (рис. 4). Таким образом, результаты исследования не только подтверждают эффективность разработанных сорбентов, но и открывают возможности для дальнейшего изучения их применения в очистке сточных вод и почвы.

Величина константы скорости псевдотортого порядка для адсорбции ионов таких металлов, как Co²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, а также Cd²⁺, на образцах CoBTC, NiBTC, CuBTC, NiBDC и CuBDC, свидетельствует о высокой эффективности процесса. Коэффициенты достоверности аппроксимации для рассматриваемых соединений имеют

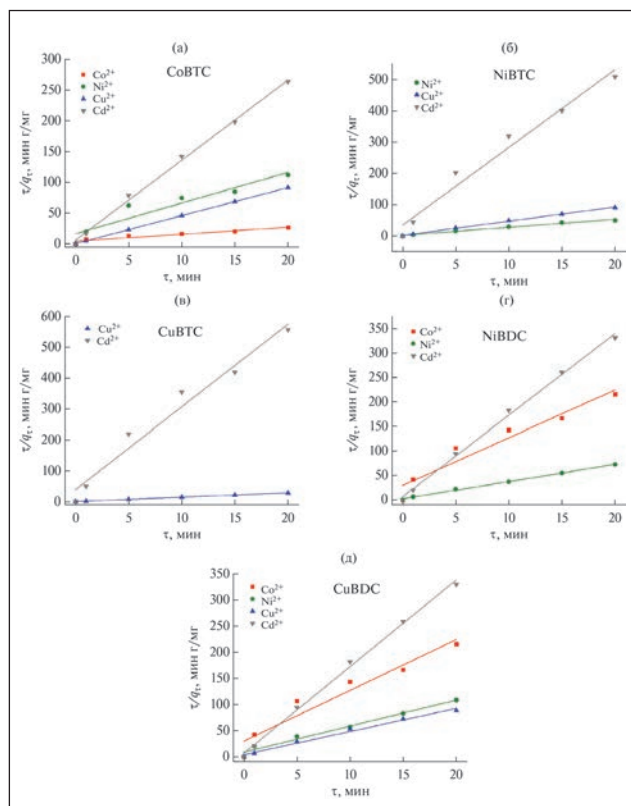


Рис. 4. Линейный вид кинетических зависимостей псевдотортого порядка для процесса адсорбции металлов на образцах: а) CoBTC, б) NiBTC, в) CuBTC, г) NiBDC, д) CuBDC.

Табл. 2. Константа скорости адсорбции псевдотортого порядка ионов металлов на образцах CoBTC, NiBTC, CuBTC, NiBDC, CuBDC с коэффициентом достоверности аппроксимации

Образец сорбента	Co ²⁺	Ni ²⁺	Cu ²⁺	Cd ²⁺
CoBTC	R ² 0,9044	0,9044	0,9999	0,9974
	k ₂ , г·мин ⁻¹ ·мг ⁻¹ 0,19	2,49·10 ⁻³	0,59	1,04·10 ⁻³
NiBTC	R ² -	0,9864	0,9976	0,9748
	k ₂ , г·мин ⁻¹ ·мг ⁻¹ -	0,07	0,03	4,71·10 ⁻⁵
CuBTC	R ² -	-	0,9999	0,9705
	k ₂ , г·мин ⁻¹ ·мг ⁻¹ -	-	11,90	3,65·10 ⁻⁵
NiBDC	R ² 0,9347	0,9973	-	0,9972
	k ₂ , г·мин ⁻¹ ·мг ⁻¹ 3,56·10 ⁻⁴	3,65·10 ⁻²	-	5,64·10 ⁻⁴
CuBDC	R ² 0,9347	0,9827	0,9888	0,9972
	k ₂ , г·мин ⁻¹ ·мг ⁻¹ 3,56·10 ⁻⁴	4,73·10 ⁻³	1,36·10 ⁻²	5,72·10 ⁻⁴

где R² – коэффициент достоверности аппроксимации

высокие значения (табл. 2), что свидетельствует о надежности полученных результатов и их соответствии рассматриваемой модели.

Интересно отметить, что ионы свинца всеми сорбентами извлекаются с отклонениями от уравнения псевдотортого и псевдотортого порядка.

Единственный случай, когда ион металла поглощается согласно кинетическому уравнению псевдотортого порядка (4), был обнаружен при сорбции ионов меди на NiBDC (рис. 5).

$$\ln(q_e - q_{\tau}) = \ln(q_e) - k_1 \tau, \quad (4)$$

где q_{τ} и q_e – адсорбционная способность ионов тяжелых металлов, адсорбированных соответственно в момент времени τ и момент времени установления равновесия, мг/г; τ – момент времени отбора пробы, мин; k_1 – константа кинетической модели псевдотортого порядка, мин⁻¹.

Поглощение ионов кобальта сорбентами NiBTC и CuBTC, ионов никеля соединением CuBTC, а также ионов свинца на всех исследуемых материалах подчиняется диффузионной модели Вебера – Морриса [16] (рис. 6) согласно уравнению (5):

$$q_{\tau} = k_{dif} \tau^{1/2} + C, \quad (5)$$

где k_{dif} – константа скорости диффузии, м²/с; C – величина начальной адсорбции, мг/г.

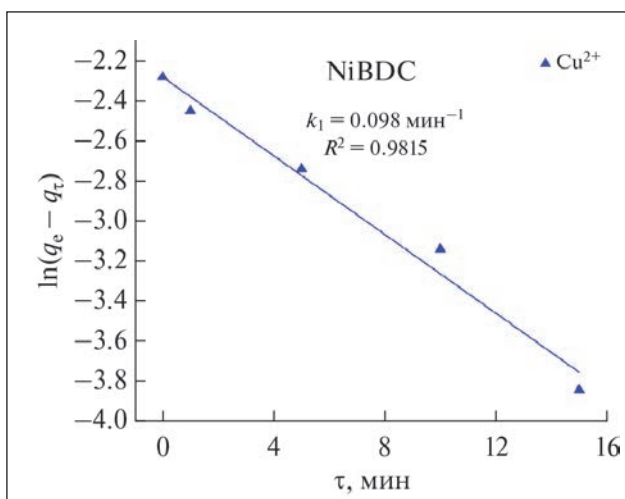


Рис. 5. Линейный вид кинетической зависимости псевдотортого порядка для процесса адсорбции ионов меди сорбентом NiBDC.

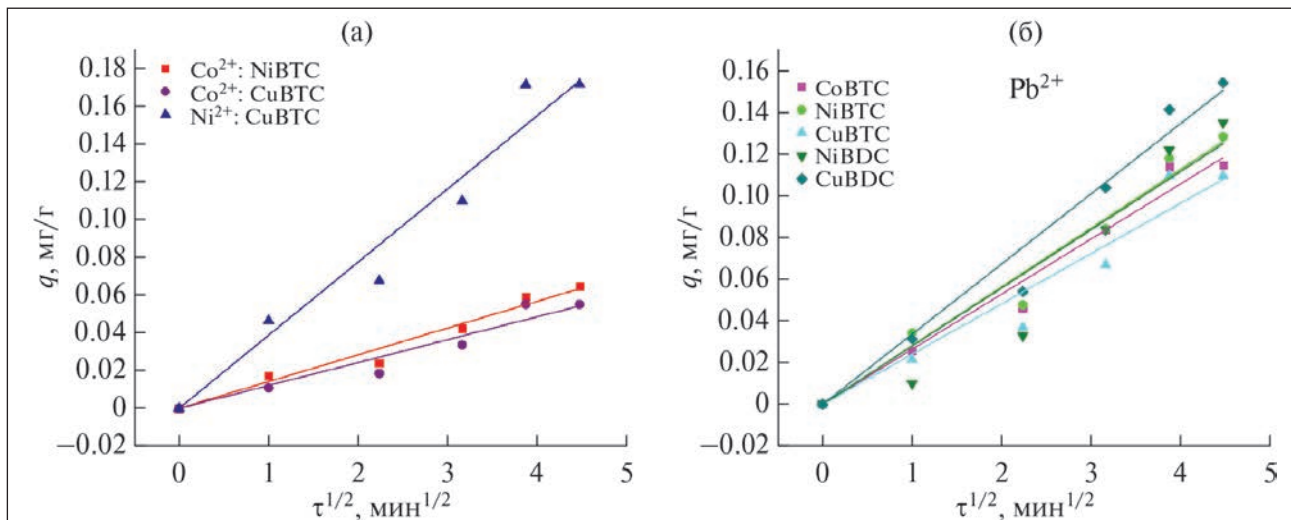


Рис. 6. Линейный вид кинетических зависимостей процесса адсорбции согласно уравнению Вебера – Морриса: а) ионов кобальта на NiBTC и CuBTC, ионов никеля на CuBTC, б) ионов свинца на CoBTC, NiBTC, CuBTC, NiBDC и CuBDC.

Линеаризация кинетических показателей адсорбции ионов кобальта и никеля на NiBTC и CuBTC, а также ионов свинца на всех рассматриваемых сорбентах по уравнению Вебера – Морриса свидетельствует о значительном вкладе в этот процесс диффузии ионов металлов внутрь пор сорбента (табл. 3), на что указывают высокие значения коэффициентов достоверности аппроксимации. Эта особенность связана со спецификой структуры сорбента [16] и позволяет объяснить высокую степень извлечения ионов тяжелых металлов материалами с высокой удельной поверхностью.

Табл. 3. Константы скорости диффузии и коэффициента достоверности аппроксимации для адсорбции ионов кобальта, никеля и свинца на различных сорбентах

Извлекаемый ион / образец сорбента	$k_{\text{диф}}$ мг/(г·мин)	R^2
Co ²⁺ / NiBTC	0,0142	0,9908
Co ²⁺ / CuBTC	0,0121	0,9786
Ni ²⁺ / CuBTC	0,0390	0,9866
Pb ²⁺ / CoBTC	0,026	0,9913
Pb ²⁺ / NiBTC	0,028	0,9908
Pb ²⁺ / CuBTC	0,024	0,9786
Pb ²⁺ / NiBDC	0,028	0,9635
Pb ²⁺ / CuBDC	0,034	0,9899

Изучение влияния радиуса ионов металлов (в MOFs и в растворе) и их электроотрицательности на процесс адсорбции позволило установить линейную зависимость между эффективностью извлечения исследуемых объектов из водных растворов и логарифмическим отношением ионных радиусов по Шеннону и электроотрицательности по Полингу (6):

$$\ln\left(\frac{|\rho_1 - \rho_2|}{\rho_1}\right) = \ln\left(\frac{\frac{r(M_1)}{\chi(M_1)} - \frac{r(M_2)}{\chi(M_2)}}{\frac{r(M_1)}{\chi(M_1)}}\right), \quad (6)$$

где ρ – радиус иона r (нм), отнесенный к его электроотрицательности χ (эВ^{1/2}); M_1 – ион в составе MOFs; M_2 – ион адсорбата.

Адсорбция ионов металлов на исследуемых сорбентах описывается функцией

$$q_e = f\left(\ln\left(\frac{|\rho_1 - \rho_2|}{\rho_1}\right)\right),$$

которая принимает линейный вид на всем временном интервале эксперимента (рис. 7).

Эта зависимость указывает на то, что процесс адсорбции протекает в условиях, когда скорость переносимого вещества (диффузии) остается постоянной в течение всего времени эксперимента. Это также может свидетельствовать, что адсорбция проходит по механизму, связанному с диффузией, когда ионы тяжелых металлов постепенно заполняют активные центры сорбента до достижения равновесного состояния.

Такой линейный характер зависимости обычно указывает на то, что адсорбция следует кинетике псевдотортого порядка или диффузионной модели. При этом, чем больше приведенное отношение радиуса ионов к электроотрицательности, тем меньше поглощается ион на одноименном ионе в составе MOFs. Это четко прослеживается на металлоорганических каркасах с удельной поверхностью одного порядка.

Отклонения от линейной зависимости могут возникать из-за различий в пористости сорбентов, которая напрямую влияет на скорость и эффективность процесса адсорбции. Например, на начальных этапах адсорбции, когда ионы металлов только начинают взаимодействовать с сорбентом, вклад процесса диффузии внутри пор может быть незначительным, так как скорость, с которой ионы проникают в поры сорбента, не играет решающую роль. В таких случаях адсорбция ограничена поверхностными взаимодействиями и ионы могут легко адсорбироваться на активных центрах, расположенных на поверхности сорбента. Однако с увеличением времени контакта и пористости сорбента влияние диффузии начинает расти. Таким образом, различия в пористости сорбентов приводят к тому, что на начальных этапах адсорбции влияние диффузии ионов металлов оказывается минимальным.

Следует отметить, что адсорбция ионов кобальта, никеля и меди на сорбентах CoBTC, NiBTC и CuBTC, согласно правилу Панета – Фаянса, не подчиняется приведенной зависимости. При этом использование каркасных координационных соединений, имеющих

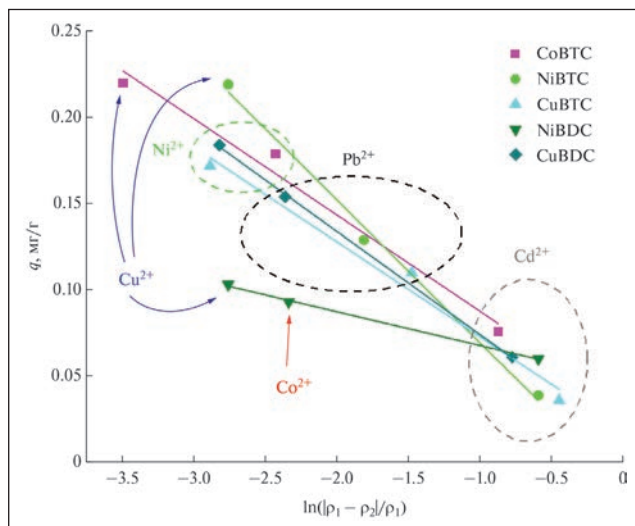


Рис. 7. Линейная зависимость показателя удельной адсорбции ионов тяжелых металлов от логарифмического отношения радиуса иона металла к его электроотрицательности.

в своем составе одноименные с извлекаемыми ионы тяжелых металлов, может служить фактором очистки почвы и водных сред от этих опасных загрязнителей.

Выводы. В ходе исследований были успешно синтезированы металлоорганические каркасные соединения на основе бензол-1,3,5-трикарбоксилатов кобальта, никеля, меди, а также бензол-1,4-дикарбоксилатов никеля и меди.

Проведенный идентификационный анализ по дифрактограммам порошков CoBTC и NiBTC показал наличие структур $[\text{Co}_3(\text{BTC})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$ и $[\text{Ni}_3(\text{BTC})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$. В отличие от NiBTC, дикарбоксилат NiBDC кристаллизуется в триклинной сингонии (пространственная группа $P1$, $Z = 1$) и соответствует кристаллической структуре $[\text{Ni}_3(\text{OH})_2(\text{BDC})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$, образец соединения CuBTC кристаллизуется в кубической сингонии с пространственной группой $\text{Fm}\bar{3}m$ ($Z = 16$) и соответствует кристаллической структуре $[\text{Cu}_3(\text{BTC})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$, а соединение CuBDC имеет структуру, принадлежащую к моноклинной сингонии.

Особенности процессов сорбции зависят от состава, структуры и пористости металлоорганических каркасных соединений. При этом кинетические закономерности этих процессов можно описать уравнением псевдотретьего порядка, что свидетельствует о молекулярном характере взаимодействия ионов металлов с активными центрами сорбента. Единственным случаем протекания процесса согласно кинетическому уравнению псевдопервого порядка является адсорбция ионов меди на сорбенте NiBDC. Отмечено, что ионы кобальта, никеля и меди лучше поглощаются сорбентами, содержащими соответствующие одноименные ионы согласно правилу Панета – Фаянса. Найденная линейная зависимость между сорбционной емкостью и логарифмом отношения радиуса ионов к их электроотрицательности подразумевает, что механизм адсорбции ионов металлов на MOFs связан с физико-химическими свойствами самих ионов. При этом, чем больше приведенное отношение радиуса ионов к электроотрицательности, тем меньше поглощается ион на одноименном ионе в составе MOFs. Этот факт четко прослеживается на металлоорганических каркасах с удельной поверхностью одного порядка.

Таким образом, синтезированные металлоорганические координационные соединения могут быть рассмотрены как перспективные сорбенты для извлечения ионов кадмия, свинца, меди, кобальта и никеля из водных растворов, что является важным фактором для возможного практического использования этих материалов в природоохранных технологиях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Порошковая дифракция и инфракрасная спектроскопия выполнена с использованием оборудования ЦКП РТУ МИРЭА, получившего поддержку Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Соглашения от 01.09.2021 № 075-15-2021-689 и финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № FSFZ-2024-0003.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Семенов А. М., Глинушкин А. П., Соколов М. С. Здоровье почвенной экосистемы: от фундаментальной постановки к практическим решениям // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2019. № 1. С. 5–18.
2. Polyethylene glycol-stabilized bimetallic nickel-zero valent iron nanoparticles for efficient removal of Cr (VI) / S. Wang, D. Zhong, Y. Xu, et al. // *New Journal of Chemistry*. 2021. Vol. 45, No. 31. P. 13969–13978.
3. Characteristics, kinetics, thermodynamics and long-term effects of zerovalent iron/pyrite in remediation of Cr (VI)-contaminated soil / X. Min, Q. Li, X. Zhang, et al. // *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 289. P. 117–830. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749121014123?via%3Dihub> (дата обращения: 25.10.2023). doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117830.
4. Heavy metal poisoning: clinical presentations and pathophysiology / D. Ibrahim, B. Froberg, A. Wolf, et al. // *Clinics in laboratory medicine*. 2006. Vol. 26, No. 1. P. 67–97.
5. International Agency for Research on Cancer. IARC monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans. Suppl. 2: Long-term and short-term screening assays for carcinogens: a critical appraisal. Lyon: IARC, 1980. 96 p.
6. Valko M. M. H. C. M., Morris H., Cronin M. T. D. Metals, toxicity and oxidative stress // *Current medicinal chemistry*. 2005. Vol. 12, No. 10. P. 1161–1208.
7. Consequences of contamination on the interactions between phytoplankton and bacterioplankton / G. U. Marisol, M. Hélène, L. Céline, et al. // *Chemosphere*. 2018. Vol. 195. P. 212–222.
8. Heo W. M., Kim B. The effect of artificial destratification on phytoplankton in a reservoir // *Hydrobiologia*. 2004. Vol. 524. P. 229–239.
9. An overview of preparation and applications of stabilized zero-valent iron nanoparticles for soil and groundwater remediation / X. Zhao, W. Liu, Z. Cai, et al. // *Water research*. 2016. Vol. 100. P. 245–266.
10. Blanchard G., Maunay M., Martin G. Removal of heavy metals from waters by means of natural zeolites // *Water research*. 1984. Vol. 18, No. 12. P. 1501–1507.
11. Simultaneous removal of p-nitrophenol and Cr (VI) using biochar supported green synthetic nano zero valent iron-copper: mechanistic insights and toxicity evaluation /

- T. Li, F. Zhu, W. Liang, et al. // *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 167. P. 629–640.
12. Development of Metal-Organic Molecular Sieves for the Separation and Sorption of CO₂ and CH₄ / K. A. Seromyanova, A. G. Mushtakov, D. V. Murtazin, et al. // *Petroleum Chemistry*. 2023. Vol. 63, No. 2. P. 233–240.
13. A critical review on recent developments in MOF adsorbents for the elimination of toxic heavy metals from aqueous solutions / L. Rani, J. Kaushal, A. L. Srivastav, et al. // *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. P. 44771–44796.
14. High performance copper based metal organic framework for removal of heavy metals from wastewater / H. W. Haso, A. A. Dubale, M. A. Chimdesa, et al. // *Frontiers in Materials*. 2022. No. 9. P. 840806. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2022.840806/full> (дата обращения: 25.10.2023).
15. Изучение процесса адсорбции паров бензола активированными углями марок AP-A, AP-B и углями компании Baojun Activated Carbon / Е. М. Касаткин, Л. С. Ахмедова, Е. Б. Маркова и др. // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, серия Естественные науки*. 2022. № 4. С. 110–124.
16. Wu F. C., Tseng R. L., Juang R. S. Initial behavior of intraparticle diffusion model used in the description of adsorption kinetics // *Chemical Engineering Journal*. 2009. Vol. 153, No. 1–3. P. 1–8. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138589470900374X?via%3Dihub> (дата обращения: 25.10.2023). doi: 10.1016/j.cej.2009.05.013.

Поступила в редакцию 04.09.2024

После доработки 02.10.2024

Принята к публикации 22.10.2024

Зоотехния и ветеринария

УДК 63.636

DOI 10.31857/S250026272405008 EDN SIQKFY

ХОЗЯЙСТВЕННО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАРАНЧИКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ОТ СКРЕЩИВАНИЯ ОВЦЕМАТОК ЭДИЛЬБАЕВСКОЙ ПОРОДЫ С ДОРПЕРОМ

© 2024 г. И. Ф. Горлов¹, доктор сельскохозяйственных наук, М. И. Сложенкина¹, доктор биологических наук, Т. А. Магомедов², доктор сельскохозяйственных наук, А. Ю. Юлдашбаева², О. П. Шахбазова³, доктор биологических наук, Р. Г. Раджабов³, кандидат сельскохозяйственных наук

¹Поволжский НИИ производства и переработки мясомолочной продукции,
400066, Волгоград, ул. им. Рокоссовского, 6

²Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева,
127550, Москва, Тимирязевская ул., 49

³Донской государственный аграрный университет,
346493, Ростовская обл., пос. Персиановский, ул. Кривошлыкова, 24

Актуальность работы обусловлена необходимостью увеличения эффективности овцеводства в условиях южных регионов России для повышения продовольственной безопасности и производства высококачественного мяса. Цель исследования – оценить влияние скрещивания овцематок эдильбаевской породы с баранами породы дорпер на продуктивные и биохимические показатели молодняка в условиях южных регионов России. Для проведения эксперимента сформировали три группы животных: чистопородные баранчики эдильбаевской породы (контрольная), помесный молодняк с равной долей кровности ($\frac{1}{2}$ эдильбаевская $\times$ $\frac{1}{2}$ дорпер, вторая группа) и молодняк с большей долей кровности дорпер ($\frac{1}{4}$ эдильбаевская $\times$ $\frac{3}{4}$ дорпер, третья группа). Молодняк второй группы отличался наибольшими показателями живой массы и улучшенными биохимическими характеристиками. Живая масса баранчиков этой группы была выше, чем в контрольной, на 10,3 % ($p < 0,05$). Уровень общего белка в крови особей второй группы составил $110,89 \pm 10,86$ г/л, что превышало величину этого показателя в контрольной ($105,68 \pm 5,33$ г/л) на 4,9 % ($p < 0,05$). Содержание кальция в сыворотке крови животных второй группы было больше, чем в первой, на 84,3 % ($p < 0,001$), что свидетельствует об улучшении минерального обмена. Скрещивание с породой дорпер способствует улучшению продуктивных и физиологических показателей молодняка благодаря выраженному эффекту гетерозиса, особенно при использовании полукровных животных.

ECONOMIC AND BIOLOGICAL FEATURES OF SHEEP OBTAINED FROM CROSSING THE EDILBAEV BREED WITH A DORPER

I. F. Gorlov¹, M. I. Slozhenkin¹, T. A. Magomadov², A. Yu. Yuldashbayeva², O. P. Shakhbazov³, R. G. Rajabov³

¹Povolzhsky Research Institute for the Production and processing of meat and dairy products,
400066, Volgograd, ul. im. Rokossovskogo, 6

²Russian State Agrarian University – K. A. Timiryazev Agricultural Academy
127550, Moskva, Timiryazevskaya ul., 49

³Donskoy State Agrarian University,
346493, Rostovskaya obl., pos. Persianovskii, ul. Krivoshlykova, 24

The relevance of the work is due to the need to increase the efficiency of sheep farming in the southern regions of Russia to improve food security and increase the production of high-quality meat. The purpose of the study was to evaluate the effect of crossing edilbaevsky sheep with dorper sheep on the productive and biochemical parameters of young animals in the southern regions of Russia. During the study, three groups of animals were formed: purebred sheep of the edilbaev breed (control group), mixed young with an equal proportion of blood ($\frac{1}{2}$ edilbaev $\times$ $\frac{1}{2}$ dorper, the first group) and young with a greater proportion of blood dorper ($\frac{1}{4}$ edilbaev $\times$ $\frac{3}{4}$ dorper, the second group). The results showed that the young of the second group demonstrated the highest indicators in terms of live weight and improved biochemical characteristics. The live weight in this group was 10.3 % higher ($p < 0.05$) compared to the control group. The total protein level in the second group was 110.89 ± 10.86 g/l, which exceeded the indicators of the control group (105.68 ± 5.33 g/l) by 4.9 % ($p < 0.05$). It was also revealed that the serum calcium content in the second group exceeded the values of the first group by 84.3 % ($p < 0.001$), which indicates an improvement in mineral metabolism. The analysis confirms that crossing with the dorper breed improves the productive and physiological parameters of young animals due to the pronounced effect of heterosis, especially in the case of half-blooded animals.

Ключевые слова: скрещивание, овцеводство, мясная продуктивность, эдильбаевская порода, порода дорпер.

Keywords: crossing, sheep breeding, meat productivity, edilbaevsky breed, dorper breed.

Овцеводство играет важную роль в агропромышленном комплексе и экономике России, особенно в ее южных регионах, где благоприятные природные и климатические условия традиционно способствуют успешному развитию этой отрасли. Разведение овец обеспечивает внутренний рынок высококачественной бараниной, которая служит ценным источником легкоусвояемого белка, железа и других важных питатель-

ных веществ. Благодаря низкому содержанию жира и богатому аминокислотному составу это незаменимый элемент мясного баланса в рационе населения страны, что особенно актуально в контексте обеспечения продовольственной безопасности.

Однако овцеводство в России сталкивается с рядом проблем, среди которых можно выделить неустойчивые темпы наращивания численности поголовья,

устаревшую инфраструктуру, недостаток инвестиций и нехватку квалифицированных специалистов. Кроме того, имеется проблема низкой продуктивности и недостаточной устойчивости к различным климатическим условиям у животных ряда пород. Решение этих вопросов требует комплексного подхода, в том числе использования мясных и мясо-сальных пород, к числу которых относятся дорпер и эдильбаевская породы [1, 2].

Животные эдильбаевской породы хорошо адаптированы к суровым климатическим условиям и способны накапливать значительные запасы жира даже в условиях ограниченного кормления. Это делает их ценным ресурсом для засушливых регионов. Одновременно они уступают животным породы дорпер по качеству мяса из-за высокого содержания жира. Кроме того, овцы породы дорпер отличаются высокой скоростью набора живой массы. Однако для определения эффективности использования животных этой породы в природно-климатических условиях южных регионов, особенно с засушливым климатом, необходимо проведение глубоких научно-экспериментальных исследований [3, 4].

Учитывая высокие мясные продуктивные качества овец породы дорпер, использование ее производителей для скрещивания с животными других пород может быть важным инструментом повышения эффективности овцеводства [5]. В целом этот прием позволяет комбинировать лучшие качества различных пород, что способствует увеличению качества мяса, повышению скорости роста и устойчивости к болезням, улучшению адаптации к неблагоприятным условиям [6, 7, 8].

Особое значение в селекции имеет изучение интерьерных показателей помесного молодняка, полученного в результате скрещивания. Гематологические и биохимические параметры крови позволяют оценить состояние здоровья животных, их метаболизм и способность адаптироваться к различным условиям содержания. Исследование взаимосвязи между хозяйственными характеристиками и интерьерными показателями – важный инструмент селекционеров, использование которого позволяет целенаправленно выбирать животных с лучшими генетическими параметрами для дальнейшего улучшения поголовья. Эти знания помогают формировать более продуктивные, устойчивые и здоровые стада овец, что положительно сказывается на экономической эффективности овцеводства и способствует укреплению продовольственной безопасности страны [9, 10, 11].

Цель исследования – изучение влияния скрещивания овцематок эдильбаевской породы и баранов породы дорпер на биологические и продуктивные показатели молодняка, а также выявление закономерностей корреляционных связей между живой массой и интерьерными показателями у чистопородных и помесных баранчиков в 4-месячном возрасте.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

- изучить живую массу молодняка для определения влияния генотипа на ростовые показатели;
- провести гематологические исследования для оценки изменений в составе крови в зависимости от генотипа;
- оценить биохимические показатели сыворотки крови молодняка для определения метаболических особенностей, связанных с изменением белкового, углеводного и минерального обмена.

Методика. Объектом исследований были овцы эдильбаевской породы и их помеси с породой дорпер. Для проведения эксперимента методом аналогов сформировали три группы баранчиков по 5 голов в каждой. При отборе учитывали такие параметры, как возраст, живая масса

Табл. 1. Живая масса животных разных генотипов, кг

Генотип животных	Живая масса
Эдильбаевская	37,7±1,2
1/2 эдильбаевская × 1/2 дорпер	41,6±1,1*
1/4 эдильбаевская × 3/4 дорпер	38,1±1,3

и физиологическое состояние животных. Первая группа (контрольная) состояла из чистопородных животных эдильбаевской породы, вторая – из помесного молодняка с равной долей кровности ($\frac{1}{2}$ эдильбаевская × $\frac{1}{2}$ дорпер), третья – из помесного молодняка с преобладанием кровности дорпер ($\frac{1}{4}$ эдильбаевская × $\frac{3}{4}$ дорпер).

Кормление и содержание животных осуществляли в соответствии с нормами, рекомендованными Всероссийским научно-исследовательским институтом животноводства (ВИЖ). Рацион молодняка включал в себя высококачественные грубые и концентрированные корма, обеспечивающие сбалансированное питание для достижения оптимального уровня продуктивности и здоровья животных.

В 4-месячном возрасте определяли живую массу каждой особи с использованием стандартных зоотехнических методов. Для анализа гематологических показателей крови (содержание эритроцитов, гемоглобина, лейкоцитов, лимфоцитов и др.) применяли современные автоматические анализаторы крови Idexx, что обеспечивало высокую точность измерений. Биохимические исследования сыворотки крови включали определение содержания общего белка, альбуминов, глобулинов, глюкозы, кальция, фосфора, креатинина и других показателей на биохимических анализаторах.

Полученные данные подвергали цифровой обработке с использованием статистических методов, рассчитывали средние значения, стандартные отклонения и достоверность различий между экспериментальными группами с применением программы Excel. Степень достоверности различий между группами обозначали следующим образом: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

Результаты и обсуждение. Средняя живая масса чистопородных эдильбаевских баранчиков в возрасте 4 месяца составила 37,7 кг. Величина этого показателя у полукровного молодняка второй группы ($\frac{1}{2}$ эдильбаевская × $\frac{1}{2}$ дорпер) была значительно выше – в среднем на 3,9 кг, или 10,3 % ($p < 0,05$), что подчеркивает важность межпородного скрещивания для повышения продуктивности.

В третьей группе, состоящей из овец с $\frac{1}{4}$ крови эдильбаевской породы, также отмечен прирост живой массы, по сравнению с чистопородными животными. Однако средняя масса баранчиков в этой группе была больше, чем в контрольной на 0,4 кг, или около 1 %.

Таким образом, рассматриваемый вариант межпородного скрещивания оказывает положительное влияние на живую массу потомства. Особенно это заметно у полукровных баранчиков, что свидетельствует о высоком потенциале использования животных породы дорпер для увеличения продуктивности молодняка.

Изучение влияния генотипа на состав крови позволяет выявить изменения, происходящие в организме в результате межпородного скрещивания, и лучше понять физиологические преимущества помесей. У чистопородных баранчиков количество эритроцитов в крови в возрасте 4 месяцев составляло $3,25 \times 10^{12}/л$, уровень гемоглобина – 58,00 г/л, что соответствует норме (табл. 2).

У баранчиков второй группы количество эритроцитов в крови было ниже, чем в контрольной, на 8,0 % ($p < 0,05$), а уровень гемоглобина – выше на 16,9 % ($p < 0,05$). Таким образом, несмотря на снижение коли-

Табл. 2. Гематологические показатели овец разных групп

Показатель	1 группа	2 группа	3 группа
Эритроциты, $10^{12}/л$	3,25±0,07	2,99±0,10*	2,68±0,22*
Гемоглобин, г/л	58,00±2,32	67,80±3,98*	66,40±2,29*
Гематокрит, %	11,08±0,07	11,14±0,14	10,74±0,13*
Средний объем эритроцитов, $10^{-15}л$	29,44±0,14	29,84±0,11*	28,60±0,22*
Средняя величина гемоглобина, $10^{-12}г$	203,38±14,27	255,90±10,23*	260,44±15,13*
Лейкоциты, $10^9/л$	4,60±0,44	4,64±0,63	3,88±0,32
Доля лимфоцитов, %	84,30±2,12	77,88±1,32*	67,66±7,39*
Доля моноцитов, %	5,48±0,68	7,02±0,22*	8,06±1,34
Доля гранулоцитов, %	10,22±1,48	15,10±1,92	24,28±6,40*
Лимфоциты, $10^9/л$	3,80±0,32	3,54±0,28	2,54±0,26*
Моноциты, $10^9/л$	0,20±0,04	0,28±0,06	0,24±0,05
Гранулоциты, $10^9/л$	0,60±0,11	0,78±0,13	1,10±0,28

чества эритроцитов, помесные особи характеризуются улучшенной способностью крови переносить кислород.

При этом средний объем эритроцитов у полукровных животных был выше, чем у баранчиков контрольной группы, на $0,4 \times 10^{-15}л$ ($p < 0,05$), а содержание гемоглобина на одну клетку увеличилось на 25,8 % ($p < 0,05$), что указывает на повышенную функциональность крови помесей. Уровень лимфоцитов в крови баранчиков второй группы был ниже, чем в контрольной, на 7,6 % ($p < 0,05$), тогда как доля гранулоцитов выше на 4,88 % ($p < 0,05$).

У животных третьей группы количество эритроцитов в крови было ниже, чем в контрольной, на 17,5 % ($p < 0,05$), а уровень гемоглобина – выше на 14,5 % ($p < 0,05$). Гематокрит в этой группе снизился на 3,1 % ($p < 0,05$). Хотя средний объем эритроцитов уменьшился, содержание гемоглобина на одну клетку возросло на 28,1 % ($p < 0,05$), что подчеркивает высокую функциональность клеток крови. Уровень лимфоцитов снизился на 16,6 % ($p < 0,05$), а доля гранулоцитов выросла на 14,06 % ($p < 0,05$), что свидетельствует об адаптации организма к внешним условиям.

В целом помесный молодняк, полученный в результате скрещивания эдильбаевской породы и породы дорпер, демонстрирует изменения гематологических показателей, которые можно связать с улучшенными адаптивными способностями и повышенной устойчивостью к неблагоприятным факторам. Увеличение уровня гемоглобина и повышение функциональности эритроцитов у этих животных свидетельствуют об их

Табл. 3. Биохимические показатели крови овец разных групп

Показатель	1 группа	2 группа	3 группа
Общий белок, г/л	105,68±5,33	110,89±10,86	97,72±4,80
Альбумины, %	34,62±1,87	42,10±2,63*	43,61±2,28*
Глобулины, %	65,38±1,87	57,90±2,63*	56,39±1,28**
Глюкоза, ммоль/л	2,16±0,01	3,02±0,32**	2,43±0,10*
Мочевина, ммоль/л	3,06±0,36	1,58±0,22**	0,90±0,05***
Кальций, ммоль/л	1,40±0,14	2,58±0,15***	2,38±0,11***
Фосфор, ммоль/л	4,63±0,70	5,45±0,78	4,60±0,33
Железо, мкмоль/л	3,12±0,18	3,88±0,30*	4,74±0,24***
Щелочная фосфатаза, Ед/л	0,82±0,23	0,77±0,15	0,80±0,21
Креатинин, мкмоль/л	1,15±0,04	1,06±0,09	1,26±0,01*
Холестерин, ммоль/л	1,14±0,17	1,13±0,19	1,03±0,07
Мочевая кислота, мкмоль/л	109,04±32,36	152,69±46,86	125,16±22,58
Билирубин прямой, мкмоль/л	0,12±0,01	0,11±0,01	0,09±0,010*
Билирубин общий, мкмоль/л	1,64±0,06	1,92±0,10*	1,90±0,10*
АСТ, Ед/л	128,54±10,17	99,12±8,25*	119,56±14,81
АЛТ, Ед/л	5,20±1,11	6,66±1,53	6,48±1,21
Хлориды, ммоль/л	114,42±8,34	119,42±4,02	116,84±6,10
Триглицериды, ммоль/л	0,12±0,03	0,27±0,05*	0,18±0,01*

значительном преимуществе по продуктивности и выносливости.

Различия биохимических показателей крови животных дают возможность оценивать физиологические изменения в организме молодняка. У чистопородных баранчиков уровень общего белка составил $105,68 \pm 5,30$ г/л, альбуминов – $34,62 \pm 1,87$ %, глобулинов – $65,38 \pm 1,87$ %, глюкозы – $2,16 \pm 0,01$ ммоль/л, мочевины – $3,06 \pm 0,36$ ммоль/л (табл. 3).

Во второй группе уровень альбуминов был больше, чем в контрольной на 7,48 % ($p < 0,05$), глобулинов – ниже на 7,48 % ($p < 0,05$). Такой сдвиг в сторону увеличения альбуминов может свидетельствовать о повышенной способности крови транспортировать различные вещества, что служит одним из маркеров активного обмена веществ. Концентрация глюкозы в крови животных второй группы была на 39,8 % выше, чем в контрольной ($p < 0,01$). Это может указывать на большую активность углеводного обмена у помесных овец. При этом уровень мочевины в крови полукровных особей был на 48,4 % ниже по сравнению с первой ($p < 0,01$), что может свидетельствовать об изменениях в белковом обмене и более эффективным удалении азотистых соединений.

Уровень общего белка в крови животных третьей группы был на 7,5 % ниже, чем в контрольной. Это может указывать на изменения в его синтезе или метаболизме при увеличении кровности по породе дорпер. Одновременно содержание альбуминов в крови особей третьей группы было выше, чем в контрольной, на 8,99 % ($p < 0,05$), что может свидетельствовать о повышении интенсивности обмена веществ. При этом содержание глобулинов в крови животных третьей группы также было ниже, чем у баранчиков первой группы, на 8,99 %. Концентрация глюкозы у особей с $\frac{1}{4}$ кровности по эдильбаевской породе была больше, чем у чистопородных овец, на 12,5 % ($p < 0,05$), что может отражать улучшение углеводного обмена. В то же время уровень мочевины у них был на 70,6 % ($p < 0,001$) ниже, чем в первой, что свидетельствует о глубокой перестройке азотистого обмена.

Особого внимания заслуживает уровень кальция. У полукровных овец второй группы концентрация кальция была больше, чем у чистопородных, на 84,3 % ($p < 0,001$), у животных третьей группы – на 70,0 % ($p < 0,001$). Это может свидетельствовать об улучшенной способности к минерализации костной ткани или изменениях в обмене минералов, связанных с генотипом дорпер. Концентрация железа, по сравнению с контрольной группой, также увеличилась: во второй – на 24,4 % ($p < 0,05$), в третьей – на 52,0 % ($p < 0,001$), что указывает на повышенную активность кроветворения и метаболических процессов.

Обобщая изложенное, можно отметить, что скрещивание приводит к значительным изменениям в биохимических показателях крови овец. Эффект гетерозиса проявляется в увеличении активности метаболических процессов, особенно в белковом и углеводном обмене, а также в улучшении минерального обмена, что выражается в повышении уровня кальция и железа в крови. Такие изменения могут быть результатом лучшей приспособляемости помесных овец к условиям содержания, а также повышенной физиологической устойчивости, что, вероятно, связано с увеличением доли крови породы дорпер.

Лучшие результаты молодняка второй группы, могут быть объяснены преимуществами гетерозиса, которые характерны для помесных животных. У него, вероятно, произошло оптимальное сочетание генетических харак-

теристик обеих пород: от эдильбаевской полукровные помеси унаследовали высокую устойчивость к стрессам и приспособленность к местным условиям, а от породы дорпер – ускоренные темпы роста, более высокие показатели мясной продуктивности и улучшенные метаболические процессы. Это подтверждается как увеличением живой массы в возрасте 4 месяцев, так и улучшением таких биохимических показателей, как уровень альбуминов, глюкозы, кальция и мочевины, что свидетельствует о более эффективном обмене веществ, усилении анаболических процессов в организме и активный рост тканей. Меньшая эффективность скрещивания в третьей группе может быть связана с несбалансированностью генетических характеристик и отсутствием эффекта гетерозиса.

Выводы. Полукровный молодняк ($\frac{1}{2}$ эдильбаевская $\times$ $\frac{1}{2}$ дорпер) продемонстрировал лучшие показатели живой массы по сравнению с чистопородными эдильбаевскими баранчиками. Разница составила 3,9 кг, или 10,3 % ($p < 0,05$), что подчеркивает значительное влияние межпородного скрещивания на повышение продуктивности. В группе из животных с $\frac{1}{4}$ кровности эдильбаевской породы прирост живой массы был менее выраженным – только 0,4 кг, или около 1 %, что свидетельствует о меньшей эффективности увеличения доли породы дорпер.

Такие изменения обусловлены значительным улучшением гематологических и биохимических показателей крови, которое свидетельствует о более активных метаболических процессах и росте тканей. У полукровных животных количество эритроцитов снижалось, по сравнению с контрольной группой, на 8,0 % ($p < 0,05$), уровень гемоглобина возрастал на 16,9 % ($p < 0,05$), уровень лимфоцитов был ниже на 7,6 % ($p < 0,05$), доля гранулоцитов – выше на 4,88 % ($p < 0,05$), количество альбуминов увеличивалось на 7,48 % ($p < 0,05$), концентрация глюкозы – на 39,8 % ($p < 0,01$), одновременно наблюдалось снижение уровня мочевины на 48,4 % ($p < 0,01$). Уровень кальция в крови особей этой группы был выше, чем в контрольной, на 84,3 % ($p < 0,001$), железа – на 24,4 %.

Литература.

1. Вектор развития овцеводства в мире и России / В. И. Трухачев, А. И. Ерохин, Ю. А. Юлдашбаев и др. // Овцы, козы, шерстяное дело. 2023. № 4. С. 3–9. doi: 10.26897/2074-0840-2023-4-3-9.
2. Амерханов Х. А. Современные реалии российского овцеводства // Сельскохозяйственный журнал. 2017. № 10. С. 3–7.
3. Абонеев В. В. О «породе» в породах // Овцы, козы, шерстяное дело. 2016. № 4. С. 50–55.
4. Продуктивные и биологические особенности баранчиков эдильбаевской породы разных генотипов, разводимых в аридных условиях Нижнего Поволжья / И. Ф. Горлов, Г. В. Федотова, М. И. Сложенкина и др. // Овцы, козы, шерстяное дело. 2019. № 2. С. 2–4.
5. Любимова А. И., Фалалеева А. А., Стройнова С. Ю. Рост и развитие молодняка овец эдильбаевской породы от рождения до отбивки в условиях Среднего Поволжья // Зоотехния. 2013. № 1. С. 28.
6. Лакота Е. А. Сохранение генетического потенциала овец ставропольской породы для зоны сухой степи Поволжья // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 3 (51). С. 179–184.
7. Юлдашбаев Ю. А., Абдулмуслимов А. М., Сазонова И. А. Аминокислотный состав мяса баранчиков дагестанской горной породы и их помесей // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 5. С. 63–66.
8. Микроструктурный анализ качества мяса баранчиков, полученных от овцематок отечественной репродукции и баранов-производителей импортной селекции в зависимости от генотипа / Е. Д. Карпова, А. И. Суков, А. А. Омаров, и др. // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 11. С. 55–58.
9. Взаимосвязь между развитием внутренних органов у молодняка овец и биохимическими показателями сыворотки крови // А. В. Паитецкая, А. П. Марынич, П. С. Остапчук и др. // Аграрный вестник Урала. 2020. № 6 (197). С. 73–80.
10. Боголюбова Н. В., Рыков Р. А. Влияние некоторых эндогенных факторов на биохимический и клинический статус овец // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38. № 5. С. 29–36.
11. Dehghani-Samani A., Madreseh-Ghahfarokhi S. Evaluation of performance rate, some hematological and biochemical parameters in Iranian afshari breed fattened sheep fed diet containing gundelia (*Gundelia tournefortii* L.) // Iraqi Journal of Veterinary Sciences. 2019. Vol. 33. No. 1. P. 33–38.

Поступила в редакцию 22.08.2024

После доработки 15.09.2024

Принята к публикации 08.10.2024

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

УДК 631.37

DOI 10.31857/S2500262724050091 EDN SIOMHY

БЕСТРАКТОРНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ – МЕЖОТРАСЛЕВАЯ СКВОЗНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

© 2024 г. А. А. Завражнов, кандидат технических наук,
А. И. Завражнов, доктор технических наук, академик РАН

Мичуринский государственный аграрный университет,
393760, Тамбовская обл., Мичуринск, ул. Интернациональная, 101
E-mail: noc-inteh@yandex.ru; aiz@mgau.ru

Исследования проводили с целью выявления преимуществ «бестракторного земледелия» как межотраслевой сквозной технологии на примере промышленного садоводства и питомниководства. Парадигма «бестракторного земледелия» декларирует отказ от применения классических тракторов тяговой и тягово-энергетической концепции и определяет переход к мобильным энергетическим модулям-трансформерам энергетической концепции. Принципы энергетической концепции определяют максимально возможное использование мощности двигателя для полезного перемещения и выполнения рабочих процессов, что обеспечивает высокую эффективность «бестракторного земледелия». Использование вместо тракторов наборов мобильных энергетических модулей-трансформеров электроприводного типа в комплекте с технологическими модулями обеспечивает максимальное технико-технологического оснащение отраслей сельского хозяйства для любых условий и различных технологических операций, что особенно востребовано в отрасли промышленного садоводства и питомниководства. Межотраслевой характер нового технологического направления позволяет эффективно использовать изделия «бестракторного земледелия» и в других отраслях сельского хозяйства (овощеводство, селекция и семеноводство), а также в коммунальной и городской логистике. Примером практической реализации отдельных элементов «бестракторного земледелия» в промышленном садоводстве может служить действующий макет-демонстратор садового e-Дрона с пилотным названием «Русский челнок», созданный в Инжиниринговом центре ИнТех ФГБОУ ВО Мичуринского государственного аграрного университета. Это изделие с грузоподъемностью до 1000 кг и рабочей скоростью от 0 до 30 км/ч предназначено для сбора и транспортировки плодов. Отличительная особенность садового e-Дрона «Русский челнок» – использование 2 электроприводных мостов массового производства мощностью 1,2 кВт, что значительно снижает его стоимость (в 10 раз) по сравнению с существующими зарубежными самоходными садовыми платформами.

**TRACTOR-FREE AGRICULTURE IS AN INTERSECTORAL
END-TO-END TECHNOLOGY OF AGRICULTURE**

A.A. Zavrazhnov, A. I. Zavrazhnov

Michurinsk State Agrarian University,
393760, Tambovskaya obl., Michurinsk, ul. Internatsional'naya, 101
E-mail: noc-inteh@yandex.ru, aiz@mgau.ru

The article presents a new technological direction – «tractor-free agriculture». Its advantages are proved and the attributes that translate this technological direction into the category of intersectoral end-to-end technology are determined. The paradigm of «tractor-free farming» declares the rejection of the use of classic tractors of traction and traction-energy concepts and defines the transition to mobile energy modules-transformers of the energy concept. The principles of the energy concept determine the maximum possible use of engine power for useful movement and execution of work processes, which ensures high efficiency of «tractor-free farming». The use of sets of mobile power transformer modules of electric drive type, complete with technological modules, instead of tractors, ensures maximum technical and technological equipment of agricultural industries for all conditions and various technological operations. The authors have proved that «tractor-free farming» is the most effective in the field of industrial horticulture and nursery farming, characterized by a wide range of conditions and a variety of technological operations performed. The article provides examples of basic configurations and technical appearance of «tractor-free farming» products for the industrial horticulture and nursery industry. The intersectoral nature of the new technological direction makes it possible to effectively use products of «tractor-free agriculture» in other sectors of agriculture – vegetable growing, breeding and seed production, as well as in municipal and urban logistics. An example of the practical implementation of individual fragments of «tractor-free farming» products in industrial gardening can be an existing model demonstrator of a garden e-Drone, with the pilot name «Russian Shuttle», created at the INTECH Engineering Center of the Michurinsk State Agrarian University. This product with a load capacity of up to 1000 kg and an operating speed from 0 to 30 km/h is designed for harvesting and transporting fruits. A distinctive feature of the Russian Shuttle garden drone is the use of 2 mass-produced electric drive bridges with a capacity of 1.2 kW, which significantly reduces its cost (by 10 times) compared to existing foreign self-propelled garden platforms.

Ключевые слова: сквозная технология, тяговая, тягово-энергетическая и энергетическая концепции, бестракторное земледелие, садоводство, питомниководство, электроприводные модули-трансформеры, технологические модули.

Keywords: end-to-end technology, traction, traction-energy and energy concepts, tractor-free agriculture, electric drive transformer modules, technological modules.

На сегодняшний день одно из стратегических направлений развития экономики – обеспечение технологического суверенитета на основе освоения и реализации так называемых критических и сквозных технологий в различных сферах материального производства, включая сельское хозяйство (https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_447895).

Сквозные технологии – это перспективные технологии межотраслевого назначения, обеспечивающие создание инновационных продуктов и сервисов и оказывающие существенное влияние на развитие экономики, радикально меняя существующие рынки и (или) способствуя формированию новых рынков. Они определяют перспективный облик экономики и отдельных отраслей в течение ближайших 10...15 лет.

Необходимость освоения сквозных технологий и реализация на их основе проектов технологического суверенитета закреплены в проекте Федерального закона «О технологической политике в Российской Федерации». Кроме того, согласно этому документу, основные цели и задачи технологической политики заключаются в «обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации и конкурентоспособности отечественной высокотехнологичной продукции и эффективности ее производства за счет технологических инноваций на основе разработки и внедрения критических и сквозных технологий, путем формирования собственных линий разработки».

Перечень сквозных технологий опирается на научно-технологический прогноз (форсайт) и формируется на основе прозрачных процедур, устанавливаемых законодательством Российской Федерации. В отборе технологий должны участвовать ФГБУ «Российская академия наук», научное и образовательное сообщества, объединения предпринимателей.

В представленной работе к обсуждению предлагается новое технологическое направление, обозначенное как

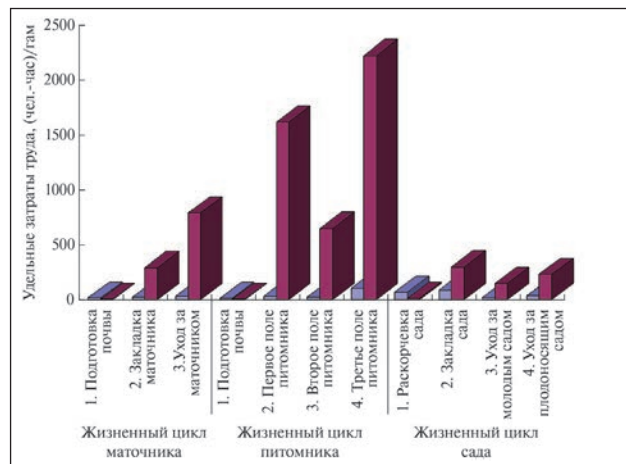


Рис 1. Удельная трудоемкость технологических операций в промышленном садоводстве: ■ – механизированный труд; ■ – ручной труд.

«Межотраслевая сквозная технология «Бестракторное земледелие». К его предметной области относятся отрасли сельского хозяйства, требующие выполнение широкого спектра разнообразных технологических операций с незначительными энергозатратами [1]. В сельском хозяйстве к их числу относятся садоводство, питомниководство (садовое, лесное, ландшафтное), овощеводство, семеноводство и селекция.

Межотраслевой характер нового технологического направления позволяет эффективно использовать изделия «бестракторного земледелия» и в других отраслях экономики, например, в коммунальной и городской логистике. Широта, разнообразие и перспективность «бестракторного земледелия» на полном основании позволяет отнести это направление к категории межотраслевой сквозной технологии, а работы по ее созданию

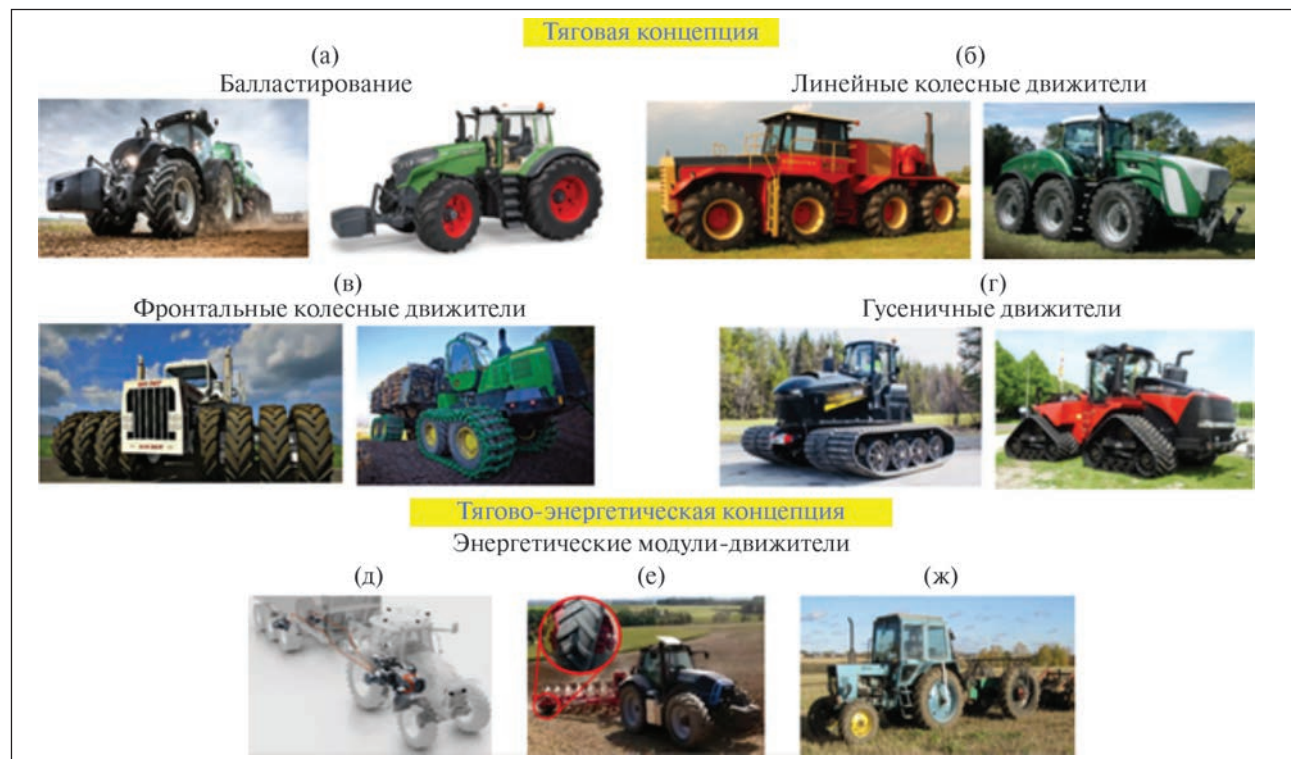


Рис. 2. Способы повышения эффективности тракторов тяговой и тягово-энергетической концепции.

и освоению признать актуальными и весьма востребованными.

Цель исследования – выявление преимуществ «бестракторного земледелия» как межотраслевой сквозной технологии на примере промышленного садоводства и питомниководства.

Методика. В основе парадигмы «бестракторного земледелия» лежат прогнозы Станислава Лема, высказанные им в философско-технологических трактатах «Сумма технологий» и «Непобедимый», в которых подробно раскрыта идея возможности создания сложного технического объекта любого предназначения путем разнообразного соединения роботизированных микро-модулей. По его мнению, что-то «технически большое» образуется как синергетическая сумма миниатюрных автономных компонентов, имеющих генетически заложенное в них стремление к объединению. В «бестракторном земледелии» что-то «технически большое» – это агрегаты для выполнения определенной технологической операции, а миниатюрные автономные компоненты – это автономные энергетические и технологические модули, пригодные для самостоятельной работы.

Классическое тракторное земледелие, основанное на тяговой концепции (то есть использовании трактора как тягового энергетического средства), достигло предела в своем развитии, так как дальнейшее повышение эффективности и производительности ограничивается тягово-сцепными свойствами трактора (трактор – англ. tractor от лат. trahere – тащить, тянуть), который может превращать в действительное тяговое усилие только 20...30% своей энергии. Противоречия между требованиями агротехники и развитием функциональных свойств трактора на основе тяговой концепции достигли своего критического состояния и создают объективные трудности для дальнейшего совершенствования.

При формировании новой технологической парадигмы авторы опирались на ряд научных и методологических принципов, определяющих современное развитие сельскохозяйственной техники, а именно:

принципы гравитационного и реактивного земледелия [2], которые предлагают использовать движители сельскохозяйственных машин как рабочие органы;

принципы тягово-энергетической и энергетической концепции тракторного земледелия [3], позволяющие повысить тягово-сцепные свойства и мобильность сельскохозяйственных машин;

принципы мостового земледелия и порталных систем в растениеводстве [4], позволяющие формировать конфигурацию высококлиренсных мобильных энергетических средств в плодоводстве и овощеводстве;

принципы блочно-модульного формирования техники [5], обеспечивающие эффективное построение разнообразных вариантов и компоновок сельскохозяйственных машин на базе унифицированных узлов и агрегатов;

принципы использования электроприводных мехатронных систем [6], позволяющие обеспечить эффективное управление работой сельскохозяйственных машин и их адаптацию к самым различным условиям эксплуатации;

принципы беспилотного транспорта [6], позволяющие обеспечить самостоятельную работу сельскохозяйственных машин в автономном режиме;

принципы групповой робототехники [7], на основе которых можно организовать работу автономных машин-роботов по единой технологической схеме;

принципы кастомизации и персонализации (клиентоориентированности), формирующие бизнес-модели сельхозмашиностроения в условиях цифровой транс-

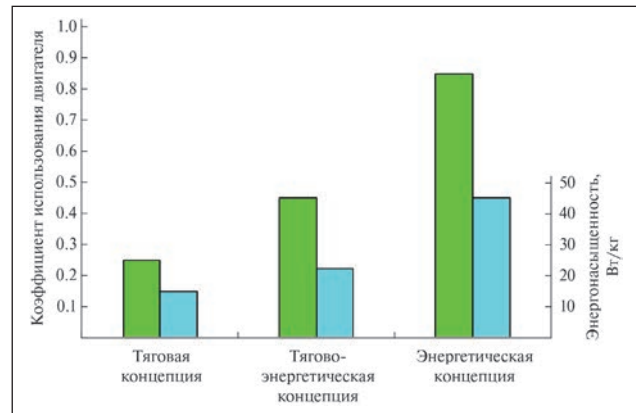


Рис. 3. Показатели эффективности тяговой, тягово-энергетической и энергетической концепций:

■ – коэффициент использования двигателя;
■ – энергонасыщенность.

формации экономики, определяющие оперативную адаптацию и создание необходимой техники для разнообразных условий и требований потребителя [8].

Использование перечисленных научных и методологических принципов позволило авторам создать новое технологическое направление – межотраслевую сквозную технологию «бестракторное земледелие» и претворить идеи Станислава Лема в реальность.

Результаты и обсуждение. Наибольший эффект от применения нового технологического направления «бестракторное земледелие» может быть достигнут в отраслях промышленного садоводства и питомниководства.

Отличительная особенность отрасли отечественного промышленного садоводства и питомниководства – наличие разнообразных природно-климатических условий и, соответственно, различных технологических и производственных схем, определяющих значительные трудозатраты при выполнении технологических операций [9]. Причем практически во всех производственных циклах и технологических операциях преобладает ручной труд (рис. 1). Это указывает на острую необходимость соз-

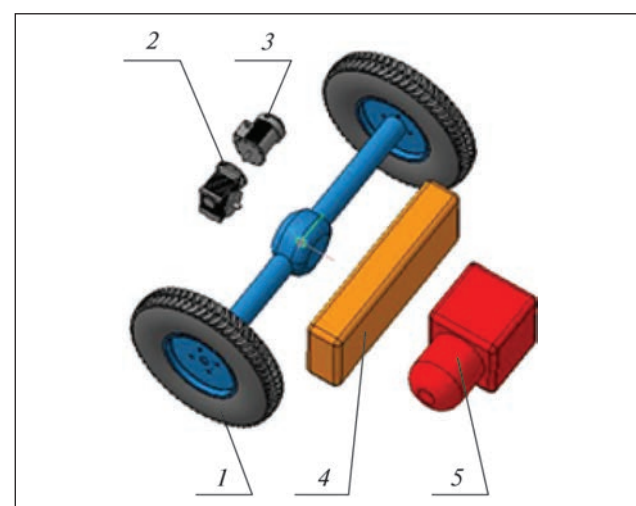
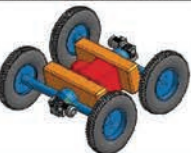
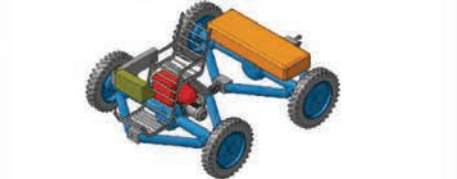
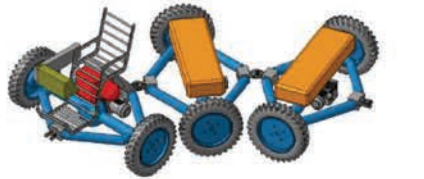
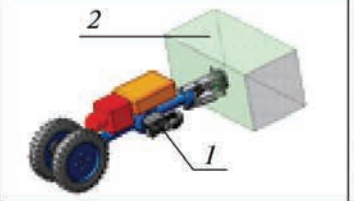
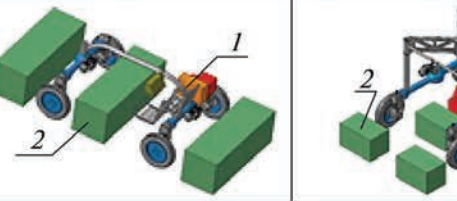
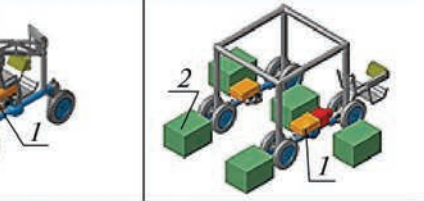
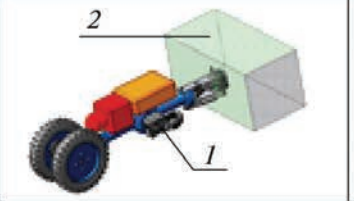
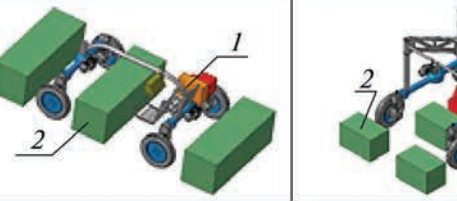
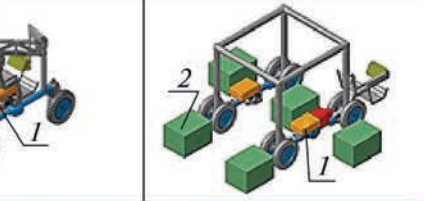
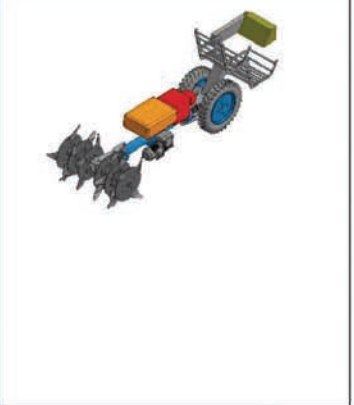
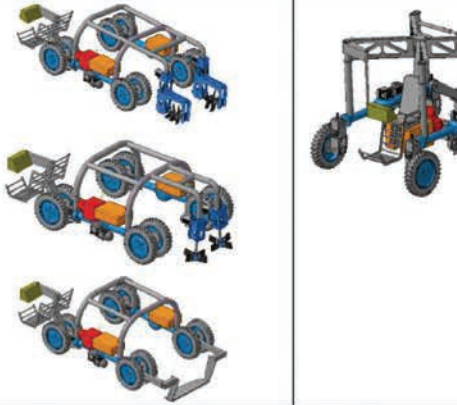
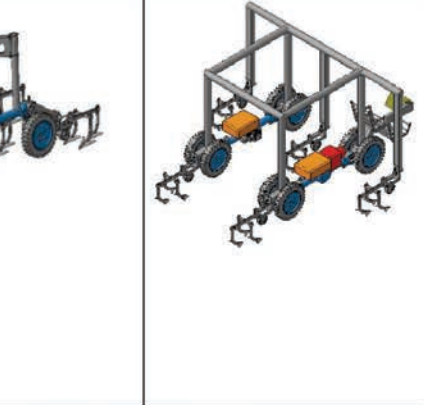


Рис. 4. Базовая комплектация энергетических модулей электроприводного типа изделий «бестракторного земледелия»: 1 – порталный мост; 2 – понижающий редуктор; 3 – низковольтный бесколлекторный электродвигатель с системой управления; 4 – комплект аккумуляторных батарей; 5 – ДВС-генератор.

Табл. 2. Базовые конфигурации и технический облик изделий «бестракторного земледелия» для отрасли промышленного садоводства и питомниководства

Базовая конфигурация энергетических модулей-трансформеров электроприводного типа eMT								
продольная схема			поперечная схема					
								
Технический облик мобильных энергетических изделий «бестракторного земледелия»								
одно-мостовая схема		двух-мостовая схема		трех-мостовая схема				
								
средне-клиренсная схема			высоко-клиренсная схема					
								
Базовая конфигурация энергетических модулей-трансформеров eMT в комплекте с технологическими модулями ТМ								
								
1 –модуль-трансформер (eMT); 2 –технологический модуль (ТМ)								
Технический облик изделий «бестракторного земледелия» для работы в питомниках								
								
Технический облик изделий «бестракторного земледелия» для работы в садах								
самоходная садовая платформа	робот-сборщик					садовый e-Дрон для уборки и транспортировки плодов		
								

дания и обеспечения парка машин и орудий для всего диапазона условий и технологий промышленного садоводства и питомниководства.

Ассортимент и разнообразие машин и орудий для отрасли закреплены нормативными документами. Так, отечественной Системой машин на 1986–1995 гг. только для садов экстенсивного и нормального типа было предусмотрено 15 машинно-технологических комплексов, содержащих 70 наименований машин, выполняющих более 160 технологических операций. Система машин для плодоводства Республики Беларусь, утвержденная в 2014 г., предусматривает 11 машинно-технологических комплексов, содержащих 137 наименований машин и орудий.

Для агрегатирования всего разнообразия машин и орудий используются как тракторы общего сельскохозяйственного назначения, так и специализированные садовые и питомниководческие тракторы, снабженные передним и задним (а иногда и боковым) навесными устройствами, а также валом отбора мощности. Садовые и питомниководческие тракторы должны обладать реверсивностью управления (для работы с погрузчиками), герметичностью кабины (для работы с опрыскивателями), малыми габаритами по ширине и высокой изодиметрией (для работы в узких междурядьях), высоким клиренсом (для работы в питомниках и маточниках).

Специфические особенности отрасли промышленного садоводства и питомниководства приводят к чрезмерному увеличению парка тракторов, машин и орудий, что предопределяет необходимость пересмотра подходов к энергетическому обеспечению механизированного выполнения технологических процессов и операций.

Одно из направлений повышения эффективности применения тракторов – увеличение их тягово-сцепных свойств. Для классических тракторов тяговой концепции такая задача решается путем использования следующих мер:

- дополнительное увеличение сцепного веса – балластирование (рис. 2а);
- дополнительная линейная компоновка колесных движителей (рис. 2б);
- дополнительная фронтальная компоновка колесных движителей (рис. 2в);
- применение гусеничных движителей (рис. 2г).

Для тракторов тягово-энергетической концепции увеличение тягово-сцепных свойств обеспечивается следующим образом:

- использование активных рабочих органов агрегируемого орудия (рис. 2д);
- использование дополнительного привода от ВОМ трактора на опорные колеса агрегируемого орудия (рис. 2е);
- использование дополнительного транспортно-технологического модуля с приводом от ВОМ трактора (рис. 2ж).

Наиболее перспективное направление – развитие тракторов на принципах энергетической концепции [2, 3], на основании которой движители трансформируются в рабочие органы, а классические тракторы – в мобильные энергетические средства-модули (МЭС). При реализации энергетической концепции, в отличие от тяговой и тягово-энергетической, практически вся мощность двигателя расходуется на полезное перемещение и выполнение рабочих операций: коэффициент использования двигателей повышается в 2...5 раз, а энергонасыщенность – в 2...3 раза (рис. 3).

Энергетическая концепция подразумевает максимально возможное использование мощности двигателя для полезного перемещения и выполнения рабочих процессов, что позволяет формировать мобильные энергетические модули в комплекте с технологическими модулями любой конфигурации для работы в самых разнообразных условиях и выполнения любой технологической операции. Исходный концептуальный принцип «бестракторного земледелия» заключается в отказе от применения трактора как единственно возможного мобильного энергетического средства и переходе к наборам энергетических модулей-трансформеров электроприводного типа в комплекте с технологическими модулями, конфигурация и технический облик которых определяется условиями и видами технологических операций [1]. Отличительная особенность нового технологического направления – возможность использования хорошо зарекомендовавших себя на практике серийных компонентов массового производства (рис. 4) при формировании энергетических модулей-трансформеров, что обеспечивает их кастомизацию и бюджетирование [1, 10, 11].



Рис. 5. Садовый е-Дрон «Русский челнок».

Для промышленного садоводства и питомниководства базовые конфигурации изделий «бестракторного земледелия» включают энергетические модули-трансформеры электроприводного типа еМТ в комплекте с технологическими модулями ТМ, что позволяет охватить весь спектр условий и технологических операций (табл. 2).

Концепция и принципы «бестракторного земледелия» позволяют оперативно и с минимальными финансовыми затратами обеспечить потребное количество машин и орудий для самых различных условий и технологий, что определяет это направление как «межотраслевую сквозную технологию». Примером практической реализации отдельных элементов «бестракторного земледелия» может служить действующий макет-демонстратор садового е-Дрона с пилотным названием «Русский челнок», созданный в Инжиниринговом центре ИнТех ФГБОУ ВО Мичуринского государственного аграрного университета (рис. 5). Это изделие с грузоподъемностью до 1000 кг и рабочей скоростью от 0 до 30 км/ч предназначено для сбора и транспортировки плодов. Отличительная особенность садового е-Дрона «Русский челнок» – использование 2 электроприводных мостов массового производства мощностью 1,2 кВт, что значительно снижает его стоимость (в 10 раз) по сравнению с существующими зарубежными самоходными садовыми платформами (в России такие платформы не производят).

Выводы. Исходным концептуальным принципом «бестракторного земледелия» служит отказ от применения трактора как единственно возможного мобильного энергетического средства и переход к наборам энергетических модулей-трансформеров электроприводного типа в комплекте с технологическими модулями, конфигурация и технический облик которых определяется условиями и видами технологических операций. Такой подход полностью обеспечивает технико-технологическое оснащение отрасли промышленного садоводства и питомниководства на всем диапазоне выполнения технологических операций. Универсальный характер методов «бестракторного земледелия» позволяет применять их во многих отраслях сельского хозяйства.

Литература.

1. Завражнов А. А., Завражнов А. И., Ланцев В. Ю. Принципы бестракторного земледелия в современном сельском хозяйстве // *Цифровизация агропромышленного комплекса: сборник научных статей II Международной научно-практической конференции. Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2020. Т. 1. С. 287–292.*
2. Гайко С. Н. Почвообрабатывающие рабочие органы – движители. *Зерноград: Печатно-множительная группа ВНИПТИМЭСХ, 1999. 139 с.*
3. Кутыков Г. М. Развитие технической концепции трактора. *Тракторы и сельхозмашины // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 1. С. 27–35. doi: 10.31992/0321-4443-2019-1-27-35.*
4. Chamen W. C. T., Dowler D., Leede P. R., Longstaff D. J. Design, operation and performance of a gantry system: experience in arable cropping // *Journal of Agricultural Engineering Research. 1994. Vol. 59. P. 45–60. doi: 10.1006/JAER.1994.1063.*
5. Васильев А. Л. Модульный принцип формирования техники. М.: Изд-во стандартов, 1989. 238 с.
6. Дидманидзе О. Н., Девянин С. Н., Парлюк Е. П. Трактор сельскохозяйственный: вчера, сегодня, завтра // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020. № 21 (1). С. 74–85. doi: 10.30766/2072-9081.2020.21.1.74-85.*
7. Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения / под ред. В. И. Сырымкина. Томск: STT, 2018. 140 с.
8. Жилкин О. Н., Лопаткин Р. В. Массовая кастомизация. Влияние на конкурентоспособность авиастроительных предприятий и развитие их индустриальных моделей // *Вестник Евразийской науки. 2018. Т. 10. № 5. URL: <https://esj.today/PDF/49ECVN518.pdf> (дата обращения: 09.06.2024).*
9. Завражнов А. А., Завражнов А. И., Ланцев В. Ю. Передовые производственные технологии в решении проблем механизации трудоемких процессов в промышленном садоводстве // *Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31. № 8. С. 58–61.*
10. Инновационные технологии и технические средства для промышленного садоводства и питомниководства / А. А. Завражнов, А. Ю. Измайлов, А. И. Завражнов и др. // *Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13. № 4. С. 16–25.*
11. Импортозамещение сельскохозяйственной техники для садоводства / А. И. Завражнов, А. Ю. Измайлов, А. А. Завражнов и др. // *Техника и оборудование для села. 2019. № 1. С. 2–6.*

Поступила в редакцию 19.08.2024

После доработки 14.09.2024

Принята к публикации 08.10.2024

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2024 г. **А. С. Дорохов**, доктор технических наук, академик РАН, **Ю. В. Катаев**, кандидат технических наук, **М. Н. Костомакхин**, кандидат технических наук, **Н. А. Петрищев**, кандидат технических наук, **Е. В. Пестряков**, **А. С. Саяпин**

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ;
109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5
E-mail: dorokhov.vim@yandex.ru

Исследования проводили с целью обоснования разработки устройств и программного обеспечения по управлению техническим состоянием сельскохозяйственной техники с использованием элементов искусственного интеллекта. Применение искусственного интеллекта позволяет внедрить стратегию предиктивного технического обслуживания и ремонта техники C_3 – комплексного подхода, позволяющего определить состояние находящейся в эксплуатации машины, и оценить, когда следует провести техническое обслуживание. Для этого необходимо разработать электронные диагностические устройства и датчики, которые можно объединить в один интеллектуальный информационный комплекс, позволяющий оперативно собирать и обрабатывать большие объемы данных по параметрам технического состояния сельскохозяйственной техники благодаря использованию искусственного интеллекта. Объект исследования – гидромеханическая коробка перемены передач трактора «Кировец». В 2022–2024 гг. были разработаны устройства сбора данных, программное обеспечение и методики оценки технического состояния машин, использующие алгоритмы искусственного интеллекта и нейронных сетей, а также описаны изготовленные цифровые диагностические устройства. На примере анализа параметров работы гидромеханической коробки передач трактора «Кировец» конкретизировано вводимое понятие технического состояния (номинальное, допускаемое, предельное или аварийное), которое основано на расчете с использованием нейронной сети параметра Y_n , определяющего тип возможных работ и сервисного обслуживания. Благодаря мониторингу и анализу параметров работы коробки передач с применением ИИ и непрерывной актуализации технического состояния своевременно проводится техническое обслуживание и ремонт, что обеспечивает управление техническим состоянием и повышение надежности сельскохозяйственных машин, минимизирует отказы и связанные с ними простои техники.

MANAGEMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF AGRICULTURAL MACHINERY USING DIGITAL TECHNOLOGIES

A.S. Dorokhov, Yu. V. Kataev, M. N. Kostomakhin, N. A. Petrishchev, E. V. Pestryakov, A. S. Sayapin

Federal Scientific Agricultural Engineering Center of All-Russian Mechanization Institute,
109428, Moscow, 1-i Institutskii proezd, 5
E-mail: dorokhov.vim@yandex.ru;

The studies were conducted to substantiate the development of devices and software for managing the technical condition of agricultural machinery using elements of artificial intelligence. The use of artificial intelligence makes it possible to implement a strategy for predictive maintenance and repair of C_3 equipment – an integrated approach that allows you to determine the condition of a machine in operation and estimate when maintenance should be carried out. To do this, it is necessary to develop electronic diagnostic devices and sensors that can be combined into a single intelligent information complex that allows you to quickly collect and process large amounts of data on the parameters of the technical condition of agricultural machinery through the use of artificial intelligence. The object of the study is the hydromechanical gearbox of the Kirovets tractor for agricultural and industrial purposes. In 2022–2024, developed data collection devices, software and methods for assessing the technical condition of machines using artificial intelligence and neural network algorithms, and also described the manufactured digital diagnostic devices. Using the example of analyzing the operating parameters of the hydromechanical gearbox of the Kirovets tractor, the introduced concept of technical condition is specified, which consists in calculating the Y_n parameter using a neural network, characterizing the nominal, permissible, limiting or emergency technical condition, and establishing recommendations to the owner on the type of possible work and service. Thanks to monitoring and analyzing the operating parameters of the gearbox using AI and continuous updating of the technical condition, technical maintenance and repair are carried out in a timely manner, which ensures technical condition management and increased reliability of agricultural machinery, minimizes failures and related equipment downtime.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, диагностирование, управление надежностью, искусственный интеллект, мониторинг технического состояния, цифровые технологии, нейронные сети.

Keywords: agricultural machinery, diagnostics, reliability management, artificial intelligence, technical condition monitoring, digital technologies, neural networks.

Для повышения эффективности сельскохозяйственного производства, снижения доли материальных затрат в себестоимости единицы сельскохозяйственной продукции на 20 % и более, необходимо внедрение цифровых инструментов для использования информационных ресурсов, платформ и технологий на сельскохозяйствен-

ных объектах. Повышение эффективности эксплуатации техники путем снижения сверхнормативных затрат на техническое обслуживание и ремонт [1] позволит повысить рентабельность сельхозтоваропроизводителей [2].

Для эффективного управления техническим состоянием эксплуатируемой в агропромышленном комплексе

(АПК) техники необходим переход от стратегии технического обслуживания, регламентированного в зависимости от наработки (C_2), к стратегии обслуживания по состоянию с непрерывным контролем (C_3) благодаря внедрению цифровых технологий мониторинга и самодиагностики [3]. Это позволит оптимизировать процессы исходя из фактического состояния, реализовать методологии надежности-ориентированного технического обслуживания (RCM) и обеспечения безотказности, готовности, ремонтпригодности и безопасности (RAMS) машин [4].

Наиболее перспективное направление для оценки и управления техническим состоянием сельскохозяйственной техники – использование технологий искусственного интеллекта (ИИ) и нейронных сетей (НС) [5]. НС могут самообучаться на данных от датчиков технического мониторинга машин, выявлять закономерности и принимать решения без явно заданных правил, что позволяет использовать их для распознавания образов, состояний, управления процессами, связанными с обработкой больших объемов данных. Это дает возможность исключить сложные аналитические методики планирования технического обслуживания и ремонта согласно стратегии C_2 , которые применяли ранее.

Для управления техническим состоянием сельскохозяйственной техники необходимо внедрение системы цифрового мониторинга и самодиагностики [6]. Для этого следует разработать устройства, которые устанавливаются непосредственно на сельскохозяйственную технику и решают задачи сбора информации, первичного анализа и непосредственного управления в случае нарушений правил эксплуатации; программное обеспечение и технические средства анализа полученной информации для оценки текущего состояния и формирования прогноза дальнейшей эксплуатации.

С экономической точки зрения управление техническим состоянием сельскохозяйственной техники путем внедрения цифровых технологий позволит оптимизировать использование технического ресурса, увеличить фактическую межремонтную наработку на 20...30 %, снизить затраты на сложный ремонт и простои техники на 15...20 %, снизить частоту отказов за срок службы в 2...3 раза, что повысит рентабельность сельскохозяйственного производства и конкурентоспособность продукции [6].

Цель исследования – разработка информационно-диагностических средств и программного обеспечения мониторинга параметров работы, обработки накопленных данных, определения технического состояния контролируемой машины, узла или агрегата с последующим управлением их техническим состоянием для внедрения стратегии C_3 предиктивного технического обслуживания и ремонта с использованием ИИ.

Методика. Основные задачи использования ИИ и НС в целях получения максимального эффекта в области управления техническим состоянием по заранее выбранному критерию (экономическому, техническому, технологическому) заключаются в следующем: сбор данных о параметрах работы машины, узла или агрегата [7]; обработка и анализ полученных данных с использованием ИИ с целью определения текущего актуального технического состояния контролируемого объекта; прогнозирование динамики изменения технического состояния объекта [3]; подготовка или принятие решения (выдача командной информации) об изменении параметров работы и регулировок или необходимости проведения технического обслуживания или ремонта.

Однако при достаточной теоретической и методической проработанности диагностики по переходным процессам для оценки технического состояния с использованием ИИ и НС на сегодняшний день отсутствуют прикладные инструментальные средства, которые можно было бы интегрировать в систему мониторинга для реализации стратегии технического обслуживания и ремонта C_3 [8].

Для мониторинга технического состояния отдельных узлов и агрегатов целесообразно применять функциональные методы диагностирования, которые основаны на анализе и интерпретации работы непосредственно в процессе эксплуатации [2]. Их комбинированное использование позволяет создать комплексную систему мониторинга и поддержания работоспособности сельскохозяйственной техники путем установки средств диагностирования и датчиков для сбора данных о техническом состоянии, а анализ данных с применением алгоритмов ИИ помогает оценить общее техническое состояние и обосновать необходимость ремонтно-обслуживающих воздействий [9].

Рассмотрим функциональные методы на примере диагностирования гидромеханической коробки передач (КП) трактора «Кировец». Сбор данных о параметрах работы с использованием датчиков и записывающих устройств проводится непрерывно во время работы машины. Основным диагностическим устройством при этом служит разработанное в ФНАЦ ВИМ устройство для безразборного интеллектуального мониторинга общего технического состояния КП. Оно осуществляет опрос датчиков температуры, давления и акселерометра в течение 1 с частотой 200 Гц в момент, когда давление в КП при переключении передачи снижается до 0,9 от номинального рабочего давления, в результате чего формируется таблица значений давлений и ускорений, в которой осуществляется поиск максимального и минимального давлений, максимального ускорения торможения и времени переходного процесса восстановления давления. Далее из найденных значений формируется таблица данных для нейросетевого анализа, в которую добавляются показатели других факторов, влияющих на работоспособность КП, например: температура масла в КП при переключении; температура воздуха окружающей среды; минимальное давление масла в КП при переключении; максимальное ускорение разгона трактора при переключении передачи; максимальное ускорение замедления трактора при переключении передачи; время восстановления давления в КП; время падения давления в КП до минимума; скорость вращения ведущего вала КП; номер включаемой передачи.

В перспективе этот набор значений может быть дополнен данными от дополнительных датчиков: разницы температур в радиаторе КП; давления рабочей жидкости в гидроаккумуляторе, во всасывающей магистрали насоса; вибрации корпуса КП; скоростей вращения входного и выходного валов; положения бустеров фрикционных узлов.

Интеллектуальный программный комплекс для FMEA-анализа, разработанный во ФНАЦ ВИМ для управления техническим состоянием сельскохозяйственной техники, включает в себя экспериментальные цифровые средства для сбора данных и контроля загрузки узлов и агрегатов в процессе эксплуатации машины, а также бортовые системы диагностирования и прогнозирования технического состояния с использованием функциональных методов диагностирования (рис. 1).

Для записи, передачи и хранения данных о работе узлов и агрегатов машин разработана схема, в которой



Рис. 1. Интеллектуальный программный комплекс с цифровыми средствами сбора, передачи и анализа диагностических данных технического состояния техники.

счетчики-индикаторы и датчики образуют бортовую информационную сеть, передающую сведения о работе узлов и агрегатов в бортовой компьютер. С использованием НС в бортовом компьютере осуществляется анализ накопленных данных для оценки технического состояния машины и вывод результатов на дисплей оператора. Кроме того, благодаря модулю мобильной связи возможна передача данных в сеть Internet.

Результаты и обсуждение. Исходя из необходимости управления техническим состоянием энергонасыщенных тракторов [2], были разработаны способ

и устройство (счетчик-индикатор) для безразборного интеллектуального мониторинга общего технического состояния механических коробок передач с гидравлической системой управления (рис. 2). Оно состоит из трех модулей и четырех датчиков. По результатам интеллектуального мониторинга с использованием НС оператору в текстовом виде на дисплее выдается характеристика общего технического состояния КП, рекомендации по регулировкам, выбору режимов работ и загрузки трактора, сведения о необходимости проведения сервисного обслуживания трактора, а также на отдельном светодиодном индикаторе аварийный сигнал в случае выхода контролируемых параметров за допустимые предельные значения, проигнорировать который водитель не сможет.

Для реализации разработанного способа безразборного интеллектуального диагностирования коробок перемены передач с гидropоджимными муфтами к узлу контроля давления в КП подключают переходник 5, позволяющий принимать сигнал от штатного датчика КП 6, на переднюю полураму трактора устанавливают модуль 1 с акселерометром, на гидрелинию, соединяющую фильтр и механизм переключения передач, – накладной датчик температуры 4, в кабине оператора – модуль индикации 2 и модуль интеллектуального диагностирования 3, данные с которого передаются на телематический терминал 7. При переключении передач проводится оценка общего технического состояния КП и непрерывности потока мощности по времени переходного процесса изменения давления (T_d) и амплитуде продольных ускорений движения трактора ($-X_{max}$ и X_{max}) (рис. 3). При достижении температуры рабочей жидкости в рекомендуемом производителем рабочем диапазоне, пригодном для высоких нагрузок в 65...90 °C [10], которая измеряется накладным датчиком температуры, микроконтроллер автоматически проводит измерение,

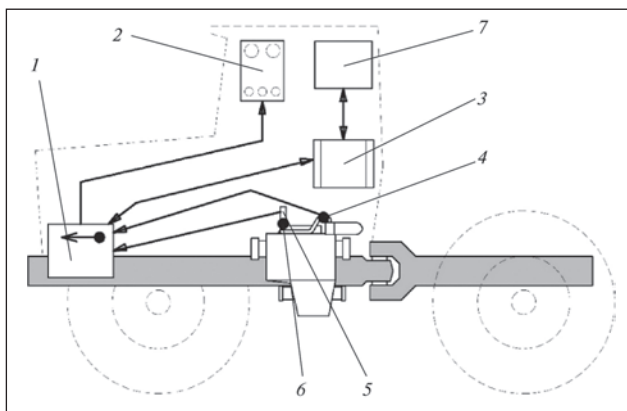


Рис. 2. Схема устройства для интеллектуального мониторинга КП с гидравлической системой управления: 1 – модуль измерений с акселерометром, 2 – модуль индикации, 3 – модуль интеллектуального диагностирования, 4 – накладной датчик температуры, 5 – переходник для подключения к системе контроля давления, 6 – штатный датчик давления, 7 – телематический терминал.

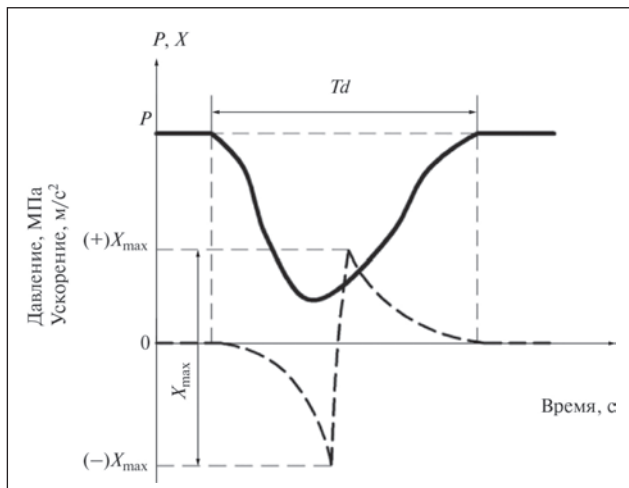


Рис. 3. Переходной процесс изменения давления и ускорения при переключении КП.

вычисление и сравнение полученных данных с установленными диапазонами пороговых значений T_d в КП: 0,25...0,35 с – номинальное; 0,35...0,45 с – допустимое; 0,45...0,55 с – предельное; менее 0,25 с и более 0,55 с – аварийное состояние. После чего в результате анализа, автоматически проводимого в модуле интеллектуального диагностирования, определяется общее техническое состояние узла.

Разработанные для безразборного интеллектуального диагностирования НС представляют собой отдельные многослойные модели, где на входе используются функциональные диагностические параметры работы агрегата, а на выходе формируется параметр оценки его общего технического состояния. На основе поступающей информации формируется база данных параметров работы КП, которая в дальнейшем преобразуется в значения входного слоя НС.

Оценка общего технического состояния системы гидравлического управления КП проводится по таким показателям, как температура масла (T_{oil}), полное время переходного процесса восстановления давления (T_d), минимальное давление при переключении передач КП (P_{min}), максимальное ускорение замедления трактора ($-X_{max}$), максимальное ускорение разгона ($+X_{max}$), ско-

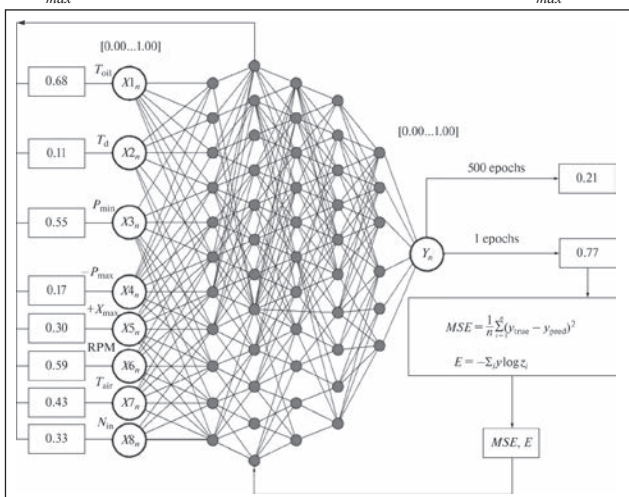


Рис. 4. Алгоритм обучения НС за 500 эпох (epochs) для расчета параметра Y_n , характеризующего оценку общего технического состояния системы гидравлического управления КП.

рость вращения ведущего вала КП (RPM), температура окружающей среды (T_{air}), номер включаемой передачи (Nin), из которых сформирован входной слой нейронов X_n . Из перечисленных показателей, каждый из которых нормализуется масштабированием в диапазоне от минимального значения как 0 до максимального значения как 1 с точностью до второго знака после запятой, формируются входные сигналы X_1-X_8 , которые подаются на вход виртуальной НС, работающей в модуле интеллектуального диагностирования в тракторе (рис. 4). НС рассчитывает выходное значение искомого параметра Y_n , которое интерпретируется как параметр технического состояния (номинальное, допустимое, предельное или аварийное), устанавливающий рекомендации для владельца по типу возможных работ и сервисному обслуживанию.

На основе анализа опыта разработки НС [11] с целью повышения точности, уменьшения времени обучения и снижения объема требуемой диагностической информации при разработке программного обеспечения для диагностического модуля были использованы три вида функции активации нейронов НС, позволяющих преобразовывать входные данные технического контроля КП в искомое значение параметра технического состояния Y_n :

сигмоидальная

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}; \quad (1)$$

гиперболический тангенс

$$f(x) = \tanh(x) = \frac{2}{1 + e^{-x}} - 1; \quad (2)$$

ReLU (пелу)

$$f(x) = \max(0, x). \quad (3)$$

При разработке архитектуры НС, используемой при расчете значения Y_n , для обучения, корректировки, определения весовых коэффициентов модели НС использованы функции среднеквадратичной ошибки (MSE) и Кросс-энтропии (E) [12]:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{true} - y_{pred})^2, \quad (4)$$

$$E = - \sum_i y \ln z_i. \quad (5)$$

Для КП с гидравлическим управлением установлено, что нормализованные параметры X_1-X_4 минимально необходимы для определения общего технического состояния, а использование нормализованных параметров X_5-X_8 при анализе с помощью НС позволяет оценивать влияние внешних температурных условий и более точно определять рекомендации по дальнейшей эксплуатации для управления техническим состоянием.

Значение Y_n в диапазоне от 0 до 0,25 соответствует номинальному техническому состоянию КП – допускается эксплуатация трактора без ограничений; от 0,25 до 0,5 – допустимому, при котором рекомендуется эксплуатировать при средней нагрузке; от 0,5 до 0,75 – предельному, при котором допускается эксплуатация только в транспортном режиме и рекомендуется прохождение внепланового ТО, от 0,75 до 1,0 – аварийному, при котором эксплуатация техники не допускается

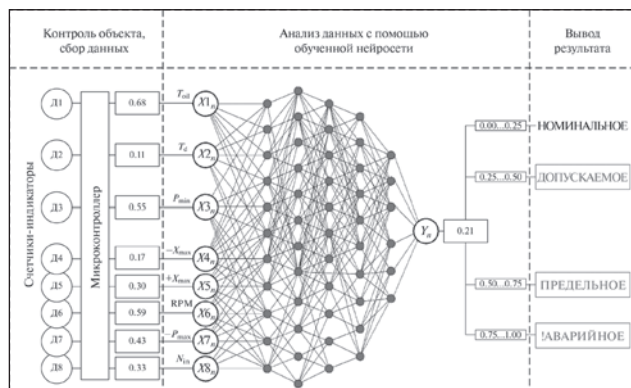


Рис. 5. Схема работы устройства для безразборного интеллектуального мониторинга и оценки общего технического состояния системы гидравлического управления КП.

и необходимо провести ремонт. На основе полученных значений Y_t и актуализации технического состояния КП вырабатываются рекомендации по эксплуатации или ремонту (рис. 5).

Кроме того, благодаря непрерывному мониторингу и диагностированию с использованием устройства для безразборного интеллектуального мониторинга общего технического состояния КП можно, например, своевременно определить следующие аварийные ситуации:

перегрузка или засорение масляного фильтра при температуре масла в КП выше 105 °С (необходимо прекратить эксплуатацию до снижения температуры в рабочий диапазон, проверить масляные фильтры);

падение давления масла в КП при переключении передачи менее 6,0 атм. (признак неисправности гидроаккумулятора, засоренности гидросистемы, износа гидронасоса);

резкое торможение (более 1,7 м/с²) и медленный разгон при переключении передачи КП (признак изношенности фрикционных дисков гидроподжимной муфты);

время восстановления давления при переключении передачи более 0,55 с (признак изношенности гидронасоса).

Цифровой мониторинг и интеллектуальная диагностика с использованием датчиков, диагностических устройств, искусственного интеллекта и НС – один из способов перехода к управлению техническим состоянием машин, узлов и агрегатов, освоения стратегии технического обслуживания и ремонта C_3 путем своевременного определения состояний для обоснования проведения сервисных работ или перераспределения ресурса отдельных узлов и агрегатов техники путем изменения типа работ [13]. При этом анализ получаемых данных о работе техники и минимизация отказов позволяют снизить сверхнормативные расходы с доплатой за срочность на обслуживание и запасные части, а также более эффективно использовать время и имеющиеся ресурсы [14].

Таким образом, при непрерывной работе представленной системы мониторинга и интеллектуальной диагностики появляется возможность оперативно получать информацию о техническом состоянии узлов и агрегатов сельскохозяйственной техники, корректировать время проведения ТО, исходя из фактического технического состояния. Это позволяет обоснованно проводить необходимые ремонтно-обслуживающие воздействия, что повышает надежность и коэффициент готовности техники, а также уменьшает издержки на обслуживание, по нашим оценкам, до 10 %. При этом становится возможным предупреждение параметрических отказов

техники, связанных с плавным износом или ошибками оператора (до 60 % случаев отказов техники), что будет иметь существенный экономический эффект.

Выводы. Для управления техническим состоянием гидромеханической коробки перемены передач трактора «Кировец» и перехода к стратегии C_3 предиктивного технического обслуживания и ремонта разработано информационно-диагностическое средство и программное обеспечение для мониторинга параметров работы, обработки накопленных данных, определения технического состояния с использованием ИИ и НС. Для реализации разработанного устройства и способа для безразборного интеллектуального диагностирования КП проводится оценка и анализ таких диагностических параметров, как время переходных процессов изменения давления в системе управления при переключении передач, амплитуда продольных ускорений трактора, параметры температуры рабочей жидкости, внешней среды, скорости вращения ведущего вала, номера включаемой передачи, на основе которых нейронная сеть рассчитывает выходное значение параметра Y_t технического состояния (номинальное, допускаемое, предельное или аварийное), устанавливающего рекомендации владельцу по типу возможных работ и сервисному обслуживанию. Разработанное устройство и программное обеспечение для безразборного интеллектуального мониторинга общего технического состояния КП с использованием нейронной сети позволяет оперативно определять аварийные режимы в процессе эксплуатации, а также, исходя из фактического технического состояния, проводить предиктивное обслуживание по стратегии C_3 для минимизации отказов и затрат на обслуживание и ремонт.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Результаты научных исследований агроинженерных научных организаций по развитию цифровых систем в сельском хозяйстве / Ю. Ф. Лачуга, А. Ю. Измайлов, Я. П. Лобачевский и др. // *Техника и оборудование для села*. 2022. № 3 (297). С. 2–9. doi: 10.33267/2072-9642-2022-3-2-9.
2. Совершенствование мониторинга системы «Человек-машина-среда» и правил эксплуатации для повышения эксплуатационной надежности тракторов / Н. А. Петрищев, М. Н. Костомахин, А. С. Саяпин и др. // *Технический сервис машин*. 2020. № 3 (140). С. 12–20. doi: 10.22314/2618-8287-2020-58-3-12-20.
3. Ерохин М. Н., Дорохов А. С., Катаев Ю. В. Интеллектуальная система диагностирования параметров технического состояния сельскохозяйственной техники // *Агроинженерия*. 2021. № 2 (102). С. 45–50. doi: 10.26897/2687-1149-2021-2-45-50.
4. Черноиванов В. И., Денисов В. А., Соломашкин А. А. Способ определения остаточного ресурса деталей машин // *Технический сервис машин*. 2020. № 1 (138). С. 50–57. doi: 10.22314/2618-8287-2020-58-1-50-57.

5. Метод дистанционного контроля функциональных показателей сельскохозяйственной техники / В. Е. Таркинский, Н. В. Трубицын, Е. С. Воронин и др. // *Техника и оборудование для села*. 2018. № 12. С. 22–25.
6. Федоренко В. Ф., Таркинский В. Е. Цифровые беспроводные технологии для оценки показателей сельскохозяйственной техники // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. № 1. С. 10–15. doi: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-10-15.
7. Application of Deep Learning in Fault Diagnosis of Rotating Machinery / W. Jiang, C. Wang, J. Zou, et al. // *Processes*. 2021. Vol. 9. No. 919. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/6/919> (дата обращения: 11.06.2024). doi: 10.3390/pr9060919.
8. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России до 2030 года (прогноз) / З. А. Годжаев, В. Г. Шевцов, А. В. Лавров и др. // *Технический сервис машин*. 2019. № 4 (137). С. 220–229.
9. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. № 4. С. 6–10. doi: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
10. Пастухов А. Г., Тимашов Е. П. Диагностирование опорных узлов трансмиссии на основе изучения термонагруженности // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. № 2. С. 61–68. doi: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-61-68.
11. Online monitoring of the technical condition of energy saturated agricultural equipment using neural networks / Y. Kataev, I. Tishaninov, E. Gradov, et al. // *E3S Web of Conferences*. 2023. No. 402. 03026. URL: https://www.e3sconferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/39/e3sconf_transsiberia2023_03026/e3sconf_transsiberia2023_03026.html (дата обращения: 11.06.2024). doi: 10.1051/e3sconf/202340203026.
12. Shao S., Wang P., Yan R. Generative adversarial networks for data augmentation in machine fault diagnosis. *Computers in Industry*. 2019. No. 106. P. 85–93. doi: 10.1016/j.compind.2019.01.001.
13. Костомахин М. Н. Пестряков Е. В. Программный комплекс для дистанционного контроля узлов и агрегатов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. № 4. С. 19–25. doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-4-19-25.
14. Научно-технические достижения агроинженерных научных организаций в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства / Я. П. Лобачевский, Ю. Ф. Лачуга, А. Ю. Измайлов и др. // *Техника и оборудование для села*. 2023. № 3 (309). С. 2–12. doi: 10.33267/2072-9642-2023-3-2-11.

Поступила в редакцию 12.07.2024
После доработки 23.08.2024
Принята к публикации 17.09.2024

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ**

© 2024 г. В. А. Шахов¹, доктор технических наук, П. Г. Учкин¹, кандидат технических наук,
И. М. Затин¹, кандидат технических наук, М. И. Голубев², кандидат технических наук

¹Оренбургский государственный аграрный университет,
460014, Оренбург, ул. Челюскинцев, 14

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Мытищинский филиал,

141005, Московская обл., Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1
E-mail: shahov-v@yandex.ru

В связи с изменениями размеров и геометрической формы рабочих органов почвообрабатывающих машин, эксплуатируемых в условиях абразивной среды, возникает необходимость разработки технологий восстановления и упрочнения их деталей. Цель исследования – определение рациональных режимных параметров лазерной наплавки для формирования оптимальной микроструктуры износостойких покрытий. Лазерные слои, нанесенные наплавкой, исследовали на предмет формирующейся структуры и получившейся твердости. Всего был рассмотрен 121 образец, с использованием которых были проведены эксперименты со следующими комбинациями параметров: мощность лазерного излучения – 2100... 2900 Вт с шагом 200 Вт; скорость перемещения оптической головки (скорость наплавки) – 5...11 мм/с с шагом 2 мм/с; содержание карбида вольфрама в смеси – 45...55 % с шагом 2 %. В качестве износостойкого материала использовали смесь порошков, включающую 43...53 % железной основы, в виде порошка ПГ-С27 «Сормайт», с частицами размером 80 мкм, 45...55 % упрочняющей фазы в виде карбида вольфрама с частицами размером 15 мкм и 2 % нанопорошка оксида алюминия Al_2O_3 с частицами размером 70 нм. Для формирования необходимой дендритно-ячеистой структуры наплавленного износостойкого покрытия ледебуритного типа необходимо соблюдать следующие параметры: мощность лазерного излучения – 2500...2700 Вт, скорость наплавки – 7...9 мм/с, содержание карбида вольфрама – 49...53 % от объема смеси порошков. Рациональные режимные параметры для получения покрытий с повышенной твердостью: скорость наплавки – 7 мм/с; содержание карбида вольфрама в порошковой смеси – 51 %; мощность лазерного излучения – 2700 Вт.

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR RESTORATION AND HARDENING OF WORKING
BODIES OF TILLAGE MACHINES BY LASER SURFACING**

V. A. Shakhov¹, P. G. Uchkin¹, I. M. Zatin¹, M. I. Goloubev²

¹Orenburg State Agrarian University,
460014, Orenburg, ul. Chelyuskintsev, 14

²Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi branch,
141005, Moskovskaya obl., Mytishchi, ul. 1-ya Institutskaya, 1
E-mail: shahov-v@yandex.ru

The article proposes a technology for restoring and strengthening the working bodies of tillage machines, including laser surfacing with a mixture of powders containing tungsten carbide to obtain a wear-resistant work surface. The purpose of the study is to determine the rational operating parameters of laser surfacing for the formation of the microstructure of wear-resistant coatings. The laser layers deposited by surfacing were examined for the resulting structure and the resulting hardness to match the modes of laser surfacing and the indicators of abrasive wear resistance. A total of 121 samples were deposited. A mixture of powders is used as a wear-resistant material, including 43...53 % of the iron base in powder form PG-C27 «Sormayt», with particle sizes of 80 microns, 45...55 % of the hardening phase in the form of tungsten carbide with particle sizes of 15 microns and 2 % aluminum oxide Al_2O_3 nanopowder with particle sizes of 70 nm. During the study of the microstructure, the parameters of the surfacing mode were determined, allowing to achieve the necessary dendritic-cellular structure deposited wear-resistant coating of the ledeburite type: laser radiation power 2500...2700 W, the surfacing speed is 7...9 mm/s, the content of tungsten carbide is 49...53 % of the volume powder mixtures. Theoretical studies of the laser surfacing process aimed at obtaining coatings with increased hardness have made it possible to determine the rational operating parameters for surfacing wear-resistant coatings: the deposition rate is 7 mm/s; the content of tungsten carbide in the powder mixture is 51 %; the laser radiation power is 2700 watts.

Ключевые слова: лазерная наплавка, рабочие органы, износостойкость, твердость, упрочнение, восстановление, карбид вольфрама.

Keywords: laser surfacing, working bodies, wear resistance, hardness, hardening, restoration, tungsten carbide.

Рабочие органы почвообрабатывающих машин эксплуатируются в условиях абразивной среды, что вызывает изменения их размеров и геометрической формы. Исходя из этого, возникает необходимость разработки технологий восстановления и упрочнения деталей с целью повышения долговечности, поскольку ресурс новых рабочих органов не всегда оказывается значительным. Таким образом, разработка технологий

восстановления с одновременным упрочнением рабочих органов почвообрабатывающих машин – актуальная и востребованная задача.

Лазерная наплавка – один из современных методов восстановления изношенных деталей, который становится все более популярным благодаря улучшению доступности оборудования и материалов для его реализации. Среди положительных аспектов лазерной

наплавки можно выделить низкое температурное воздействие на деталь и высокую адгезию наплавленного слоя к основе [1, 2, 3].

Возможности лазерной наплавки позволяют наносить тугоплавкие материалы, тем самым осуществлять упрочнение с использованием порошков, содержащих карбиды металлов, включая карбид вольфрама, который применяют при упрочнении режущего инструмента [4]. Восстановление рабочих органов почвообрабатывающих машин таким методом повышает твердость наплавленного слоя рабочей поверхности детали, по сравнению с традиционными способами восстановления, в среднем на 40...45 %. При этом износостойкость покрытий рабочих органов почвообрабатывающих машин в условиях интенсивного абразивного изнашивания возрастает на 40...50 %. К традиционным способам восстановления относятся наплавка порошка «Сормайт» газовой горелкой и ручная электродуговая наплавка электродами Т-590 и Т-620. При их использовании наблюдается малая глубина проплавления основного металла и небольшая зона термического влияния, так как эти методы реализуются вручную, что позволяет регулировать скорость наплавки и температуру рабочей среды. Однако твердость покрытия при восстановлении традиционными методами составляет порядка 45...50 HRC, тогда как при лазерной наплавке она достигает 65...70 HRC. Благодаря этому долговечность восстановленных и упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих машин при обработке почв с высокой изнашивающей способностью увеличивается в среднем в 1,8...2,1 раза [5, 6].

Цель исследования – определение рациональных режимных параметров лазерной наплавки для формирования оптимальной микроструктуры износостойких покрытий.

Методика. В качестве восстанавливаемой детали возьмем лемех плуга и будем рассматривать процесс восстановления лазерной наплавкой путем придания ему исходной геометрической формы последовательным нанесением слоев.

Восстановление изношенной части лемеха осуществляли следующим образом. Деталь закрепляли на поверхности рабочего стола роботизированной системы, например, TST-LFR 3000 (рис. 1), которая представляет собой компактную и мобильную систему лазерной наплавки на различные поверхности. Основные ее компо-

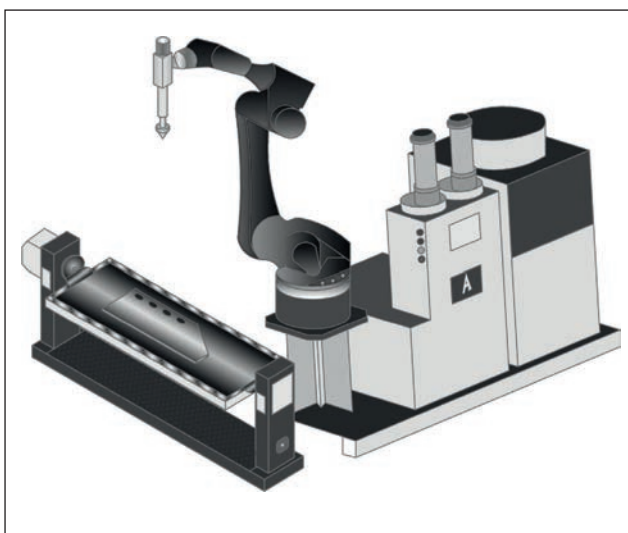


Рис. 1. Роботизированная система наплавки и упрочнения TST-LFR3000.

ненты – мобильный робот, источник лазера мощностью 3000 Вт, система подачи порошка, головка лазерной наплавки, система управления и рабочий стол. Режим наплавки задается системой управления, которая регулирует скорость наплавки, подачу порошка и мощность светового пучка в зависимости от количества подаваемого наплавленного материала. Луч, генерируемый роботизированной системой (лазерным источником), на поверхности изделия создает ванну расплава. В эту зону при помощи транспортирующего газа, который одновременно выступает как защитный, подают порошок.

Луч, температура которого на выходе из сопла достигает 2700 °С, генерируемый лазерным источником, соприкасается со смесью тугоплавких порошков в среде защитного газа. Под действием высокой температуры смесь расплавляется и под высоким давлением равномерно наносится на изношенную поверхность лемеха [7, 8, 9].

Наплавка может осуществляться на следующих режимах: мощность лазерного излучения – 2100...2900 Вт, скорость перемещения оптической головки (скорость наплавки) – 5...11 мм/с, массовый расход порошка – 20 г/мин, расход защитного газа – 14 л/мин. Толщина наплавленного слоя составляет 2±0,1 мм.

Процесс нанесения расплавленного порошка осуществляется пошовно, встык ранее наплавленного шва, с его перекрытием до 25 %. Это необходимо для формирования равномерно восстановленной поверхности лемеха плуга. При нанесении слоев наплавочная головка управляется роботизированной системой, в управляющее устройство которой предварительно закладывается 3D-модель лемеха плуга. Процесс нанесения расплавленного порошка происходит до формирования заданной 3D-модели.

Далее процесс повторяется. При этом расплавленный порошок наносится на ранее сформированный слой металла. Для наплавления, например, 6 мм металла необходимо нанесение трех слоев.

В качестве износостойкого материала используется смесь порошков, включающая 43...53 % железной основы, например, ПГ-С27 «Сормайт», с частицами размером 80 мкм, 45...55 % упрочняющей фазы в виде карбида вольфрама с частицами 15 мкм и 2 % нанопорошка оксида алюминия Al_2O_3 с частицами 70 нм.

Известно, что наиболее эффективно ударно-абразивному трению противостоит слой с ледебуритной структурой дендритно-ячеистого типа [7]. В связи с этим в качестве матрицы наплавленного смеси порошков был выбран ПГ-С27 «Сормайт» с высоким содержанием углерода (4 %), который способствует формированию такой структуры.

Восстановленные лемеха характеризуются высокой твердостью и износостойкостью, что связано с образованием мелкозернистой ледебуритной структуры дендритно-ячеистого типа с включениями твердого карбида вольфрама, обладающей наилучшей сопротивляемостью при абразивном износе. Оксид алюминия в этом случае служит модификатором, благодаря которому образуются дополнительные центры кристаллизации, которые измельчают образующуюся структуру наносимого слоя [10, 11, 12].

Завершающий этап технологии восстановления рабочих органов почвообрабатывающих машин – контроль геометрических параметров. При необходимости проводится механическая обработка углошлифовальной машинкой. Далее выполняется ультразвуковой контроль качества швов и измерение твердости нанесенного слоя металла.

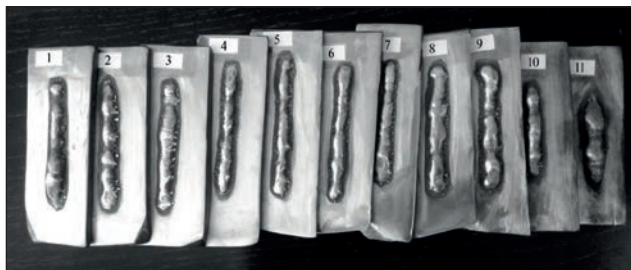


Рис. 2. Швы, полученные лазерной наплавкой при различных режимах.

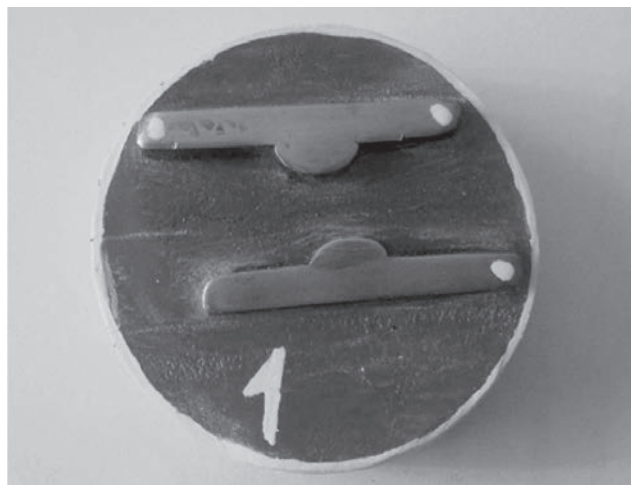


Рис. 3. Микрошлифы, наплавленные лазерной наплавкой при различных режимах и с разным содержанием карбида вольфрама, залитые эпоксидной смолой.

Прежде чем применять технологию непосредственно на лемехах, необходимо провести исследования слоев, формируемых при лазерной наплавке, с целью определения рациональных режимов для получения слоев с наилучшими противоизносными свойствами. Для

этого были изготовлены образцы размером 100×40 мм (рис. 2) из стали марки 65Г, из которой чаще всего делают рабочие органы почвообрабатывающих машин. Всего был проведен 121 опыт. Такое количество позволяет провести эксперименты со всеми комбинациями параметров: мощность лазерного излучения – 2100... 2900 Вт с шагом 200 Вт; скорость перемещения оптической головки (скорость наплавки) – 5...11 мм/с с шагом 2 мм/с; содержание карбида вольфрама в смеси – 45...55 % с шагом 2 %.

Микроструктуру полученного шва исследовали с использованием инвертированного металлографического микроскопа МИКРОМЕД МЕТ на подготовленных микрошлифах (рис. 3). Замеры твердости проводили прибором «ТЕМП-2», согласно ГОСТ 22975-78.

Результаты и обсуждение. В ходе опытов было установлено, что оптимальное содержание карбида вольфрама в смеси составляет 50 %. Превышение этой доли приводит к перенасыщению, что в дальнейшем вызывает разрушение слоя в процессе эксплуатации – вместо естественного износа происходит его выкрашивание.

В зависимости от содержания карбида вольфрама нанесенные слои имеют определенную микроструктуру наплавленного износостойкого покрытия. Покрытия, образованные при низких скоростях охлаждения, характеризуются хорошо выраженной дендритной структурой (рис. 4, а, б). При этом они различаются по количеству центров кристаллизации, что, в свою очередь, влияет на формирование макроструктуры наплавленного металла.

Как и ожидалось, нанесенный слой имел типичную эвтектическую ледебуритную структуру, обладающую высокой микротвердостью. Это свидетельствует об отсутствии мартенситных превращений, что еще раз характеризует малую скорость охлаждения и значительный градиент температуры, обусловленные содержанием большого количества цементита. Формирование такой структуры происходит при следующих режимах наплавки: мощность лазерного излучения – 2100...2300 Вт, скорость наплавки – 5...7 мм/с, содержание карбида вольфрама – 45...47 % от объема смеси порошков.

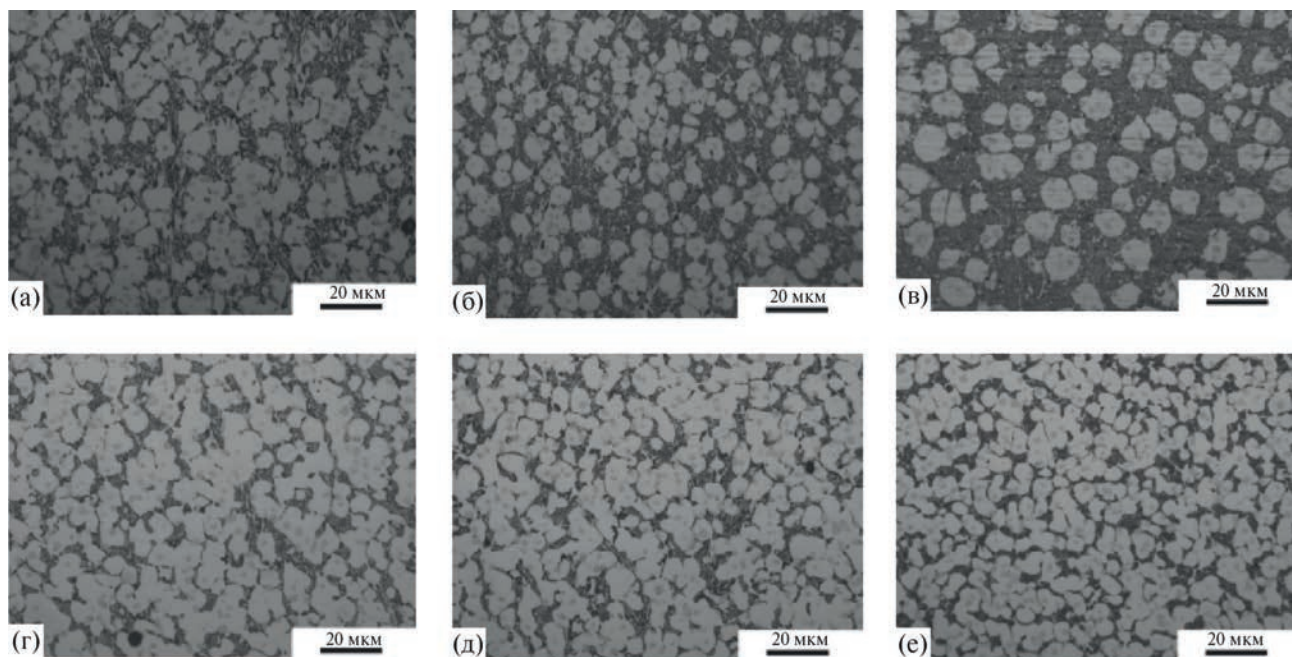


Рис. 4. Микроструктура наплавленного слоя при разном содержании карбида вольфрама в смеси: а) 45 %; б) 47 %; в) 49 %; г) 51 % д) 53 %; е) 55 %.

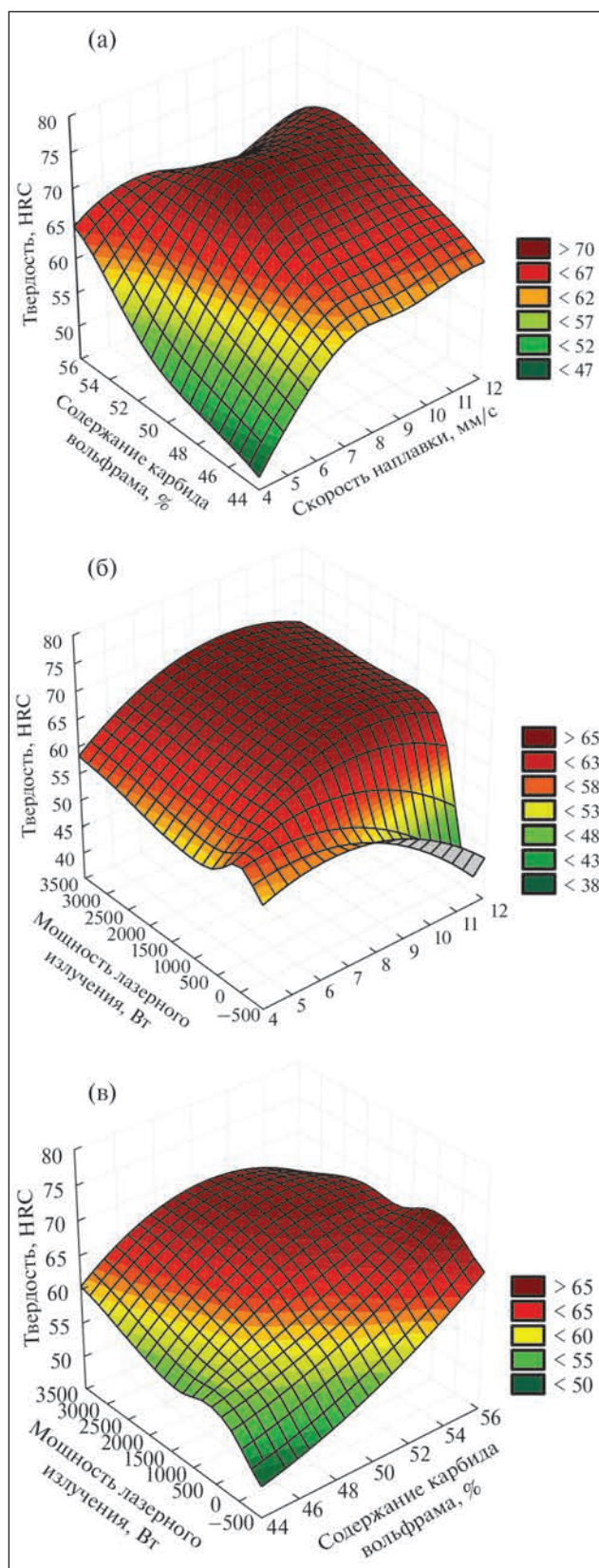


Рис. 5. Зависимость твердости наплавленного слоя: а) от содержания карбида вольфрама в порошковой смеси и скорости наплавки; б) от мощности лазерного излучения и скорости наплавки; в) от мощности лазерного излучения и содержания карбида вольфрама в порошковой смеси.

С увеличением количества карбида вольфрама в смеси происходят изменения структуры наплавленного металла (рис. 4, в, г, д), что связано с ростом количества энергии, необходимой для более полного оплавления всех его частиц. Это способствует образованию ячеек в микроструктуре наплавленного металла из-за увеличения скорости охлаждения нанесенного слоя материала, которую определяет сумма скоростей охлаждения матрицы порошка и карбида. Карбид вольфрама обладает высокой теплопроводностью, что позволяет избежать задержек тепла. Скорость охлаждения нанесенного слоя материала, в свою очередь, будет зависеть от скорости охлаждения ПГ-С27 «Сормайта», доля которого в смеси будет уменьшаться по мере увеличения количества вольфрама. В результате структура наплавленного металла принимает необходимую дендритно-ячеистую форму. Для ее достижения режимы наплавки должны находиться в следующих пределах: мощность лазерного излучения – 2500...2700 Вт, скорость наплавки – 7...9 мм/с, содержание карбида вольфрама – 49...53 % от объема.

Дальнейшее увеличение содержания карбида способствует повышению скорости охлаждения и снижению температурного градиента, что приводит к формированию ячеистой структуры (рис. 4е). Для получения данной структуры режим наплавки имеет следующие значения: мощность лазерного излучения – 2900 Вт, скорость наплавки – 11 мм/с, содержание карбида вольфрама – 55 % от объема.

По результатам измерения твердости наплавленного слоя, которая варьировала в интервале 52,7...78,2 HRC, были построены поверхности отклика для определения рационального режима наплавки при восстановлении лемехов плугов. При варьировании содержания карбида вольфрама в порошковой смеси и скорости наплавки (рис. 5а) наибольшая твердость наплавленной поверхности отмечена при величинах этих показателей соответственно 51...53 % и 7...9 мм/с.

Результаты анализа поверхности отклика, характеризующей зависимость твердости наплавленной поверхности от мощности лазерного излучения и скорости наплавки (рис. 5б), свидетельствуют, что наибольшая твердость достигается при следующих значениях: мощность лазерного излучения – 2300...2500 Вт, а скорость наплавки – 7...9 мм/с.

При варьировании мощности лазерного излучения и содержания карбида вольфрама в порошковой смеси (рис. 5в) наилучшие результаты отмечены при величинах этих параметров соответственно 2300...2500 Вт и 51...53 %.

В целом рациональными режимными параметрами плазменной наплавки износостойких наплавленных покрытий следует считать скорость наплавки – 7 мм/с; содержание карбида вольфрама в порошковой смеси – 51 %; мощность лазерного излучения – 2700 Вт.

Выводы. Формирование необходимой дендритно-ячеистой структуры ледебуритного типа износостойких наплавленных покрытий возможно при следующих параметрах режима наплавки: мощность лазерного излучения – 2500...2700 Вт, скорость наплавки – 7...9 мм/с, доля карбида вольфрама в смеси порошков – 49...53 % от объема.

Рациональные режимные параметры для наплавки износостойких покрытий с наибольшей твердостью достигаются при скорости наплавки – 7 мм/с; содержании карбида вольфрама в порошковой смеси – 51 %; мощности лазерного излучения – 2700 Вт.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств федерального бюджета по теме научного исследования «Разработка новых технологий применения плазмы, 3D и аддитивных технологий для повышения долговечности сельскохозяйственной техники», регистрационный номер № 1022071200009–4–2.3.1. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Современные методы лазерной наплавки жаропрочных коррозионностойких материалов / Е. М. Биргер, Г. В. Москвитин, А. Н. Поляков и др. // Сварочное производство. 2018. № 7. С. 37–48.
2. Shakhov V., Uchkin P., Aristanov M. Study of the Microstructure of Weld Metal Obtained by Plasma Surfacing // Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2022): Agricultural Cyber-Physical Systems. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2023. Vol. 706–2. P. 238–246.
3. Структура и свойства поверхности валков прокатных станов, восстановленных способом лазерной наплавки / А. М. Чирков, А. Ю. Прилуков, С. Д. Калошкин и др. // Материаловедение. 2014. № 8. С. 35–39.
4. Влияние режимов лазерной наплавки порошка карбида вольфрама на характеристики поверхности стали 12Х18Н10Т / И. В. Родионов, П. Н. Устинов, И. В. Перинская и др. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2024. № 2 (285). С. 41–46. doi: 10.35211/1990-5297-2024-2-285-41-46.
5. Сдвиженский П. А. Разработка метода непрерывного контроля химического состава композиционных покрытий в процессе коаксиальной лазерной наплавки: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2022. 141 с.
6. Бирюков В. П. Повышение износостойкости деталей и почвообрабатывающих орудий в сельхозмашиностроении лазерной наплавкой // Фотоника. 2021. Т. 15. № 2. С. 132–143. doi: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.2.132.142.
7. Еремина М. А. Ломаева С. Ф., Харанжевский Е. В. Структура и износостойкость покрытий, полученных высокоскоростной лазерной наплавкой механокомпозитов на основе карбогидрида титан // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2021. Т. 15. № 4. С. 46–56. doi: 10.17073/1997-308X-2021-4-46-56.
8. Исследование возможности повышения эксплуатационных характеристик штамповой стали Х12МФ методом газопорошковой лазерной наплавки / Д. И. Гаврилов, В. В. Морозов, И. В. Беляев и др. // Электрометаллургия. 2024. № 2. С. 13–21. doi: 10.31044/1684-5781-2024-0-2-13-21.
9. Влияние нанокарбидов тугоплавких металлов на трибологические свойства покрытий при лазерной наплавке / В. П. Бирюков, В. Н. Петровский, М. А. Мурзаков и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 6. С. 70–74.
10. Шабурова Н. А., Пашикев К. Ю., Мясоедов В. А. Сравнительный анализ структуры и свойств хромокарбидового покрытия, полученного диффузионным насыщением и лазерной наплавкой // Материаловедение. 2024. № 6. С. 12–20. doi: 10.31044/1684-579X-2024-0-6-12-20.
11. Хоменко М. Д. Мирзаде Ф. Х., Низьев В. Г. Параметрическое исследование микроструктурных свойств при лазерной наплавке // Кристаллография. 2019. Т. 64. № 4. С. 663–667. doi 10.1134/S0023476119040301.
12. Shakhov V., Uchkin P., Ushakov Yu. Studies in coatings for working bodies of deep-rippers recovered by plasma surfacing // Engineering for Rural Development. 2019. Vol. 18. P. 44–49. doi 10.22616/ERDev2019.18.N031.
13. Абрамов А. Н. Эксплуатационная надежность технических систем. Теория. Расчеты. Примеры: учебное пособие / 2-е издание, исправленное и переработанное. М.: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, 2024. 174 с.

Поступила в редакцию 16.07.2024

После доработки 20.08.2024

Принята к публикации 18.09.2024

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

© 2024 г. Д. А. Миронов, кандидат технических наук, А. К. Ламм,
Р. К. Расулов, младшие научные сотрудники

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5
E-mail: nano.otdel@mail.ru

Одна из технологий повышения ресурса рабочих органов – нанесение упрочняющего слоя материалом, более устойчивым к износу. Исследование проводили с целью оценки эффективности метода селективного лазерного спекания (SLS) при упрочнении почвообрабатывающих рабочих органов. В качестве варианта сравнения рассматривали метод плазменно-порошковой наплавки. Исследования проводили на круговом почвенном стенде, представляющем собой вращающийся в цилиндре, наполненном абразивной средой для быстрого изнашивания поверхности, ротор со стойками, на которые крепили образцы. Изучали 4 экспериментальных образца из стали 30ХГСА. Размеры упрочняющего слоя определяли расчетным путем. После этого его наносили металлическим порошком марки Р6М5 методом SLS на 2 образца, один упрочняли до термической обработки, второй после. Аналогично, но с использованием порошка ФБХ-6-2, изготавливали 2 образца путем плазменно-порошковой наплавки. Время стендовых испытаний составляло 152 ч. Линейный износ образцов при упрочнении методом SLS до термообработки составил 1,3 мм, после термообработки – 0,83 мм, плазменным методом – соответственно 1,1 мм и 1,2 мм. Наибольшие показатели твердости в опыте отмечены при использовании SLS метода в зоне упрочняющего слоя: у образца, упрочненного до термообработки, – 65 HRC, после ее проведения – 73 HRC. При плазменном методе наблюдали значительные различия в твердости около упрочняющего слоя: при упрочнении до термообработки – 45 HRC, после – 35 HRC. Использование метода селективного лазерного спекания для упрочнения лезвийной части экспериментальных образцов обеспечило снижение расхода металлического порошка, в сравнении с плазменным методом, на 32 %, повышение износостойкости образцов по расчетным данным – на 26 %, на круговом почвенном стенде – на 24 %.

RESEARCH OF THE METHOD OF SELECTIVE LASER SINTERING FOR STRENGTHENING SOIL TILLAGE WORKING ORGANS

D. A. Mironov, A. K. Lamm, R. K. Rasulov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
109428, Moscow, 1-i Institutskii proezd, 5
E-mail: nano.otdel@mail.ru

One of the technologies for increasing the service life of working bodies is applying a hardening layer with a material that is more resistant to wear. The study was conducted to evaluate the efficiency of the selective laser sintering (SLS) method for hardening soil-cultivating working bodies. The plasma-powder surfacing method was considered as a comparison option. The studies were conducted on a circular soil test bench, which was a rotor with racks rotating in a cylinder filled with an abrasive medium for rapid surface wear, on which samples were attached. Four experimental samples made of 30KhGSA steel were studied. The dimensions of the hardening layer were determined by calculation. After that, it was applied with P6M5 metal powder using the SLS method to 2 samples, one was hardened before heat treatment, the second after. Similarly, but using FBH-6-2 powder, 2 samples were made using plasma-powder surfacing. The bench test duration was 152 h. The linear wear of the samples when hardened by the SLS method before heat treatment was 1.3 mm, after heat treatment – 0.83 mm, by the plasma method – 1.1 mm and 1.2 mm, respectively. The hardness values that stand out from the others, with the SLS method are observed in the hardening layer zone: the sample before heat treatment is 65 HRC, after it – 73 HRC. With the plasma method, the difference in hardness is observed in the zone near the hardening layer: before heat treatment – 45 HRC, after – 35 HRC. The use of the selective laser sintering method for hardening the blade part of the experimental samples ensured a decrease in the consumption of metal powder, in comparison with the plasma method, by 32 %, an increase in wear resistance of the samples according to the calculated data – by 26 %, on the circular soil stand – by 24 %.

Ключевые слова: рабочие органы, почвообрабатывающие машины, экономическая эффективность использования, метод селективного лазерного спекания.

Keywords: working bodies, tillage machines, economic efficiency of use, selective laser sintering method.

Обработка почвы при производстве сельскохозяйственной продукции – одна из особенно важных и энергозатратных операций. От качества ее проведения зависит урожайность сельскохозяйственных культур. В свою очередь качество обработки почвы определяют характеристики машин и орудий, которые зависят от состояния и параметров рабочих органов [1, 2, 3]. Последние эксплуатируются в почвенной среде с большим содержанием абразивных частиц, в результате чего по мере увеличения объема выполненной работы воз-

растает износ рабочего органа, при этом меняются его форма и линейные размеры, что отрицательно влияет на агротехнические характеристики выполняемых операций и увеличивает нагрузку на агрегат [4, 5]. В связи с изложенным повышение эксплуатационных параметров и наилучшее формирование лезвийной части рабочих органов почвообрабатывающих машин – важная и актуальная задача.

В последние годы активно развивается технология SLS – Selective Laser Sintering, которая подразумевает пе-

чать CAD (Computer-aided design) -моделей из металла. Ее можно в том числе рассматривать как перспективный способ изготовления рабочих органов машин для обработки почвы и нанесения на них упрочняющего слоя. Селективное лазерное спекание, в отличие от традиционных методов наплавки, позволяет наносить слои любой конфигурации с равномерным распределением твердых частиц металлопорошка. Нанесение тонкого упрочняющего слоя снижает риск возникновения широкой затылочной фаски, улучшая качество обработки почвы [2].

Один из основных недостатков существующих методов нанесения покрытий при упрочнении рабочих органов – неравномерная микротвердость наплавляемого слоя из-за того, что частицы вольфрама при проведении технологической операции наплавки не успевают полностью раствориться в ванне жидкого металла и концентрируются на дне расплава. При наплавке пилотная дуга, постоянно горящая между вольфрамовым электродом и соплом плазматрона, оказывает мощное тепловое воздействие не только на порошок, подаваемый в плазменную струю, но и на металл ванны в зоне упрочнения, что вызывает перегрев сплава и основы детали [6, 7, 8].

Нанесение покрытий при упрочнении рабочих органов методом селективного лазерного спекания (SLS) не требует полного расплавления частиц тугоплавкого материала и последующей термической обработки, так как интенсивность теплового излучения недостаточна для изменения свойств материала основы. Его преимущество заключается в возможности формирования покрытия любой конфигурации толщиной от 1 мм.

Цель исследования – оценить эффективность метода селективного лазерного спекания (SLS) при упрочнении почвообрабатывающих рабочих органов.

Методика. Для формирования двухслойного лезвия экспериментального образца использовали два метода: селективное лазерное спекание (SLS), которое предусматривает нанесение упрочняющего слоя на основу детали 3D металлопорошковым принтером, и в качестве варианта сравнения плазменно-порошковую наплавку в среде сжатого воздуха как наиболее распространенный на сегодняшний день метод нанесения защитного слоя.

Для проведения сравнительных исследований по определению износостойкости экспериментальных деталей были изготовлены 4 образца из стали 30ХГСА (ГОСТ 4543-2016), используемой при производстве рабочих органов для обработки почвы. Образцы № 1 и № 4 упрочняли методом плазменно-порошковой наплавки с использованием металлического порошка марки ФБХ-6-2. Образец № 4, изготовленный по стандартной технологии, выступал в роли контрольного, с которым в последующем проводили сравнение. Образцы № 2 и № 3 упрочняли методом селективного лазерного спекания (SLS). Он дает возможность использовать порошки с более высокой тугоплавкостью и твердостью, увеличивая ресурс и снижая толщину наносимого слоя. Поэтому на экспериментальные образцы наносили металлический порошок Р6М5 со сферическими частицами среднего размера от 40 до 110 мкм. Спекание проводили при мощности лазера 350 Вт; скорости сканирования – 0,03 м/с; расстоянии между дорожками сканирования – менее 100 мкм; толщине слоя при спекании – 450 мкм; стратегии сканирования – односторонняя.

Упрочнение образцов № 2 и № 4 осуществляли в соответствии со стандартной технологией производства почвообрабатывающих рабочих органов, которая предусматривает нанесение упрочняющего слоя перед термообработкой (закалка с последующим отпуском)

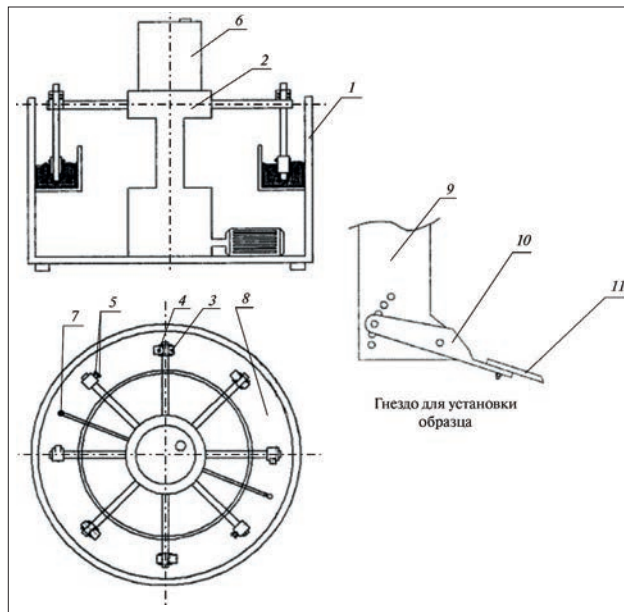


Рис. 1. Круговой почвенный стенд: 1 – каркас, 2 – приводной механизм, 3 – уплотнительные катки, 4 – грузы, 5 – рыхлители, 6 – резервуар для воды, 7 – капельница, 8 – круговой почвенный канал, 9 – приспособление для крепления испытуемых образцов, 10 – гнездо для установки образца, 11 – испытуемый образец.

рабочих органов. Образцы № 1 и № 3 подвергали термообработке до нанесения упрочняющего слоя.

Эффективность упрочнения оценивали на круговом почвенном стенде (рис. 1), конструкция которого предусматривает монтаж до двух образцов одновременно. Результаты таких испытаний сопоставимы с полевыми [9]. В процессе испытаний каждый из образцов подрезает пласт абразивной массы, имитирующей почву, которой наполнен канал, что вызывает их износ. Рыхлители 5 разрушают подошву после прохождения образцов, обеспечивая однородную твердость и влажность среды. Это позволяет поддерживать равномерную плотность массы над и под образцами, благодаря чему лезвие изнашивается аналогично почворезущим деталям в реальных условиях. Для уравнивания влажности в разрыхленный слой подается вода из резервуара 6 через капельницу 7. Уплотнительные катки 3 с грузами 4 обеспечивают постоянную плотность почвы в канале [10].

Лабораторные испытания проводили в следующих условиях: абразивная масса – песок крупный (80 %) + глина (20 %), скорость перемещения образцов – 2 м/с,

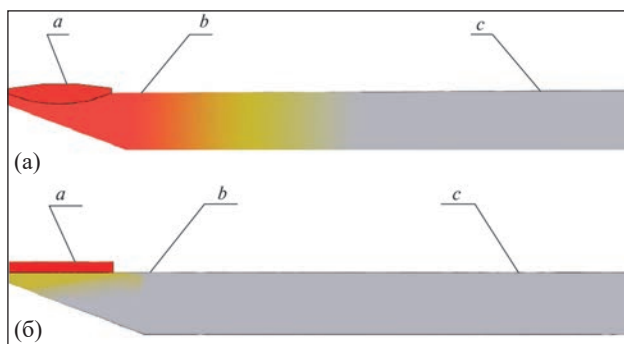


Рис. 2. Модель нагрева образца при упрочнении: а) плазменно-порошковой наплавкой (образец № 1, № 4); б) селективным лазерным спеканием (образец № 2, № 3): а – зона защитного слоя, б – 10 мм от наплавки, с – основа образца.

Табл. 1. Показатели твердости в зависимости от метода нанесения упрочняющего слоя и времени термообработки, HRC

Зона	Упрочнение до термообработки			Упрочнение после термообработки		
	начальное состояние	упрочнение	термообработка	начальное состояние	термообработка	упрочнение
SLS						
	образец № 2			образец № 3		
a	-	72,6	65	-	-	73
b	14,8	14,6	45,3	14,8	43,3	43,4
c	14,2	14,3	43,4	14,2	44,4	44,2
Плазма						
	образец № 4			образец № 1		
a	-	61,3	62	-	-	61
b	15,6	13,7	45	14,8	43,5	35
c	15	14,6	44	14,4	43,2	44,5

глубина хода образцов – 14...15 см, цикл испытаний – 152 ч, размеры образцов – 6×30×60мм.

Поверхностную твердость основы образца и его упрочняющего покрытия определяли методом измерения твердости по Роквеллу в соответствии с ГОСТ 9013-59 (ИСО 65-86) на твердомере HDRVU-187,5 (Китай). Измерение твердости проводили в зоне защитного слоя (рис. 2а) и зоне основы образца (см. рис. 2с). Кроме того, было выдвинуто предположение, что при нанесении защитного слоя методом плазменной порошковой наплавки металл может потерять твердость (отпуститься), для его уточнения проводили замеры на расстоянии 10 мм от места наплавки (зона b).

Для определения конструктивно-материаловедческих параметров экспериментальных образцов проводили расчет толщины защитного слоя по упрощенной методике, разработанной С. А. Сидоровым [9], которая базируется на учете максимальной линейной и конструктивной износостойкости. В ее основе лежит формула для сравнительной оценки линейного износа двухслойного почвопорежущего лезвия, точность вычислений с использованием которой составляет 12...17%:

$$U_{\text{лин.1}} = U_{\text{лин.}} \cdot \left(\frac{K_{U_2}}{K_{U_1}} \right)^{0,5...0,6} \cdot \left[1 + K_{U_{\text{ТВ.СПЛ.}}} \cdot \frac{h_{\text{ТВ.СПЛ.}}}{b_{\text{осн}}} \right]^{0,7...0,8}, \quad (1)$$

где $U_{\text{лин.1}}$ – линейный износ однородного почвопорежущего лезвия, изготовленного из материала с коэффициентом относительной износостойкости K_{v1} , в определенных почвенно-климатических условиях, мм; $U_{\text{лин.двухсл.}}$ – линейный износ двухслойного упрочненного наплавленного почвопорежущего лезвия в тех же почвенно-климатических условиях, мм; K_{U_2} – коэффициент относительной износостойкости материала основы двухслойной детали (стали) повышенной (или пониженной), по отношению к сравниваемому (K_{U_1}) материалу; $K_{U_{\text{ТВ.СПЛ.}}}$ – коэффициент относительной износостойкости материала упрочняющего твердосплавного слоя; $h_{\text{ТВ.СПЛ.}}$ – толщина слоя твердого сплава двухслойного лезвия, мм; $b_{\text{осн}}$ – толщина материала основы (стали) двухслойного лезвия, мм.

После проведения лабораторных испытаний на круговом почвенном стенде рассчитывали относительную износостойкость образцов, полученных с использованием каждого метода. Ее определяли как отношение линейных износов [9].

На износостойкость также влияет правильное формообразование изнашивающегося лезвия. Для его достижения у двухслойного лезвия рабочего органа почвообрабатывающего агрегата износ основы детали в процессе эксплуатации должен быть несколько выше, чем у наплавленного слоя. При этом наплавка должна сопротивляться образованию затылочной фаски, чтобы сохранить остроту лезвия [12, 13, 14].

Для определения износостойкости твердосплавного покрытия используется следующая формула:

$$K_{\text{ли}} = \frac{U_{\text{лСер.}}}{U_{\text{лОп.}}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{ли}}$ – коэффициент линейной износостойкости; $U_{\text{лСер.}}$ – линейный износ монометаллического (серийного) фрагмента, мм; $U_{\text{лОп.}}$ – линейный износ опытного двухслойного наплавленного фрагмента, мм.

Ранее было установлено, что линейный износ монометаллического образца составляет 3,2 мм. Эта величина была принята за эталон [5]. Испытания упрочненных экспериментальных образцов проводили в соответствии с Программой и методикой лабораторных испытаний твердосплавных материалов ФГБНУ ФНАЦ ВИМ [9, 10, 11].

Результаты и обсуждение. В ходе многолетних исследований выявлено, что достаточно хорошие условия формообразования лезвийной части рабочих органов наблюдаются при соотношении линейных износов однослойного и двухслойного почвопорежущих рабочих органов, равном 1,7...1,8 [9, 11].

Приняв, что $K_{U_2} = K_{U_1}$, то есть материал основы сравниваемых образцов идентичен, получим:

$$\frac{U_{\text{лин.1}}}{U_{\text{лин.двухсл.}}} = \left[1 + K_{U_{\text{ТВ.СПЛ.}}} \cdot \frac{h_{\text{ТВ.СПЛ.}}}{b_{\text{осн}}} \right]^{0,7...0,8} > 1,7...1,8. \quad (3)$$

После упрощения формула (2) примет вид:

$$h_{\text{ТВ.СПЛ.}} > \frac{1,38b_{\text{осн}}}{K_{U_{\text{ТВ.СПЛ.}}}}. \quad (4)$$

Для экспериментальных образцов толщина материала основы ($b_{\text{осн}}$) равна 6 мм.

С учетом того, что для металлического порошка марки ФБХ-6-2 усредненное значение $K_{U_{\text{ТВ.СПЛ.}}}$ равно 4,05, зависимость (3) примет вид:

$$h_{\text{ТВ.СПЛ.}} > \frac{1,38 \cdot 6}{4,05}, \text{ то есть } h_{\text{ТВ.СПЛ.}} > 2,1 \text{ мм.}$$

Табл. 2. Результаты сравнительных лабораторных испытаний твердосплавных покрытий на круговом почвенном стенде

Образец и марка твердосплавного покрытия	Способ упрочнения	Твердость, HRC	Толщина покрытия, мм	Средний линейный износ, мм		Коэффициент линейной износостойкости ($K_{\text{лин}}$)
				с покрытием	без покрытия (эталона)	
№ 2 Р6М5	селективное лазерное спекание	61...65	1,44	1,30	3,2	2,29
№ 3 Р6М5		70...73	1,44	0,83		3,80
№ 1 ПП-ФБХ-6-2	плазменная наплавка	59...61	2,10	1,20		2,70
№ 4 ПП-ФБХ-6-2		59...62	2,10	1,10		2,90

Для твердого сплава Р6М5 усредненное значение $K_{U_{тв.спл.}}$ равно 6,5, тогда:

$$h_{тв.спл.} > \frac{1,38 \cdot 6}{6,5}, \text{ то есть } h_{тв.спл.} > 1,44 \text{ мм.}$$

Износ двухслойного лезвия экспериментального образца можно приближенно (с точностью 12...15%) определить по зависимости [9]:

$$U_{\text{лин. лезв. двухсл.}} = \frac{\lambda(1,1 + 1,05 \cdot T^{1,25})}{K_{U_{тв.спл.}} \cdot h_{тв.спл.}^{0,5}} \cdot \tau, \quad (5)$$

где λ – математическое описание изнашивающей способности почвы (определяется по методике Сидорова С. А. [9]), мм/га; T – твердость почвы на глубине обработки, МПа; $K_{U_{тв.спл.}}$ – коэффициент относительной износостойкости твердого сплава (относительно материала основы лемеха); $h_{тв.спл.}$ – толщина твердосплавного упрочняющего слоя, мм; τ – наработка на лемех, га.

Величина показателя λ определяется по следующей эмпирической зависимости:

$$\lambda = (X^2 + 0,8 \cdot Y + 1,5 \cdot Z) \cdot T^{\frac{1}{4}}, \quad (6)$$

где X , Y , Z – содержание в почве (по массе), соответственно, песка, глины и мелких каменных включений (гравия, гальки и др.) в долях единицы, то есть $X+Y+Z=1$ (100%).

Исходя из условий испытаний, $X=0,8$, $Y=0,2$ и $Z=0$.

Рассчитаем λ по толщине элементарной площадки для кругового почвенного станда:

$$\lambda = (0,8^2 + 0,8 \cdot 0,2 + 1,5 \cdot 0) \cdot 1^{\frac{1}{4}} = 0,64 \text{ мм/га.}$$

С учетом этого износ двухслойного лезвия экспериментального образца, наплавленного твердым сплавом ПР-ФБХ-6-2, будет равен:

$$U_{\text{лин. лезв. двухсл.}} = \frac{0,64(1,1 + 1,05 \cdot 1^{1,25})}{4 \cdot 2,1^{0,5}} \cdot 6 = 1,42 \text{ мм;}$$

образца, наплавленного твердым сплавом Р6М5, –

$$U_{\text{лин. лезв. двухсл.}} = \frac{0,64(1,1 + 1,05 \cdot 1^{1,25})}{6,5 \cdot 1,44^{0,5}} \cdot 6 = 1,05 \text{ мм.}$$

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин методом селективного лазерного спекания приводит к сокращению использования твердого сплава на 32 % и увеличению износостойкости на 26 %.

Уменьшение твердости образца № 1 с предварительной термообработкой, упрочненного плазменно-порошковой наплавкой, в зоне б составило около 10 единиц HRC (табл. 1). Это обусловлено тем, что материал вокруг упрочненного слоя подвергся отпуску в процессе упрочнения, которое происходит при больших температурах. Аналогичную потерю твердости наблюдали у образца № 4. При замерах в зоне б после упрочнения она в среднем была меньше на 2 единицы HRC. Но после закалки с последующим отпуском все вернулось в норму.

Исследование образца № 3 подтвердило результаты априорного анализа [9, 11], согласно которым при спекании не требуется дальнейшего проведения технологической операции закалки. У упрочненного слоя этого образца (зона а) отмечена максимальная в опыте твердость. Кроме того, подтвердилось незначительное температурное воздействие и отсутствие перегрева зоны б, о чем свидетельствует незначительное снижение ее твердости (менее 1 единицы HRC). У образца № 2

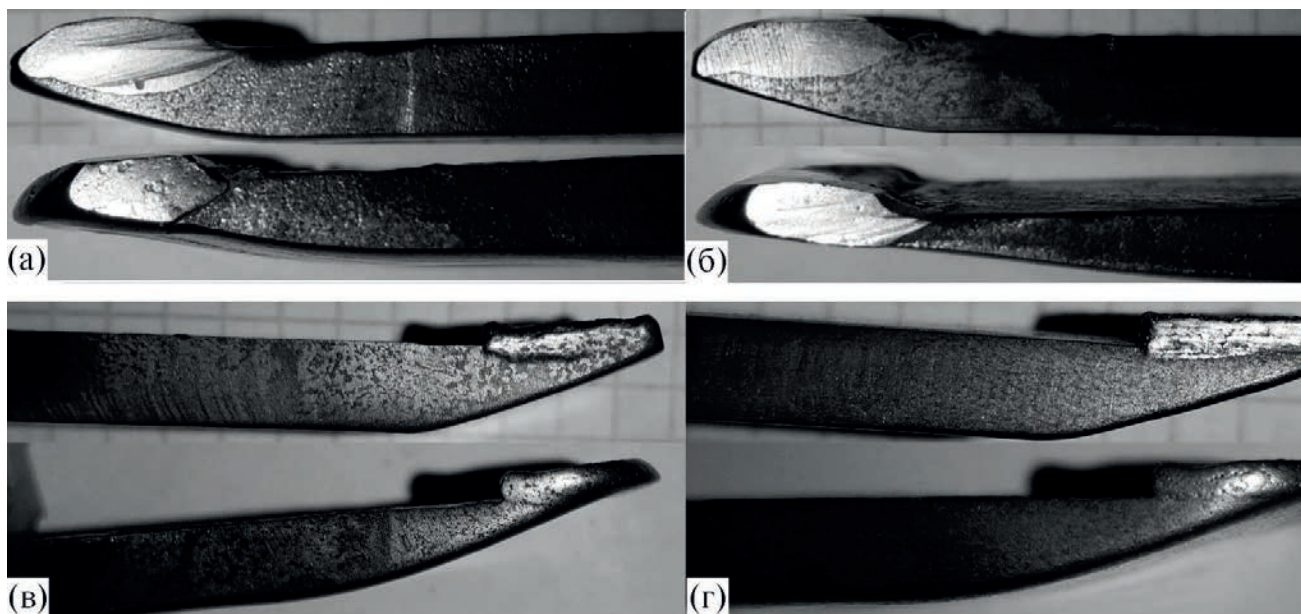


Рис. 3. Экспериментальные образцы (верх – первоначальное состояние, низ – изношенное состояние), упрочненные методом плазменно-порошковой наплавки в среде сжатого воздуха (а – образец № 4; б – образец № 1) и методом селективного лазерного спекания (в – образец № 2; г – образец № 3).

нанесение упрочняющего слоя с последующей закалкой сопровождалось уменьшением твердости упрочняющего слоя (зона а) на 7 единиц HRC. При этом параметры твердости основы после закалки находились в требуемых границах для рассматриваемого материала.

Анализ образца № 1, наплавленного плазменным методом после термообработки, подтвердил предположение о повышенном тепловложении, из-за которого происходит потеря твердости около защитного слоя в зоне б (см. рис. 2а). В результате его основа визуально (рис. 3) изнашивалась сильнее, чем у образца № 4, который упрочняли перед термообработкой. Этот факт подтверждает и более высокий (на 0,1 мм) линейный износ образца № 1 (1,2 мм) по сравнению с образцом № 4 (табл. 2). Износостойкость образца № 1 была меньше, чем у образцов № 3 и № 4.

Сравнение деталей, наплавленных методом SLS, показало, что у образца № 2 линейный износ (1,3 мм) был больше, чем у образца № 3, на 0,47 мм, поскольку упрочняющий слой под воздействием термообработки потерял часть твердости, то есть уменьшилась его способность противостоять износу. В целом наибольшую износостойкость, по сравнению с другими образцами, продемонстрировал образец № 3.

Выводы. При проведении термообработки перед нанесением упрочняющего слоя методом плазменно-порошковой наплавки происходит потеря твердости в зоне 10 мм от наплавки на уровне 10 HRC. Использование метода селективного лазерного спекания (SLS) дает возможность решить эту проблему. При его использовании аналогичной потери твердости не наблюдали.

Результаты исследований подтвердили высокий ресурс и эффективность применения селективного лазерного спекания с использованием новых твердых сплавов для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих орудий.

При использовании метода селективного лазерного спекания экономия твердого сплава составляет 32 %, износостойкость экспериментальных образцов в сравнении с деталями, упрочненными плазменным методом, по расчетным данным возрастает на 26 %, по результатам лабораторных исследований в круговом почвенном канале – на 24 %.

Литература.

1. Сидоров С. А. Сельхозмашиностроению – качественные материалы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2010. № 2. С. 41.
2. Миронов Д. А., Ламм А. К., Расулов Р. К. Оценка эффективности почвообрабатывающих рабочих органов по критерию износостойкости // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2023. № 1 (65). С. 145–150.
3. Миронова А. В. Технологические и физико-механические свойства задерненных почв // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. № 1. С. 63–68.
4. Миронова А. В. Обработка задерненных и деградированных почв // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. № 2 (35). С. 57–62.
5. Лискин И. В., Миронова А. В. Обоснование искусственной почвенной среды для лабораторных исследований износа и тяговых характеристик почворежущих рабочих органов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. № 3. С. 53–58.
6. Повышение ресурса и стойкости к абразивному изнашиванию долот лемехов наплавкой электродами с борсодержащей обмазкой / В. Ф. Аулов, В. П. Лялякин, А. М. Михальченко и др. // *Сварочное производство*. 2019. № 7. С. 28–31.
7. Новые виды коррозионно-стойких биметаллов и технологии их производства / А. Ю. Измайлов, Я. П. Лобачевский, С. А. Сидоров и др. // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014. № 4. С. 7–12.
8. Лялякин В. П., Слинко Д. Б., Денисов В. А. Получение композиционных покрытий электродуговым напылением порошковыми проволоками // *Технология металлов*. 2021. № 12. С. 16–21.
9. Сидоров С. А. Применение наноплазменных технологий нанесения покрытий и обработки материалов деталей сельхозмашин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2009. № 2. С. 42–44.
10. Сидоров С. А., Миронов Д. А., Лискин И. В. Круговой почвенный стенд. Патент на изобретение RU 2613292 С, 15.03.2017. Заявка № 2015154117 от 17.12.2015.
11. Лобачевский Я. П., Старовойтов С. И. Оптимальный профиль передней поверхности чизельного рабочего органа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. № 2. С. 26–30.
12. Старовойтов С. И., Гринь А. М. Плужный корпус для прецизионной обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. № 1. С. 47–52.
13. Анализ тягового сопротивления элементов цилиндрического плужного корпуса / Я. П. Лобачевский, В. Ф. Комогорцев, С. И. Старовойтов и др. // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. № 2. С. 11–15.
14. The trend of tillage equipment development / S. I. Starovoytov, B. H. Akhalaya, S. A. Sidorov et al. // *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51. No. 3. P. 77–81.

Поступила в редакцию 23.05.2024

После доработки 24.07.2024

Принята к публикации 25.09.2024

СТОЛЕТНИЙ ЮБИЛЕЙ ТРАКТОРА «ФОРДЗОН-ПУТИЛОВЕЦ»

© 2024 г. В. В. Шаров¹, кандидат технических наук, Ю. С. Ценч², доктор технических наук,
С. А. Серебряков³, М. И. Дмитриев³, кандидат технических наук,
Д. В. Мельников³, кандидат технических наук

¹Музей памяти Лопасненского края,
142306, Московская обл., Чехов, ул. Чехова, 22

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
109428, Москва, ул. 1-й Институтский проезд, 5

³АО «Петербургский тракторный завод»,
198097, Санкт-Петербург, пр. Стачек, 47
E-mail: sharov_vv56@mail.ru

Сто лет назад на заводе «Красный Путиловец» в Ленинграде началось серийное производство колесного трактора «Фордзон-Путиловец», что стало знаменательным событием в истории машиностроения СССР. Началу производства предшествовала работа тракторной комиссии Госплана, которая была призвана определить образец трактора и предприятие для его воспроизводства. Цель исследования – выявить обстоятельства выбора объекта и места серийного производства трактора, изучить вклад ученых в работу тракторной комиссии; отразить значение серийного производства в отечественном машиностроении. Использовали источники, отражающие становление тракторостроения, архивные материалы Музея имени В. П. Горячкина. Проводили исследования в соответствии с принципами историзма, научной объективности и достоверности. Процесс начальной тракторизации страны, помимо закупок за рубежом и полукустарного производства самобытных конструкций, характеризовался еще и серийным производством тракторов по зарубежным образцам. Трактор «Фордзон» рекомендовала для серийного производства тракторная комиссия Госплана. В. П. Горячкин и П. М. Белянчиков организовали испытания американского трактора и определили его технические и эксплуатационные характеристики. Местом серийного производства был выбран завод «Красный Путиловец». Производство трактора «Фордзон-Путиловец» способствовало насыщению сельского хозяйства тяговыми машинами, а целенаправленная работа по освоению серийного выпуска тракторной техники на заводе «Красный Путиловец» ознаменовала создание тракторостроительной отрасли в машиностроении СССР.

CENTENARY OF THE «FORDSON-PUTILOVETS» TRACTOR

V. V. Sharov¹, Y. S. Tsench², S. A. Serebryakov³, M. I. Dmitriev³, D. V. Melnikov³

¹Lopasnensky Region Memory Museum, Chekhov,
142306, Moskovskaya obl., Chekhov, ul. Chekhova, 22

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
109428, Moskva, ul. 1-i Institutskii proezd, 5

³JSC Petersburg Tractor Plant,
198097, Sankt-Peterburg, pr. Stachek, 47
E-mail: sharov_vv56@mail.ru

One hundred years ago, the serial production of the «Fordzon-Putilovets» wheeled tractor began at the «KrasnyPutilovets» plant in Leningrad, which was a significant event in the history of machine building in the USSR. The start of production was preceded by the work of the Gosplan tractor commission, which was created to determine the tractor model and the enterprise for its production. (Research purpose) The research purpose is identifying the circumstances of the choice of the object and place of mass production of the tractor, determining the contribution of scientists to the work of the tractor commission; reflecting the importance of mass production in domestic engineering. (Materials and methods) Used sources reflecting the formation of tractor construction, archival materials of the V. P. Goryachkin Museum. Conducted research in accordance with the principles of historicism, scientific objectivity and reliability. (Results and discussion) It was shown that the process of initial tractorization of the country, in addition to purchases abroad and semiindustrial production of original designs, was also characterized by serial production of tractors according to foreign models. It was noted that the tractor «Fordzon» was recommended for mass production by the tractor commission of the State Planning Committee. The role of scientists V. P. Goryachkin and P. M. Belyanchikov, who organized the tests of the american tractor and determined its technical and operational characteristics, was revealed. The «KrasnyPutilovets» plant was chosen as the place of mass production. (Conclusions) The tractorization of the country was carried out mainly due to the serial production of a tractor, the analogue of which was «Fordzon». Scientists V. P. Goryachkin and P. M. Belyanchikov were directly involved in the selection of this type of tractor. Its reproduction on «KrasnyPutilovets» became possible thanks to the active position of the company's management. The production of the Fordzon-Putilovets tractor contributed to the saturation of agriculture with traction machines, and the purposeful work on mastering the serial production of tractor equipment at the «KrasnyPutilovets» plant marked the creation of the tractorbuilding industry in the USSR machine building.

Ключевые слова: трактор, «Фордзон», «Фордзон-Путиловец», производство, «Красный Путиловец», тракторостроение, испытания, комиссия.

Keywords: tractor, «Fordzon», «Fordzon-Putilovets», production, «Krasny Putilovets», V. P. Goryachkin, P. M. Belyanchikov, tractor building, tests, commission.

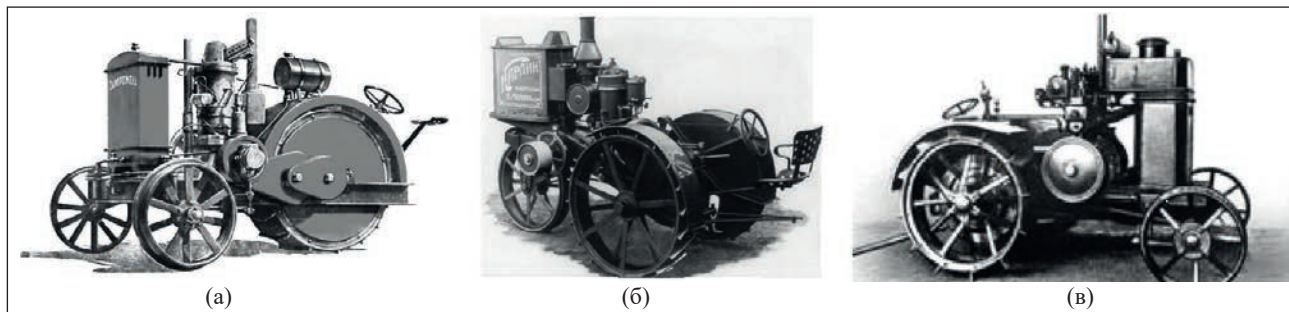


Рис. 1. Отечественные тракторы самобытных конструкций: а) трехколесный 12-сильный трактор «Запорожец»; б) трехколесный 12-сильный трактор «Карлик»; в) колесный 25-сильный трактор «Коломенец-1»

В октябре 1924 г., на заводе «Красный Путиловец» в Ленинграде начали собирать колесный трактор «Фордзон-Путиловец». Этому эпохальному событию в истории нашей страны предшествовала активная работа тракторной комиссии Госплана, которая должна была определиться с выбором конструкции трактора и местом его серийного производства.

Необходимость данной важной работы определялась тем, что после мировой войны 1914–1918 гг., череды революций 1917 г. и Гражданской войны 1918–1922 гг. в нашей стране образовался дефицит рабочих рук в деревне, не хватало и рабочих лошадей. Все это вело к нехватке продовольствия и, как следствие этого, к возможному голоду населения.

Новая власть, завоевавшая себе право создавать и руководить вновь образованным государством СССР, используя опыт промышленно развитых стран, приняла решение о тракторизации сельского хозяйства. С этой целью, исходя из имеющегося опыта работы комиссии, разработавшей к 1920 г. план электрификации России (ГОЭЛРО), при Госплане в 1922 г. была создана тракторная комиссия, призванная разработать план по тракторизации СССР. Произнесенная Председателем Госплана Г. М. Кржижановским фраза «Тракторизация – родная сестра электрификации» наилучшим образом характеризовала направление работы новой комиссии по переустройству сельского хозяйства страны на прогрессивные рельсы механизации.

Цель исследования – определить пути тракторизации страны в 1920 гг., выявить обстоятельства выбора объекта и места для серийного производства трактора, оценить вклад ученых ТСХА в становление новой тракторной отрасли для целостного отражения начального этапа развития отечественного тракторостроения в истории техники СССР.

Методика. При проведении исследований использовали научно-техническую литературу и периодические издания, отражающие становление отечественного тракторостроения, архивные материалы, хранящиеся в Музее земледельческой механики имени В. П. Горячкина РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева. Исследования проводили в соответствии с принятыми в истории науки и техники принципами историзма, научной объективности и достоверности.

Результаты и обсуждение. Перспективные планы развития машиностроения Советского Союза предполагали поставку в десятилетний период сельскому хозяйству страны тракторной техники суммарной мощностью 4,4 млн л.с., что в два с лишним раза превышало мощности всех электростанций по плану ГОЭЛРО [1]. Такие масштабные проекты требовали тщательной проработки в части скорейшего обеспечения необходимой техникой тружеников села. Созданная тракторная комиссия Го-

сплана решила на первых порах поддерживать развитие самобытных отечественных производителей тракторов, рекомендуя оказывать им финансовую помощь. Параллельно с этим поощрялись закупки иностранной техники для нужд крестьянства. Еще одним направлением в деле тракторизации страны комиссия определила путь по копированию передовой зарубежной техники и серийного ее воспроизводства на заводах страны, то есть развитие собственной тракторостроительной промышленности.

Необходимо отметить, что самобытные тракторы наших производителей были максимально просты в конструктивном плане и выпускались единичными партиями. Их производство носило полукустарный характер. Объяснялось это послевоенной разрухой, когда значительная часть предприятий не работала, инженерных кадров катастрофически не хватало, а снабжение металлом и необходимыми комплектующими было затруднительным. Поэтому те немногочисленные заводы, которые в условиях НЭПа отважились производить нужную для села тяговую технику, производили ее из того, что было на предприятиях. Так появились тракторы «Запорожец» из Токмака, «Карлик» из Маркштадта, «Коломенец-1» из Подмоковной Коломны (рис. 1).

Так называемое русское направление в тракторостроении, несмотря на энтузиазм приверженцев, не смогло реализовать себя в крупносерийном производстве. Постоянные «доводочные работы» вновь создаваемых конструкций длились бесконечно долго и не всегда были эффективными. Сказывалось отсутствие опыта конструкторской работы и необходимой квалификации специалистов. Примитивизм создаваемых тракторов, с одной стороны, вел к легкому изготовлению, а с другой стороны, простые металлы, закладываемые в конструкцию, быстро изнашивались и вели к поломке механизмов и деталей, что сказывалось на многочисленных простоях дорогих машин. Изготовление тракторов полукустарным способом обходилось недешево и было убыточным в сравнении с отлаженным производством зарубежных фирм.

Осуществление значительных закупок тракторной техники за рубежом требовало колоссальных финансовых средств, которых у государства не хватало. Тем не менее для нужд Сахаротреста, леспромпхозов, совхозов-гигантов, тракторных отрядов, артиллерийских подразделений армии закупки тяговой техники осуществлялись через государственные органы. Некоторые зарубежные фирмы в период НЭПа предлагали свои тракторы самостоятельно на рынке внутри СССР. В период с 1922 по 1929 г. было завезено различных типов конструкций тракторов общей численностью 33 874 ед. [2].

Для создания отечественной тракторостроительной отрасли в машиностроении комиссия Госплана должна

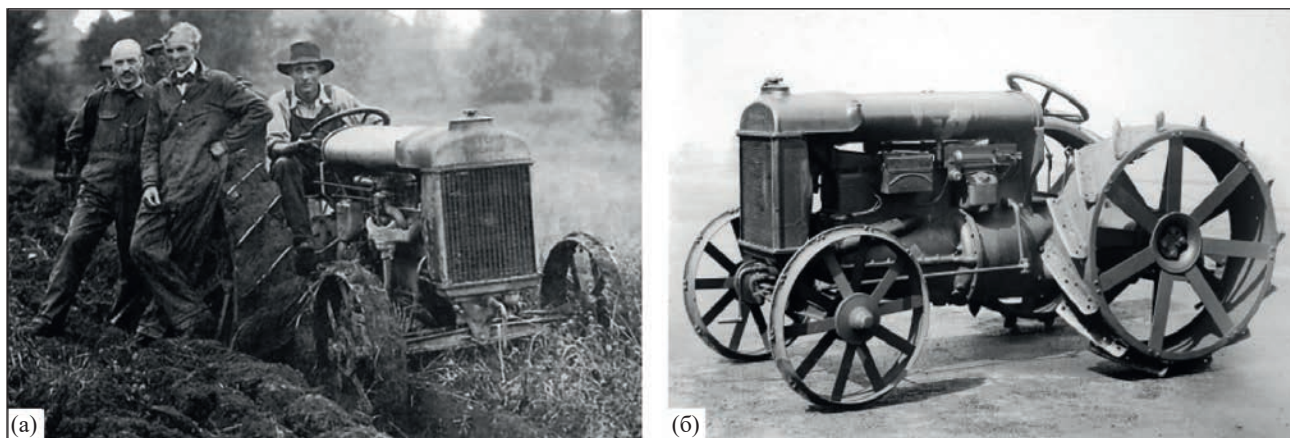


Рис. 2. Американский колесный трактор «Фордзон» конвейерной сборки:
а) на пахоте (в центре Генри Форд), б) общий вид.

была определиться с маркой трактора, который необходимо будет воспроизводить, и с местом его производства. Взвесив все аргументы по известным конструкциям, специалисты комиссии остановили свой выбор на широко известном американском колесном тракторе «Фордзон» (Fordson), который выпускался на конвейерном производстве и имел низкую себестоимость, что способствовало его продажам по всему миру (рис. 2).

В США эта модель выпускалась с 1917 г. на фирме «Генри Форд и сын» (Henry Ford and Son) [3]. Создание конструкции трактора и организация его конвейерного производства проходила под руководством выдающегося инженера и промышленника Генри Форда при активном участии конструктора Евгения Фаркаса.

Трактор «Фордзон» впервые в мировом тракторостроении имел безрамный олов. Все нагрузки во время движения воспринимались жестко соединенными между собой корпусами двигателя, муфты сцепления, коробки передач и заднего моста. Благодаря такому решению общий вес трактора получился значительно меньшим, чем при рамной компоновке.

Четырехцилиндровый двигатель водяного охлаждения работал на керосине и развивал мощность в 21 л.с. при 1000 об/мин коленчатого вала. Воспламенение смеси происходило от электрического зажигания, ток вырабатывался магнето низкого напряжения, которое располагалось на маховике двигателя (зажигание системы «Форд»). Трансмиссия трактора состояла из дисковой муфты сцепления (17 дисков работали в масле), трехскоростной коробки передач, главной передачи червячного типа, дифференциала и задних полуосей.

Прежде чем членам комиссии окончательно остановиться на данной модели трактора, были организованы его испытания на МИС Петровской сельскохозяйственной академии у В. П. Горячкина. Испытания проходили с 29 июля по 24 декабря 1922 г., они в целом подтвердили удовлетворительность работы трактора на основных сельскохозяйственных операциях (пахота, уборка зерновых сноповязалкой, привод молотилки). Были и замечания, рекомендовалось установить над задними колесами крылья, над местом тракториста – защитный зонт. Сложную «Фордовскую» систему зажигания предлагалось заменить на распространенное магнето высокого напряжения [4].

Основываясь на результатах испытаний, а также анализе эксплуатации 20 тракторов «Фордзон» в составе Пермского тракторного отряда и данных от практического использования закупленных ранее тракторов

в условиях России, комиссия выбрала для серийного производства трактор «Фордзон» [5].

Этот выбор не был единодушным, специалисты Научного автомоторного института (НАМИ) возражали против трактора «Фордзон» [6]. Свою позицию они аргументировали тем, что керосиновый двигатель автомобильного типа требовал высококачественные смазочные масла и внимательного ухода за ним, так же как и термосифонная система охлаждения, что было проблематичным в русских условиях эксплуатации. В конструктивном плане они видели сложности в безрамной конструкции, еще не проверенной в широкой практике и усложняющей монтаж и демонтаж машины. Червячная пара в главной передаче вела к нагреву масла до 75 °С, что создавало неудобство трактористу и требовало масла высокого качества. Высказывали они сомнения и в части возможности отечественных предприятий изготавливать сложные отливки и ответственные детали из высококачественных материалов, так как такого опыта в практике русского машиностроения еще не было.

Тракторная комиссия Госплана обследовала предприятия, где можно было бы наладить производство сложной самоходной техники, и выбрала завод «Красный Путиловец» в Ленинграде. Этому во многом способствовала активная позиция руководства, стремящегося полностью загрузить производственные мощности предприятия, получить централизованные средства на перевооружение станкового оборудования. Директором в то время был С. И. Афанасьев, сумевший убедить



Рис. 3. Испытания трактора «Фордзон-Путиловец» на МИС ТСХА имени К. А. Тимирязева, 1924 г.



Рис. 4. Участники заседания по результатам испытаний тракторов «Фордзон-Путиловец» на МИС ТСХА, 20.09.1924 г.

центральные органы страны в необходимости финансирования завода по государственной программе, в чем ему способствовал и первый Председатель Госплана СССР Г. М. Кржижановский [7]. Будучи с 1923 по 1926 г. ректором Московского механического института имени М. В. Ломоносова, где преподавалась тракторная наука ведущими учеными страны (П. М. Белянчиков, Е. Д. Львов, Д. К. Карельских), Г. М. Кржижановский хорошо понимал перспективность мобильной техники для сельского хозяйства страны и необходимость ее серийного производства на отечественных предприятиях. Его помощь начинающему тракторостроению была вполне осознанной и значительной.

По оригинальному образцу трактора «Фордзон» работники завода в конце 1923 – начале 1924 г. изготовили несколько тракторов, получивших название «Фордзон-Путиловец», все они прошли различные опробования в работе. Образцы 1 и 4 были отправлены на МИС ТСХА В. П. Горячкину, где были подвергнуты всесторонним испытаниям в сравнении с американским трактором «Фордзон» (рис. 3) [8].

Образец 3 после необходимой подготовки на МИС был отправлен в агитационный пробег Москва – Нижний Новгород, где проходила традиционная Нижегородская ярмарка, на которой проводились демонстрационные мероприятия, показывающие возможности нового трактора на сельскохозяйственных работах.

Проведенные испытания показали удовлетворительные результаты, а в протоколе заседания, посвященного их рассмотрению, проходившее под председательством В. П. Горячкина с участием заинтересованных сторон, в том числе и правительственных организаций, приведены слова сотрудника Госплана Н. Ветчинкина. Он отметил, что «...успешный пробег «Фордзона-Путиловца» Москва – Нижний Новгород доказал, что все существующие до сих пор опасения о том, что русским заводам не удастся получить трактор такой же прочности и выносливости, как американские, не оправдались...». В протоколе были приведены также высказывания инженера завода Н. Власова о том, что «Красный Путиловец» имеет неограниченные возможности по наращиванию выпуска тракторов, а их стоимость в дальнейшем будет доведена до стоимости американской машины.

В протоколе испытаний «Фордзона-Путиловца» отмечалось, что он показал удовлетворительные результаты и лишь в незначительной степени отличается от американского трактора «Фордзон». Тем самым испытатели подтвердили способность отечественных специалистов в условиях предприятий СССР воспроизвести сложную тяговую технику с надлежащим качеством, дело оставалось

за тиражированием колесных тракторов на заводе «Красный Путиловец».

После завершения продолжительного заседания под председательством В. П. Горячкина все участники (20 человек) вышли в поле смотреть работу двух русских и одного американского тракторов на пахоте. Было это 20 сентября 1924 г., сохранились снимки того времени (рис. 4).

На первом снимке – профессор Василий Прохорович Горячкин (стоит четвертый слева), рядом с ним (стоит пятый слева) предположительно начальник Тракторной технической конторы завода «Красный Путиловец» Иван Лаврентьевич Седов. На втором снимке профессор Павел Михайлович Белянчиков (стоит пятым справа), здесь же предположительно и И. Л. Седов (второй справа).

Необходимо отразить значимую роль в становлении отечественного тракторостроения таких ученых, как В. П. Горячкин и П. М. Белянчиков. По разным причинам, в основном из-за отсутствия исторических исследований в этой области науки, их вклад до сих пор не оценен, а он был весьма весомым. Оба они были влиятельными учеными, профессорами ТСХА имени К. А. Тимирязева, и их мнение учитывалось при принятии решений, касающихся механизации сельского хозяйства. Они входили в состав комиссии Госплана и занимались практической работой по испытанию тракторной техники. Именно они организовали и провели испытания американского трактора «Фордзон» на полях ТСХА, выявили его технические и эксплуатационные характеристики, определили конструктивные недостатки. После испытаний на специальном заседании, на котором присутствовали представители правительственных органов, американской компании и других заинтересованных организаций, ученые ТСХА представили доклад об их результатах с указанием положительных и отрицательных сторон трактора, а также предложили мероприятия по совершенствованию его конструкции. Во многом опираясь на результаты их активной деятельности, Тракторная

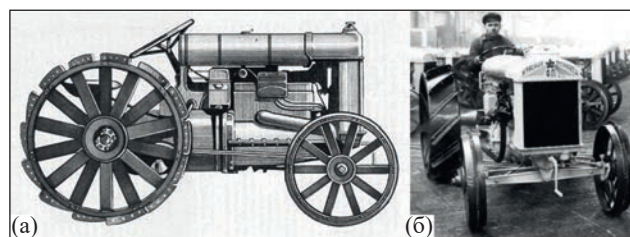


Рис. 5. Трактор «Фордзон-Путиловец» завода «Красный Путиловец»

комиссия Госплана определила свой выбор в пользу колесного трактора «Фордзон». Они же публиковали теоретические и публицистические труды в области тракторостроения, читали лекции и вели практические занятия со студентами инженерного факультета Тимирязевской академии, формируя знания будущих тракторостроителей [9].

Освоение серийного выпуска колесных тракторов на заводе «Красный Путиловец» осуществлялось в СССР впервые. Решая многочисленные проблемы, свойственные первопроходцам, коллектив завода постепенно осваивал технологию серийного выпуска колесных тракторов, тем самым создавая новую для нашей страны тракторостроительную отрасль машиностроения (рис. 5).

На первых порах значительное число комплектующих для нового трактора получали из Америки, но постепенно происходила их локализация. По мере оснащения необходимым оборудованием и станками сложные детали стали изготавливать на «Красном Путиловце». Историки завода отмечают, что копирование иностранного трактора происходило без приобретения лицензии [7]. Тем не менее претензий со стороны владельцев не было, скорее всего, их устраивали постоянные заказы на комплектующие, а воспроизводство модели служило хорошей рекламой фирме.

Конструкторы, помимо чертежей на трактор, проектировали оснастку и приспособления для сборки тракторов, подбирали необходимый инструмент. Делали планировку расстановки оборудования возле своеобразного конвейера, который состоял из поезда сцепленных между собой тележек, приводимых в движение лебедкой. С каждым годом профессионализм рабочих тракторного производства возрастал, увеличивались вместе с этим и темпы сборки тракторов. В 1930 г. заводчане собрали 12 тыс. тракторов «Фордзон-Путиловец».

С 1924 по 1933 г. завод выпустил более 40 000 тракторов, которые продемонстрировали силу и мощь «железного коня» на работах в селе и стали символом коллективизации в сельском хозяйстве СССР.

В 1931 г. специалисты завода «Красный Путиловец» неоднократно выезжали в Сталинград на СТЗ и делились опытом организационной работы на сборочном конвейере. Опытные специалисты помогали отлаживать ритмичную работу молодого коллектива сталинградских тракторостроителей.

С началом выпуска более мощной модели колесного трактора СХТЗ-15/30 на заводах-гигантах Сталинграда и Харькова потребность в «Фордзонах-Путиловцах» отпала. В 1934 г. завод «Красный Путиловец» стал готовиться к освоению производства новой модели колесного трактора, в котором нуждалось сельское хозяйство страны.

Выводы. Тракторизация сельского хозяйства страны в 1920-е гг. проходила путем производства небольших партий самобытных тракторов, целенаправленных

закупок иностранных машин и путем налаживания собственного серийного производства тракторной техники. На основании результатов испытаний и с учетом различных мнений специалистов того времени для воспроизводства на заводе «Красный Путиловец», дирекция которого смогла убедить всех в производственных возможностях своего предприятия, был выбран американский трактор «Фордзон». Большой объем работы по выбору модели трактора выполнили ученые ТСХА имени К. А. Тимирязева В. П. Горячкин и П. М. Белянчиков, которые организовали испытания трактора «Фордзон» в 1922 г. и нескольких «Фордзонов-Путиловцев» в 1924 г. на МИС, в ходе которых была выявлена их перспективность для серийного производства, что стало значительным вкладом в появление новой тракторной отрасли в машиностроении СССР.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации). Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Евсеев Л. Второй план ГОЭЛРО // *Техника – молодежи*. 1975. № 12. С. 48–51.
2. *Трактор и тракторное хозяйство* / под ред. В. Я. Железнова, М. М. Ковалевского и др. М.: Т-во «Бр. А. и И. Гранат и К^о», 1930. Т. 1. С. 51–91.
3. Cradok T. Ford and Farkas and the Model F // *Power Farming*. 1979. No. 7. P. 27–44.
4. Белянчиков П. М. Трактор «Фордзон» и результаты его испытания. М.: Мотор, 1923. 28 с.
5. Белянчиков П. М. Американский тракторный отряд Помгола (Совхоз Тайкино, Сарапульского у.) // *Сельскохозяйственная жизнь*. 1922. № 3. С. 5–9.
6. Бриллинг Н. Р. Отзыв «НАМИ» о тракторах «Запорожец», Коломзавода, «Гном» и «Фордзон» // *Труды Госплана*. 1923. № 4. С. 177–183.
7. Костюченко С., Хренов И., Федоров Ю. История Кировского завода. 1917–1945. М.: Мысль, 1966. 702 с.
8. Испытания трактора «Фордзон-Путиловец» завода Красный Путиловец // *Архив Музея сельскохозяйственной механики имени В. П. Горячкина*. Д. 13.
9. Шаров В. В. Академик В. П. Горячкин – активный участник становления отечественного тракторостроения. Чтения академика В. Н. Болтинского: сборник статей / под ред. В. И. Трухачева, О. Н. Дидманидзе. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2023. 272 с.

Поступила в редакцию 07.08.2024
После доработки 29.08.2024
Принята к публикации 18.09.2024

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция помещает не более двух статей одного автора в год. Это правило не распространяется на академиков и членов-корреспондентов РАН и других академий.
2. Объем статьи не менее 12 стр., включая таблицы (не более 4), рисунки (не более 4), библиографию (до 25 названий). Статья, набранная крупным шрифтом через 1,5 интервала, пересылается по E-mail: nsm2308@yandex.ru. В ней должны быть указаны УДК, название статьи, инициалы и фамилии авторов, степени, полное название учреждения с адресом, E-mail, реферат (объемом 200–250 слов с указанием цели опытов, объекта исследований, анализа полученных данных), ключевые слова, и все продублировано на английском языке. Таблицы и рисунки в одном файле с текстом. В тексте выделить «Методика» и «Результаты и обсуждение». Повторение одних и тех же данных в тексте, таблицах, графиках недопустимо. В конце статьи указать номер телефона (служебный, домашний, мобильный) каждого соавтора.
3. Рисунки (графический материал) должны быть выполнены четко, представлены на отдельном листе в формате, обеспечивающем ясность передачи всех деталей, и/или на электронном носителе (программы «Adobe PhotoShop», «Adobe Illustrator»).
4. Статья с большим количеством формул (не более 10) представляется на электронном носителе – (программа «MS Equation» или подобная).
5. При описании методики исследования следует ограничиваться оригинальной ее частью, при элементном анализе приводить только усредненные данные.
6. Использованная литература приводится в порядке очередности упоминания, в тексте – цифровые ссылки в квадратных скобках. Список литературы оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. Доля ссылок на источники старше 10 лет не должна превышать 30 % списка литературы, доля ссылок на публикации в журналах из ядра РИНЦ за последние 8 лет должна составлять не менее 50 % списка литературы. Желательны ссылки на журналы, входящие в базы данных Scopus и Web of Science. Цитируемость своих работ не более 15 %.
7. При получении статьи редакция рассматривает ее соответствие тематике журнала и посылает на рецензию ведущим специалистам. Возвращение рукописи автору на доработку с копией рецензии не означает, что статья принята к печати. Датой поступления считается день получения редакцией окончательного варианта статьи.
8. Редакция посылает авторам на визу подготовленный к печати экземпляр статьи, который должен быть выслан обратно в течение суток с момента его получения.

Авторам высылается журнал в электронном виде.

С аспирантов плата за публикацию не взимается.

Для получения гонорара за публикацию в англоязычном издании авторы могут обратиться в Российское авторское общество по адресу:

123995, Москва,

ул. Бронная, д. 6, стр. 1,

тел.: +7 (495) 697-33-35;

и на сайте РАО: www.rao.ru (подвести курсор на «Правообладатели», далее на «Авторам научных статей»). Здесь находятся документы для получения авторского гонорара.

Журнал рассылается только по подписке, в розничную продажу не поступает.