



Обоснование искусственной почвенной среды для лабораторных исследований износа и тяговых характеристик почворезущих рабочих органов

Игорь Викторович Лискин,
научный сотрудник;

Анастасия Владимировна Миронова,
аспирант, младший научный сотрудник,
e-mail: timchenko-anastasia93@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Представили результаты лабораторных исследований искусственной почвенной среды на основе песчано-парафиновых смесей, отражающей физико-механические свойства почвы с наличием растительных остатков. Провели испытания по определению тягового сопротивления почворезущих рабочих органов при обработке почвы с наличием корневых и пожнивных остатков. (*Цель исследования*) Обосновать параметры искусственной почвенной среды, содержащей модели корневых и пожнивных остатков, для лабораторных исследований износа и тяговых характеристик почворезущих рабочих органов, эксплуатируемых на послеуборочных, целинных и залежных сельхозугодиях. (*Материалы и методы*) Разработали искусственную почвенную среду путем введения в ее состав нитевидных компонентов длиной 5-25 миллиметров. (*Результаты и обсуждение*) Определили критерии геометрического подобия «модель – натура» для почвенных условий Нечерноземной зоны России. Установили, что равенство критериев подобия «модель – натура» для лабораторного исследования залежных земель происходит при значениях длины нитевидных компонентов от 20 мм и концентрации от 20 отрезков на единицу площади сечения при прохождении 0,1 метра в искусственной почвенной среде. Выявили, что для моделирования старопахотных земель длина нитевидных компонентов должна превышать 5 миллиметров, концентрация – от 10 отрезков на 0,1 метра длины прохождения в искусственной почвенной среде. Провели полевые испытания пахотных агрегатов на залежных и старопахотных землях. (*Выводы*) Установили, что равенство геометрических критериев подобия искусственной почвенной среды и реальных почвенных условий позволяет проводить лабораторные исследования изнашивания и тяговых характеристик лезвий почвообрабатывающих рабочих органов. Определили, что на целинных и залежных землях более 30 процентов затрат энергии приходится на разрыв корневой системы растительного покрова.

Ключевые слова: искусственная почвенная среда, изнашивание лезвий почвообрабатывающих рабочих органов, залежные и старопахотные земли, растительные остатки, тяговое сопротивление.

■ Для цитирования: Лискин И.В., Миронова А.В. Обоснование искусственной почвенной среды для лабораторных исследований износа и тяговых характеристик почворезущих рабочих органов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №3. С. 53-58. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-3-53-58.

Artificial Soil Environment Justification for Laboratory Studies of Wear and Traction Characteristics of Soil-Cutting Working Bodies

Igor V. Liskin,
Researcher;

Anastasia V. Mironova,
postgraduate student, junior researcher,
e-mail: timchenko-anastasia93@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The authors presented the results of laboratory studies of artificial soil based on sand-paraffin mixtures, reflecting the physical and mechanical soil properties with the presence of plant residues. They conducted tests to determine the soil-cutting working bodies' traction resistance during tillage with the presence of root and crop residues. (*Research purpose*) To substantiate the parameters of an artificial soil environment containing models of root and crop residues for laboratory studies of the wear and traction characteristics of soil-cutting working bodies operated on post-harvest, virgin and fallow farmland. (*Materials and methods*) An artificial soil environment was developed by introducing filamentous components 5-25 millimeters long into its composition. (*Results and discussion*) The authors determined the criteria of geometric similarity “model – nature” for the soil conditions of the Non-Black Earth Zone of Russia. It was found that the equality of the criteria “model – nature” for laboratory research of fallow lands occurred when the length of the filamentous components was from 20 mm and the concentration was from 20 segments per unit cross-sectional area when passing 0.1 meter in artificial soil. It was revealed that for modeling old arable lands, the length of the

filamentous components should exceed 5 millimeters, the concentration should be from 10 segments per 0.1 meter of the length of passage in artificial soil. The authors conducted field tests of arable units on fallow and old arable lands. (*Conclusions*) The authors found out that the equality of the geometric criteria for the similarity of the artificial soil environment and real soil conditions allowed laboratory studies of the wear and traction characteristics of the tillage working bodies' blades. It was determined that more than 30 percent of energy costs were accounted for by breaking the root system of the vegetation cover on virgin and fallow lands.

Keywords: artificial soil environment, tillage working bodies blades wear, fallow and old arable land, plant residues, traction resistance.

For citation: Liskin I.V., Mironova A.V. Obosnovanie iskusstvennoy pochvennoy sredy dlya laboratornykh issledovaniy iznosa i tyagovykh kharakteristik pochvorezhushchikh rabochikh organov [Artificial soil environment justification for laboratory studies of wear and traction characteristics of soil-cutting working bodies]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N3. 53-58 (In Russian. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-3-53-58).

Исследование изнашивания почворезущих рабочих органов в полевых условиях имеет определенные сложности, связанные с непостоянством, неоднородностью пахотного слоя и изменяющимися погодными условиями [1]. В послеуборочный период большое влияние на эксплуатационные характеристики почворезущих деталей оказывают корневые и пожнивные остатки [2].

По этим причинам во многих случаях единственно возможные методы исследования – лабораторные, с использованием различных стендов, обеспечивающих взаимодействие образцов или фрагментов рабочих деталей с абразивными и другими частицами, присутствующими в почве [3].

Цель исследования – обосновать параметры искусственной почвенной среды, содержащей модели корневых и пожнивных остатков, для лабораторных исследований износа и тяговых характеристик почворезущих рабочих органов, эксплуатируемых на послеуборочных, целинных и залежных сельхозугодиях.

Материалы и методы. За основу приняли искусственную почвенную среду (ИПС), содержащую кварцевые частицы, пылевидный цемент и технический парафин [4, 5]. Она отличается от песчано-глинистых абразивных материалов, применяемых в иных лабораторных установках, например типа «вращающаяся чаша» или в почвенных каналах, в первую очередь стабильностью свойств в течение длительного времени.

Для изготовления блока ИПС применяют емкость, состоящую из двух цилиндрических баков разного диаметра. Между баками устанавливают нагревательный элемент и заливают воду. В середине внутреннего бака на крышке закрепляют шнековый смеситель. В бак засыпают твердый парафин. При необходимости к нему добавляют церезин или вазелин. Когда вода нагревается до 75-80°C, парафин расплавляется и принимает жидкое состояние. Затем вводят твердую фракцию, закрывают крышку, включают шнек. Полученная масса заливается в форму. После застывания форму разбирают, смесь готова к использованию.

Однако при всех достоинствах ИПС на основе песчано-парафиновых смесей имеется один пробел, присутствующий всем лабораторным установкам для исследо-

вания закономерности изнашивания почворезущих лезвий: невозможно моделировать почвенные условия с наличием корневых и пожнивных остатков, присутствующих реальным почвам по окончании уборочных работ, а также почвам целинных и залежных земель [6].

Для решения поставленной задачи в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ разработали искусственную почвенную среду на основе песчано-парафиновых смесей, содержащих нитевидные компоненты из капрона или хлопчатобумажных материалов.

Длину нитей определили исходя из критериев, основанных на теории подобия, одним из которых является масштабный фактор, характеризующий геометрическое подобие системы, а также необходимые и достаточные условия однозначности [7, 8]. Речь идет об отношении размера одного из компонентов, в данном случае длины растительного остатка корневой системы, входящего в единицу площади сечения почвенной среды, к величине аналогичного компонента, входящего в единицу площади сечения модели [9].

Для реальной почвы (натуры) геометрический критерий подобия выражается в виде:

$$\pi_n = \frac{l_n Q_n d_n}{S_n};$$

для ИПС этот показатель равен:

$$\pi_m = \frac{l_m Q_m d_m}{S_m},$$

где l_n – средняя длина волокна, мм;

Q_n – количество волокон, шт.;

d_n – диаметр волокна, мм;

S_n – единица площади сечения натуры, мм²;

l_m, Q, d_m, S_m – аналогичные параметры модели.

При условии $\pi_n \sim \pi_m$ будет соблюдаться идентичность процессов, происходящих в натуре и на модели.

Результаты и обсуждение. При обработке реальной почвы, например при вспашке, глубина составляет в среднем 200-250 мм, ширина захвата – 350-400 мм. Площадь сечения пласта при ширине захвата 350 мм равна $S_n = 200 \times 350 \text{ мм}^2$. На этой площади при вспашке послеуборочной стерни из-под зерновых

культур каждым корпусом плуга на одном погонном метре пахоты запахиваются 200-250 волокон корневых системы, средняя длина которых составляет 120-250 мм [10].

Примем $l_n = 200$ мм, $Q_n = 200$, $d_n = 2$ мм, $S_n = 200 \times 350$ мм². Тогда величина π_n равна 1,14.

Для определения критерия π_m рассмотрим некоторые параметры технической характеристики лабораторной установки, использующей в качестве ИПС песчано-парафиновые смеси.

Площадь сечения пласта S_m , возникающего при движении образца на модели, может составлять 0,5-6 мм по глубине, умноженной на ширину лезвия 10-30 мм. Длина отрезков нитевидных материалов $l_m = 5-20$ мм, $Q_m = 5-25$ отрезков на 0,1 м длины прохождения образца в ИПС, $d_m = 0,5-1,5$ мм.

Принимаем $l_m = 7$ мм, $Q_m = 12$, $d_m = 1$ мм, $S_m = 2,5 \times 30$ мм². В этом случае критерий подобия $\pi_m = 1,15$.

Таким образом, относительная разность значений π_n и π_m менее 1%, что указывает на достаточно точное подобие модели реальным почвенным условиям (натуре) [11].

Изменяя количество Q_m и длину l_m нитевидных материалов, можно моделировать процесс изнашивания лезвий рабочих органов почвообрабатывающих машин в различных почвенных условиях.

Приведем пример моделирования проблемных почв: целинных или задернелых, то есть запущенных земельных угодий. Для них характерны более насыщенная травяным покровом поверхность пахотного слоя и увеличенная длина волокон корневой системы. Глубина обработки увеличивается до 300-400 мм [12]. При этом ширина захвата плугов общего назначения как правило не меняется.

Площадь сечения пласта увеличивается за счет большей глубины обработки, а концентрация корневых волокон возрастает до 500-700 шт. на погонный метр пахоты. При этом длина волокон достигает 200-400 мм в зависимости от вида сорняков и другой травяной растительности [13].

Определим критерий π_n для реальных почвенных условий при вспашке целинных земель.

Примем $l_n = 350$ мм, $Q_n = 500$, $d_n = 2$ мм, $S_n = 350 \times 400$ мм². Тогда $\pi_n = 2,5$.

Проведем расчет критерия π_m для модели ИПС целинных и залежных земель. Примем следующие значения исследуемых параметров: $l_m = 20$ мм, $Q_m = 20$, $d_m = 1$ мм, $S_m = a_m h_m = 15 \times 3,5$ мм², где a_m – ширина лезвия, мм;

h_m – глубина резания, мм.

Тогда $\pi_m = 2,6$.

Сопоставляя численные значения π_n и π_m , нетрудно заметить, что различие между критериями не превышает 5%, что укладывается в рамки подобия модели натуральной среде [14].

Для проверки правильности выбранных величин,

характеризующих свойства модели, и обоснования адекватности разработанной модели реальным натурным условиям проведены расчеты критериев π для старопахотных почв после уборки зерновых культур (ячменя) применительно к Нечерноземной зоне России.

Глубина h_n пахоты подобных почв как правило составляет 180-250 мм, высота растительных остатков корневой системы – 100-250 мм [15]. Концентрация волокон $Q_n = 200-350$ шт. в площади сечения пласта на одном погонном метре длины прохождения рабочего органа. Средний диаметр растительных волокон $d_n = 2$ мм. В этом случае критерий подобия будет равен $\pi_n = 200 \times 250 \times 2 / 200 \times 200 = 2,5$.

Критерий π для модели определим исходя из значений параметров: $l_m = 5$ мм, $Q_m = 10$, $d_m = 1$ мм, $S_m = a_m h_m = 5 \times 2,5$ мм². Тогда $\pi_m = 2,5$.

Равенство значений критериев указывает на соблюдение необходимых и достаточных условий для исследования изнашивания почворезущих лезвий и их тяговых характеристик [16, 17].

Осенью 2019 г. в пос. Подвизье Рязанской области на тяжелосуглинистом черноземе провели полевые эксплуатационные испытания двух пахотных агрегатов в составе тракторов МТЗ-82 с плугами ПЛН-3-35 с одинаковыми стандартными корпусами на вспашке залежных земель (рис. 1а) и поля после уборки ячменя (рис. 1б). Определили тяговое сопротивление плуга на каждом из полей.

Методика определения тягового сопротивления



Рис. 1. Виды полей: а – при вспашке залежных земель; б – при уборке зерновых культур

Fig. 1. Fields types: a – when fallow lands plowing; b – when crops harvesting

пахотных агрегатов подробно изложена в работах [18, 19]. Физико-механический состав и твердость почвы во время испытаний соответствовали среднестатистическим параметрам для подобных почв региона центральной полосы России. Твердость почвы на залежном участке составляла 3,8 МПа, на послеуборочном – 3,4 МПа. В задачу испытаний входило сопоставление тягового сопротивления на старопахотных и залежных почвах.

Получили результаты измерений тягового сопротивления при скоростях пахотных агрегатов 1,5; 2,0 и 2,5 м/с (табл. 1, рис. 2).

Результаты испытаний пахотных агрегатов показывают, что тяговое сопротивление плуга при обработке залежных земель на 25-30% выше, чем на ста-

ропахотных почвах после уборки урожая.

На залежных землях, помимо твердости, большое влияние оказывает связность плотной травянистой растительности. Вследствие этого энергетические затраты дополнительно расходуются на деформацию и разрыв корневой системы дернины [20, 21].

В лабораторных условиях исследовали тяговое со-

Таблица 1 ТЯГОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПАХОТНЫХ АГРЕГАТОВ, кН TRACTION RESISTANCE OF ARABLE UNITS, kN		Table 1		
Агротехнический фон Agricultural background	Скорость агрегата, м/с Unit speed, m/s			
	1,5	2,0	2,5	
Стерня / Stubble	11,4	11,9	13,0	
Залежь / Long-fallow lands	14,6	15,5	17,5	

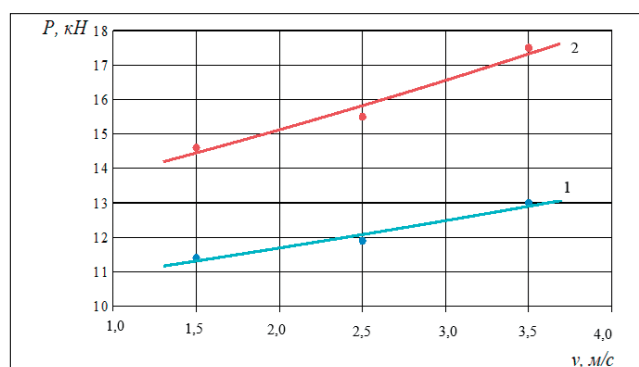


Рис. 2. Зависимость тягового сопротивления от скорости пахотных агрегатов: 1 – на стерне; 2 – на залежи

Fig. 2. The dependence of traction resistance on the arable units speed: 1 – on the stubble; 2 – on long-fallow lands

противление плуга и почворезущего лезвия при различной твердости почв и ИПС. С увеличением твердости на 20% тяговое сопротивление возросло на 7-10% в почвенной среде и на 6-8% в ИПС.

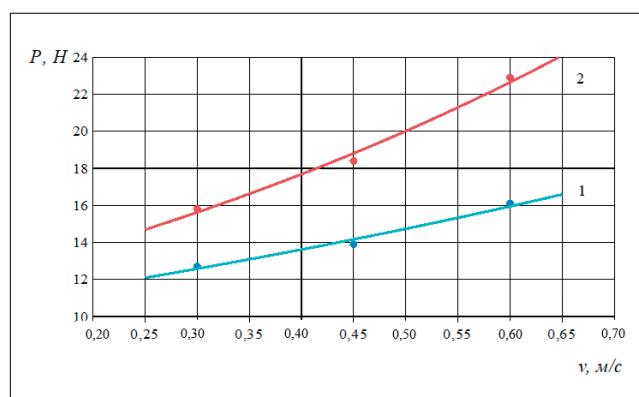


Рис. 4. Зависимость усилий резания от скорости движения лезвия образца: 1 – на модели старопашотной почвы; 2 – на модели залежной почвы

Fig. 4. The dependence of cutting forces on the movement speed of the sample blade: 1 – on the model of old-arable soil; 2 – on the model of fallow soil

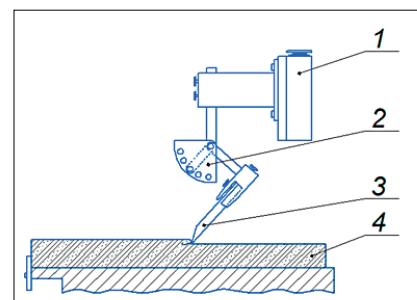


Рис. 3. Общий вид и схема лабораторной установки:

1 – ползун с динамометром; 2 – держатель; 3 – почворезущее лезвие; 4 – искусственная почвенная среда

Fig. 3. General view and layout of the laboratory unit:

1 – slider with a dynamometer; 2 – holder; 3 – soil-cutting blade; 4 – artificial soil

Проведенные нами полевые испытания показали, что на залежном участке поля тяговое сопротивление пахотного агрегата возросло на 30% по сравнению со старопахотным участком. Таким образом, на разрыв травяного покрова залежных земель расходуется более 1/3 энергетических затрат при работе пахотного агрегата.

Определим зависимость тягового сопротивления лезвия образца, режущего слой абразивного материала ИПС, в состав которой входят хлопчатобумажные нити (рис. 3). Для модели, отражающей целинные и залежные земли, примем значения параметров: $l_m = 15$ мм, $Q_m = 20$, $d_m = 1$ мм, $a_m = 25$ мм, $h_m = 5$ мм.

Скорость движения ползуна установки, на котором закрепляли образцы, составляла 0,30; 0,45 и 0,60 м/с. Твердость ИПС измеряли по методу Бринелля. Этот показатель повысили на 12%, по сравнению со старопахотными землями, посредством введения в парафин церезина, как в натурных исследованиях. Для обеспечения подобия ИПС почве суглинистого состава в нее добавили 30% пылевидного цемента. Для модели, отражающей старопахотные земли, примем значения $l_m = 10$ мм, $Q_m = 10$, $d_m = 1$ мм, $a_m = 25$ мм, $h_m = 5$ мм. Церезин в данном исследовании не применяли.

Образцы, движущиеся в ИПС, моделирующей залежные земли, испытывают тяговое сопротивление на 25-35% больше, чем ИПС, моделирующее старопахотные земли (табл. 2, рис. 4). Это указывает на идентичность процессов в натуре и на модели [21].

Изменяя состав ИПС, в частности соотношение кварцевых частиц и пылевидного цемента, соотношение между парафином и церезином или техническим

Таблица 2 УСИЛИЕ РЕЗАНИЯ ЛЕЗВИЯ ОБРАЗЦА МОДЕЛИ ПОЧВЫ, Н THE CUTTING FORCE OF THE BLADE SAMPLE MODEL SOIL, N		Table 2		
Модель искусственной почвенной среды Model of artificial soil	Скорость резания, v, м/с Cutting speed, v, m / s			
	0,30	0,45	0,60	
Стерня / Stubble	12,7	13,9	16,1	
Залежь / Long-fallow lands	15,8	18,4	22,9	



вазелином, а также количеством и длиной отрезков нитей, можно получить широкий спектр физико-механических свойств модели почвы (ИПС), отражающих большинство пахотных угодий России.

Если в блок ИПС добавить более крупные фрагменты, например дробленый до 3-5 мм гравий или щебень, то можно получить почвенную модель с каменистыми включениями. В данной работе таких исследований не проводилось. И, наконец, одним из важнейших преимуществ ИПС на основе твердых частиц и парафина стала стабильность ее свойств в течение длительного времени, что значительно снижает ошибки в опытах.

Выводы

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоров С.А., Миронов Д.А., Поткин С.Н., Лискин И.В. Комбинированные лабораторные исследования материалов рабочих органов на абразивный износ // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. Т. 10. №6. С. 21-26.
2. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов В.А., Волобуев В.А. Технологии и технические средства для восстановления неиспользуемых и деградированных сельхозугодий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2009. Т. 3. №4. С. 17-21.
3. Смагин А.В. Теория и практика конструирования почв. М.: Издательство Московского университета. 2012. 544 с.
4. Karmakar S., Lal Kushwaha R. CFD Simulation of Soil Forces on a Flat Tillage. *At ASAE Meeting Presentation*. 2005. N2. 56-61.
5. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа. 1976. 480 с.
6. Лискин И.В., Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Сидоров С.А., Панов А.И. Результаты лабораторных исследований почворезущих рабочих органов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №4. С. 41-47.
7. Алабушев П.М., Геронимус В.Б., Минкевич Л.М., Шеховцов Б.А. Теория подобия и размерностей. М.: Высшая школа. 1968. 205 с.
8. Измайлов А.Ю., Лискин И.В., Лобачевский Я.П., Сидоров С.А., Хорошенков В.К., Миронова А.В., Лужнова Е.С. Применение теории подобия для моделирования износа почворезущих лезвий в искусственной абразивной среде // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2016. №6. С. 48-51.
9. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Y.P., Masitov N.K., Rakhimov R.S., Khamaletdinov R.R., Rarhimov I.R., Farkhutdinov I.M., Mukhametdinov A.M., Gareev R.T. Modeling the technological process of tillage. *Soil & Tillage Research*. 2019. Vol. 190. 70-77.
10. Zhou C.-Y., Kong L.-H., Cui G.-J., Yu K., Liu Z. Molding simulation of soft rock based on natural red bed materials. *Rock and Soil Mechanics*. 2020. Vol. 41. N2. 419-427.
11. Васенов И.И., Бузылев А.В., Курбатова Ю.А., Руднев Н.И., Тиунов А.И., Чистотин М.В. Агроэкологическое моделирование и проектирование. М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. 2010. 120 с.

1. Для моделирования почвенных условий с наличием растительных и корневых остатков в искусственную почвенную среду на основе песчано-парафиновой смеси рекомендуется вводить в ее состав нитевидные компоненты длиной 25 мм.

2. Равенство геометрических критериев подобия ИПС реальным почвенным условиям позволяет проводить исследования изнашивания и тяговых характеристик лезвий почвообрабатывающих рабочих органов в лабораторных условиях.

3. На целинных и залежных землях более 1/3 энергетических затрат приходится на разрыв корневой системы растительного покрова.

12. Лобачевский Я.П. Прочностные и деформационные свойства связных задерненных почв // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2011. Т. 5. №3. С. 18-20.
13. Каштанов А.Н., Сизов О.А. Проблемы восстановления угодий, выбывших из сельскохозяйственного использования // *Экономика сельского хозяйства России*. 2008. №11. С. 174-176.
14. Мазитов Н.К., Шогенов Ю.Х., Ценч Ю.С. Сельскохозяйственная техника: решения и перспективы // *Вестник ВИАХ*. 2018. №3(32). С. 94-100.
15. Flenniken J.I., Hefner R.E., Weber I.A. Dynamic soil strength parameters from unconfined compression tests. *Transaction of the ASAE*. 1977. Vol. 20. N1. 21-25.
16. Raper R.L., Reeves D.W., Burt E.C. Using in-row subsoiling to minimize soil compaction caused by traffic. *Journal of Cotton Science*. 1998. N2. 130-135.
17. Миронов Д.А., Лискин И.В., Сидоров С.А. Влияние геометрических параметров долота на тяговые характеристики и ресурс лемехов отечественных плугов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. №6. С. 25-29.
18. Чертов О.Г., Комаров А.С., Надпорожская М.А., Михайлов А.В., Быховец С.С., Зудин С.Л., Зубкова Е.В. Динамическое моделирование процессов трансформации органического вещества почв. Имитационная модель ROMUL. Санкт-Петербургский государственный университет. 2007. 96 с.
19. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Чемисов Н.Н. Энергетическая и технологическая оценка почвообрабатывающего рабочего органа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. №5. С. 10-13.
20. Лискин И.В., Миронов Д.А., Курбанов Р.К. Обоснование параметров искусственной почвенной среды для лабораторного исследования изнашивания лезвия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. №4. С. 37-42.
21. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Лискин И.В., Миронов Д.А., Хорошенков В.К., Сидоров С.А. Повышение конструкционной прочности рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2018. №3. С. 57-60.

REFERENCES

1. Sidorov S.A., Mironov D.A., Potkin S.N., Liskin I.V. Kombinirovannye laboratornye issledovaniya materialov rabochikh organov na abrazivnyy iznos [Combined laboratory research of materials of working bodies for abrasive wear]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2016. Vol. 10. N6. 21-26 (In Russian).
2. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sizov V.A., Volobuev V.A. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya vosstanovleniya neispol'zuemykh i degradirovannykh sel'khozugodiy [Technologies and technical means for restoration of unused and degraded farmland]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2009. Vol. 3. N4. 17-21 (In Russian).
3. Smagin A.V. Teoriya i praktika konstruirovaniya pochv [Theory and practice of soil construction]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta. 2012. 544 (In Russian).
4. Karmakar S., Lal Kushwaha R. CFD Simulation of Soil Forces on a Flat Tillage. *Ah ASAE Meeting Presentation*. 2005. N2. 56-61 (In English).
5. Venikov V.A. Teoriya podobiya i modelirovaniya. [Theory of similarity and modeling]. Moscow: Vysshaya shkola. 1976. 480 (In Russian).
6. Liskin I.V., Lobachevskiy Ya.P., Mironov A.D., Sidorov S.A., Panov A.I. Rezul'taty laboratornykh issledovaniy pochvovozhushchikh rabochikh organov [The results of laboratory studies of soil-cutting working bodies]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. N4. 41-47 (In Russian).
7. Alabuzhev P.M., Geronimus V.B., Minkevich L.M., Shekhovtsov B.A. Teoriya podobiya i razmernostey. [Theory of similarity and dimensions]. Moscow: Vysshaya shkola. 1968. 205 (In Russian).
8. Izmaylov A.Yu., Liskin I.V., Lobachevskiy Ya.P., Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Mironova A.V., Luzhnova E.S. Primenenie teorii podobiya dlya modelirovaniya iznosa pochvovozhushchikh lezviy v iskusstvennoy abrazivnoy srede [Application of similarity theory for modeling the wear of soil-cutting blades in an artificial abrasive medium]. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*. 2016. N6. 48-51 (In Russian).
9. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Y.P., Masitov N.K., Rakhimov R.S., Khamaletdinov R.R., Rakhimov I.R., Farkhutdinov I.M., Mukhametdinov A.M., Gareev R.T. Modeling the technological process of tillage. *Soil & Tillage Research*. 2019. Vol. 190. 70-77.
10. Zhou C.-Y., Kong L.-H., Cui G.-J., Yu K., Liu Z. Molding simulation of soft rock based on natural red bed materials. *Rock and Soil Mechanics*. 2020. Vol. 41. N2. 419-427.
11. Vasenov I.I., Buzylev A.V., Kurbatova Yu.A., Rudnev N.I., Tiunov A.I., Chistotin M.V. Agroekologicheskoe modelirovanie i proektirovanie [Agroecological modeling and design]. Moscow: RGAU-MSKhA imeni K.A. Timiryazeva. 2010. 120.
12. Lobachevskiy Ya.P. Prochnostnye i deformatsionnye svoystva svyaznykh zadernennykh pochv [Strength and deformation properties of cohesive sod soils]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2011. Vol. 5. N3. 18-20 (In Russian).
13. Kashtanov A.N., Sizov O.A. Problemy vosstanovleniya ugodiy, vybyvshikh iz sel'skokhozyaystvennogo ispol'zovaniya [Problems of restoration of land retired from agricultural use]. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva Rossii*. 2008. N11. 174-176 (In Russian).
14. Mazitov N.K., Shogenov Yu.Kh., Tsench Yu.S. Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: resheniya i perspektivy [Agricultural machinery: solutions and prospects]. *Vestnik VIESH*. 2018. N3(32). 94-100 (In Russian).
15. Flenniken J.I., Hefner R.E., Weber I.A. Dynamic soil strength parameters from unconfined compression tests. *Transaction of the ASAE*. 1977. Vol. 20. N1. 21-25 (In English).
16. Raper R.L., Reeves D.W., Burt E.C. Using in-row subsoiling to minimize soil compaction caused by traffic. *Journal of Cotton Science*. 1998. N2. 130-135 (In English).
17. Mironov D.A., Liskin I.V., Sidorov S.A. Vliyaniye geometricheskikh parametrov dolota na tyagovye kharakteristiki i resurs lemkhov otechestvennykh plugov [Influence of geometric parameters of the bit on the traction characteristics and resource of ploughshares of domestic ploughshares]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. N6. 25-29 (In Russian).
18. Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Mikhaylov A.V., Bykhovets S.S., Zudin S.L., Zubkova E.V. Dinamicheskoe modelirovanie protsessov transformatsii organicheskogo veshchestva pochv. Imitatsionnaya model' ROMUL [Dynamic modeling of soil organic matter transformation processes. The simulation model ROMUL]. Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet. 2007. 96 (In Russian).
19. Lobachevskiy Ya.P., Starovoytov S.I., Chemisov N.N. Energeticheskaya i tekhnologicheskaya otsenka pochvoobrabatyvayushchego rabocheho organa [Energy and technological assessment of the tillage working body]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. N5. 10-13 (In Russian).
20. Liskin I.V., Mironov D.A., Kurbanov R.K. Obosnovanie parametrov iskusstvennoy pochvennoy sredy dlya laboratornogo issledovaniya iznashivaniya lezviya [Justification of parameters of artificial soil environment for laboratory research of blade wear]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2017. N4. 37-42 (In Russian).
21. Izmaylov A., Yu., Lobachevskiy Ya.P., Liskin I.V., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Sidorov S.A. Povysheniye konstruksionnoy prochnosti rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Increasing the structural strength of the working bodies of tillage machines]. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka*. 2018. N3. 57-60 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

**Статья поступила в редакцию 02.03.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 02.03.2020**

**Статья принята к публикации 25.08.2020
The paper was accepted
for publication on 25.08.2020**