

## Оптимизация параметров комбинированного орудия для сплошной обработки почвы – плоскорез и дисковый плуг

С.В. Малуков<sup>1а</sup>, Л.Д. Бухтояров<sup>1б</sup>, М.Н. Лысыч<sup>1с</sup>, М.В. Шавков<sup>2д</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Россия

<sup>2</sup> ООО «Русгидроком», ул. Мазлумова, 25, Воронеж, Россия

<sup>а</sup> malyukovsergey@yandex.ru, <sup>б</sup> vglta-mlx@yandex.ru, <sup>с</sup> miklynea@yandex.ru, <sup>д</sup> shavkovmv@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2098-154X>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, <sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3700-7508>

Статья поступила 16.06.2025, принята 08.09.2025

*Во всем мире ведутся работы по созданию новых и модернизации существующих агрегатов для обработки почвы, при этом особое внимание уделяется снижению энергозатрат и повышению качества работ. Разнообразие климатических и почвенных условий требует от конструкторов учёта различных факторов при разработке современных машин, которые эффективно обрабатывают почву. Существующие машины справляются с поставленными задачами, но необходимо продолжать их усовершенствование. В работе представлены результаты определения оптимального взаимного расположения рабочих органов плоскореза и дискового корпуса плуга, с применением метода дискретных элементов (DEM). В процессе оптимизации, на основе результатов 20 компьютерных экспериментов, варьировали различные факторы в диапазонах: заглубление плоскореза в почву от 10 до 20 см, боковое смещение плоскореза относительно центра борозды от –20 до 10 см, угол атаки дискового плуга от 35 до 50°. Для более точного определения оптимальных диапазонов использовалась оптимизация с использованием радиальных нейронных сетей. Нейросетевой метод позволяет значительно более точно аппроксимировать гиперповерхность отклика по сравнению с полиномиальным, и позволяет просканировать многомерное факторное пространство с малым шагом, определить оптимальные области и найти их проекции на координатные плоскости или оси. Результаты показали, что оптимальные параметры орудия составляют: величина заглубления плоскореза 14–16 см, боковое смещение плоскореза минус 3–0 см, угол атаки дискового плуга 42–45°. При этом комбинированное орудие обеспечивает коэффициент полноты рыхления почвы более 62 %, коэффициент оборачиваемости пласта более 39 %, силу сопротивления движению орудия менее 4400 Н. Практическая реализация разработанных параметров позволит снизить энергозатраты на обработку почвы, что будет способствовать эффективному проведению лесовосстановительных работ.*

**Ключевые слова:** обработка почвы, дисковый плуг, комбинированное орудие, нейросетевая оптимизация, метод дискретных элементов (DEM).

## Optimization of parameters of the combined tool for continuous tillage – a plane cutter and a disc plow

S.V. Malyukov<sup>1а</sup>, L.D. Bukhtoyarov<sup>1б</sup>, M.N. Lysych<sup>1с</sup>, M.V. Shavkov<sup>2д</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia

<sup>2</sup> LLC "Rushydrocom"; 25, Mazlumova St., Voronezh, Russia

<sup>а</sup> malyukovsergey@yandex.ru, <sup>б</sup> vglta-mlx@yandex.ru, <sup>с</sup> miklynea@yandex.ru, <sup>д</sup> shavkovmv@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2098-154X>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7428-0821>,

<sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3764-3873>, <sup>д</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3700-7508>

Received 16.06.2025, accepted 08.09.2025

*All over the world, new and modernized tillage machines are being developed, with a focus on reducing energy costs and improving the quality of work. The diversity of climatic and soil conditions requires designers to take various factors into account when developing modern machines that effectively till the soil. The existing machines are coping with the set tasks, but it is necessary to continue their improvement. The paper presents the results of determining the optimal mutual arrangement of the working bodies of the plow plane and disk plow body, using the Discrete Element Method (DEM). In the process of optimization, based on the results of 20 computer experiments, various factors were varied in the ranges: plough blade depth into the soil from 10 to 20 cm, lateral displacement of the plough blade relative to the furrow center from –20 to 10 cm, angle of attack of the disc plough from 35 to 50°. Optimization using radial neural networks was used to determine the optimal ranges more accurately. The neural network method allows a much more accurate approximation of the response hypersurface compared to the polynomial method, and allows scanning the multidimensional factor space with a small step, determining the optimal areas and finding their projections on coordinate planes or axes. The results show that the optimal parameters of the implement are as follows: the value of the plane cutter depth 14–16 cm, the lateral displacement of the plane cutter minus 3–0 cm, the angle of attack of the disk plow 42–45°. At the same time, the combined tool provides the coefficient of soil loosening completeness more than 62%, the coefficient of layer turnover more than 39%, the force of resistance to the tool movement less than 4400 N. Practical implementation of the developed parameters will reduce energy consumption for soil tillage, which will contribute to effective reforestation work.*

**Keywords:** tillage, disc plow, combined implement, neural network optimization, discrete element method (DEM).

**Введение.** В современном лесном хозяйстве важно разрабатывать эффективные технологии обработки почвы для лесовосстановления, чтобы обеспечивать приживаемость лесных культур, улучшать структуру грунта и создавать условия для роста новых насаждений [1; 2].

Для этого создаются многофункциональные универсальные машины [3; 4] с большим количеством сменных агрегатов и механизмов, которые позволяют выполнять разнообразные задачи и снижают энергозатраты на обработку почвы [5; 6].

Традиционные подходы к изучению взаимодействия почвы с орудиями имеют недостатки: высокие затраты времени и ресурсов, ограниченную воспроизводимость результатов. Численные методы, в частности метод дискретных элементов (DEM), позволяют анализировать динамику почвенных процессов и оптимизировать конструкцию сельскохозяйственных и лесных машин.

Метод дискретных элементов (DEM) позволяет моделировать разрушение почвы [7] и динамику её частиц, а также детально анализировать контактные силы и перемещения, но требует больших вычислительных ресурсов [8]. При исследованиях с помощью DEM проводят калибровку [9; 10] параметров модели, чтобы она соответствовала реальным условиям. С его помощью моделируют свойства почвы и её взаимодействие с орудиями [11], оценивают силовые и качественные характеристики процесса обработки почвы [12; 13], например, для оптимизации ротационного ножа [14; 15], разработки машины для очистки лугов [16], моделирования тяговых характеристик гусениц на мягкой почве [17], для изучения сложных систем «почва-растение-машина» [18], исследования взаимодействия почвы с корнями и органическими компонентами лесной почвы [19; 20].

В статье планируется разработка DEM-модели для комбинированного орудия с плоскорезом и одним дисковым плугом, чтобы оценить их совместное воздействие на лесную почву. Такой подход связан с исследованиями Jin Zhang и др. [14] и Walunj A. I. и др. [18], по оптимизации конструкции машин, где DEM применялся для анализа силовых характеристик и улучшения эффективности орудий.

При создании физико-математических моделей часто применяют принципы теорий машин и механизмов, а также механики контакта твёрдых тел. На основе этих концепций, в частности, в работе Nelson R. M. и др. [12] использовали DEM для детального моделирования динамики частиц. В исследовании Ahmad F. и др. [11] создавали трёхмерные модели в Pro/Engineer и экспортировали их для симуляции в EDEM. В работе Zhao Z. и др. [17] анализировали степень дробления почвы и перемещение растительных остатков.

Проведенный обзор исследований показывает, что DEM эффективен для моделирования взаимодействия почвы с орудиями, позволяет анализировать сложные системы и оптимизировать конструкции. Успех применения DEM зависит от точной калибровки параметров модели, учёта физических свойств почвы и корректного представления геометрии орудий. Предлагается разработать комплексную вычислительную модель, объ-

единяющую плоскорез и дисковый плуг в единой среде DEM.

**Цель работы** – определение оптимальных параметров комбинированного орудия для сплошной обработки почвы в зависимости от его тяговых сопротивлений и физико-механических свойств почвы.

**Материалы и методы.** В модели орудие представлено в виде множества состыкованных друг с другом треугольников (рис. 1). Эти треугольники, образующие дисковый плуг, в модели вращаются под действием набегающей почвы вокруг оси плуга.

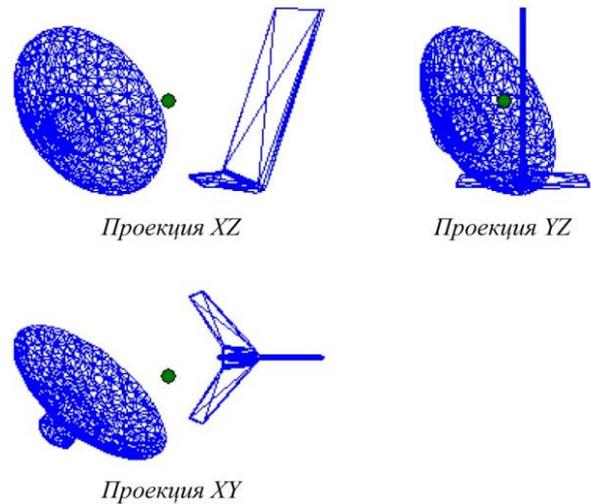


Рис. 1. Проекция комбинированного орудия в модели

На рис. 2 представлен пример обработки почвы для одного из вариантов параметров комбинированного орудия. Желтым цветом отмечены элементы почвы, для которых учитывалось взаимное расположение при расчете коэффициента оборачиваемости пласта почвы.

При решении задачи оптимизации использовали следующие факторы:

$a$  – величина заглубления плоскореза в почву;

$d$  – боковое смещение плоскореза относительно центра борозды;

$\varphi$  – угол атаки дискового плуга.

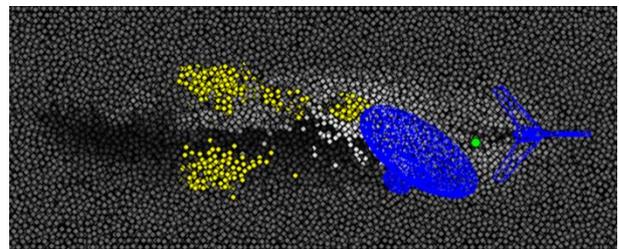


Рис. 2. Пример обработки почвы комбинированным орудием в компьютерном эксперименте

Критериями оптимизации являлись:

$k_{пр}$  – коэффициент полноты рыхления почвы;

$k_{об}$  – коэффициент оборачиваемости пласта;

$F_x$  – сила сопротивления движению орудия.

В процессе оптимизации фактор  $a$  варьировали в диапазоне 10–20 см, фактор  $d$  – в диапазоне –20–10 см, фактор  $\varphi$  – в диапазоне 35–50°.

Задачу оптимизации для данного и для следующего рассматриваемого орудия можно аналитически записать следующим образом:

$$\begin{cases} k_{np}(a, d, \varphi) \rightarrow \max; \\ k_{об}(a, d, \varphi) \rightarrow \max; \Rightarrow a^{opt}, d^{opt}, \varphi^{opt}, \\ F_x(a, d, \varphi) \rightarrow \min; \end{cases} \quad (1)$$

где  $a^{opt}$ ,  $d^{opt}$ ,  $\varphi^{opt}$  – оптимальные значения параметров комбинированного орудия.

$$\begin{aligned} k_{np}(a, d, \varphi) &= -0,057a^2 - 7,773 \cdot 10^{-3}d^2 - 1,713 \cdot 10^{-3}\varphi^2 - 0,017ad + 3,496 \cdot 10^{-3}a\varphi - 6,967 \cdot 10^{-3}d\varphi + 1,543a + 0,672d + 0,833\varphi + 16,331; \\ k_{об}(a, d, \varphi) &= -0,052a^2 - 1,367 \cdot 10^{-3}d^2 + 1,888 \cdot 10^{-3}\varphi^2 - 0,017ad - 0,013a\varphi - 6,024 \cdot 10^{-3}d\varphi + 2,377a + 0,373d + 0,190\varphi + 9,577; \\ F_x(a, d, \varphi) &= 2,121a^2 + 0,276d^2 + 0,671\varphi^2 - 0,189ad + 0,365a\varphi - 0,100d\varphi - 15,528a + 4,096d + 17,547\varphi + 1852, \end{aligned} \quad (2)$$

где единицами измерения  $k_{np}$  и  $k_{об}$  являются проценты;  $F_x$  – Ньютоны;  $a$  и  $d$  – сантиметры;  $\varphi$  – градусы.

С помощью полиномов можно приближенно оценить гиперповерхность отклика. Для визуализации удобно использовать «срезы» гиперповерхности от-

клика. Результаты 20 компьютерных экспериментов приведены в таблице.

На первом этапе решения задачи оптимизации построили картограммы оптимизации – двумерные сечения трехмерных гиперповерхностей отклика. Для построения картограмм оптимизации предварительно аппроксимировали гиперповерхности отклика полиномами второго порядка. Для определения десяти (в трехмерном случае) параметров полинома использовали метод наименьших квадратов, реализуемый функцией regress в программе Mathcad 13. В результате получили следующие аппроксимирующие выражения:

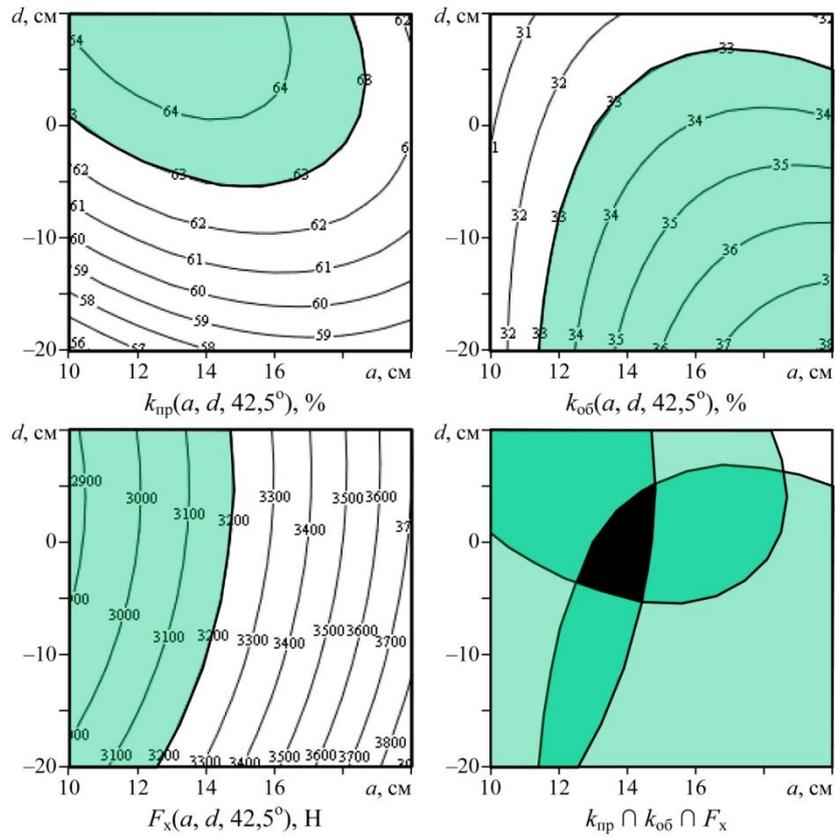
клика. Из трех переменных одну можно зафиксировать (в частности, на середине диапазона), и из функции трех переменных получается функция двух переменных, которую для количественного анализа можно представить графически в виде картограмм (рис. 3–5).

**Таблица.** Результаты компьютерных экспериментов для оптимизации параметров комбинированного орудия «плоскорез + дисковый плуг»

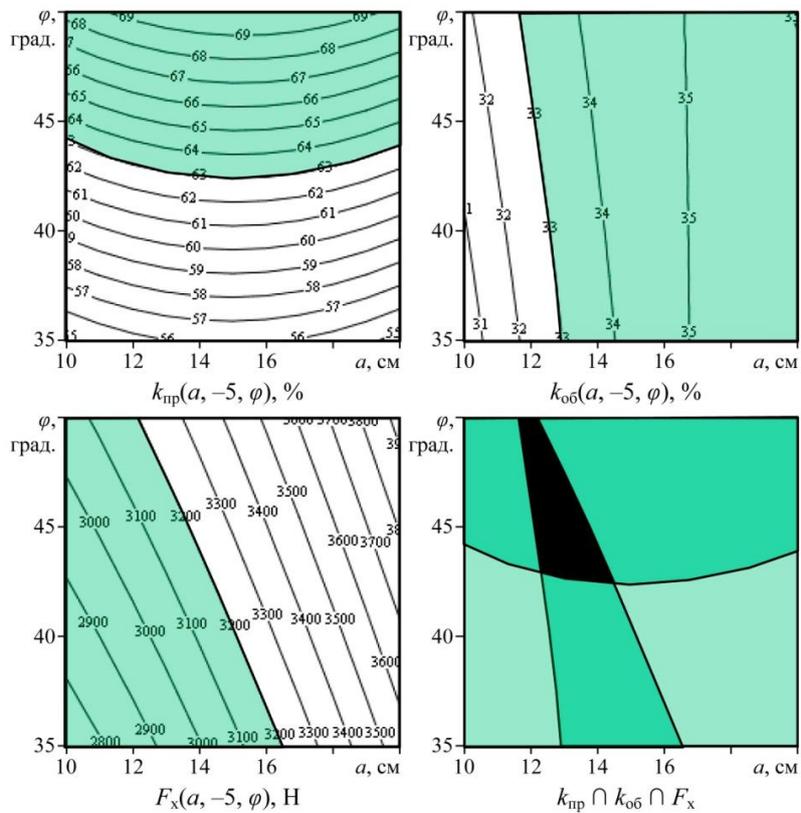
Номер точки	Заглубление плоскореза $a$ , см	Боковое смещение плоскореза $d$ , см	Угол установки дискового плуга $\varphi$ , град.	Коэффициент полноты рыхления $k_{np}$ , %	Коэффициент оборачиваемости пласта $k_{об}$ , %	Сила сопротивления движению орудия $F_x$ , Н
1	19,9	-13,5	39,8	55,06	37,32	4502
2	10,1	9,9	49,9	66,73	34,86	4651
3	10,0	-3,7	35,1	52,29	33,33	3465
4	12,5	-19,9	49,9	60,74	40,85	4928
5	20,0	8,9	49,9	65,20	34,02	5291
6	17,5	9,9	35,0	55,09	33,28	3893
7	14,7	-0,8	43,5	62,07	39,12	4358
8	19,7	-20,0	50,0	62,33	43,06	5476
9	13,3	-19,9	39,5	53,43	37,91	4130
10	10,2	9,9	40,9	60,47	33,91	3941
11	15,7	-6,9	35,0	54,94	35,96	3790
12	20,0	3,2	41,8	58,13	38,17	4571
13	10,0	-9,8	44,3	58,48	32,81	4214
14	17,4	-5,5	50,0	66,52	39,49	5178
15	15,0	9,7	48,9	64,94	36,12	4772
16	12,4	-3,5	50,0	64,68	37,38	4761
17	16,2	-16,2	45,1	59,50	37,48	4711
18	12,8	7,9	35,1	57,15	33,65	3604
19	20,0	-2,3	35,5	55,18	37,95	4150
20	17,4	-19,8	35,0	48,16	38,96	4050

На отдельных картограммах  $k_{np}(a, d)$ ,  $k_{об}(a, d)$ ,  $F_x(a, d)$  можно выбрать благоприятные области (затемнены на рис. 3). Для одновременного учета требования ко всем трем критериям можно найти пересечение трех благоприятных областей, что позволяет найти общую оптимальную область. По расположению оптимальной об-

ласти на картограмме можно сделать вывод, что для данного орудия оптимальная величина заглубления плоскореза 13–14 см, оптимальное боковое смещение плоскореза минус 4–3 см (необходимо учитывать, что третий оптимизируемый параметр – угол атаки дискового плуга – зафиксирован на значении 42,5°).



**Рис. 3.** Картограммы оптимизации в упрощенном факторном пространстве  $(a, d)$  при фиксированном значении переменной  $\varphi = 42,5^\circ$ . Затемнены благоприятные области факторного пространства; черным цветом выделена общая оптимальная область



**Рис. 4.** Картограммы оптимизации в упрощенном факторном пространстве  $(a, \varphi)$  при фиксированном значении переменной  $d = -5$  см

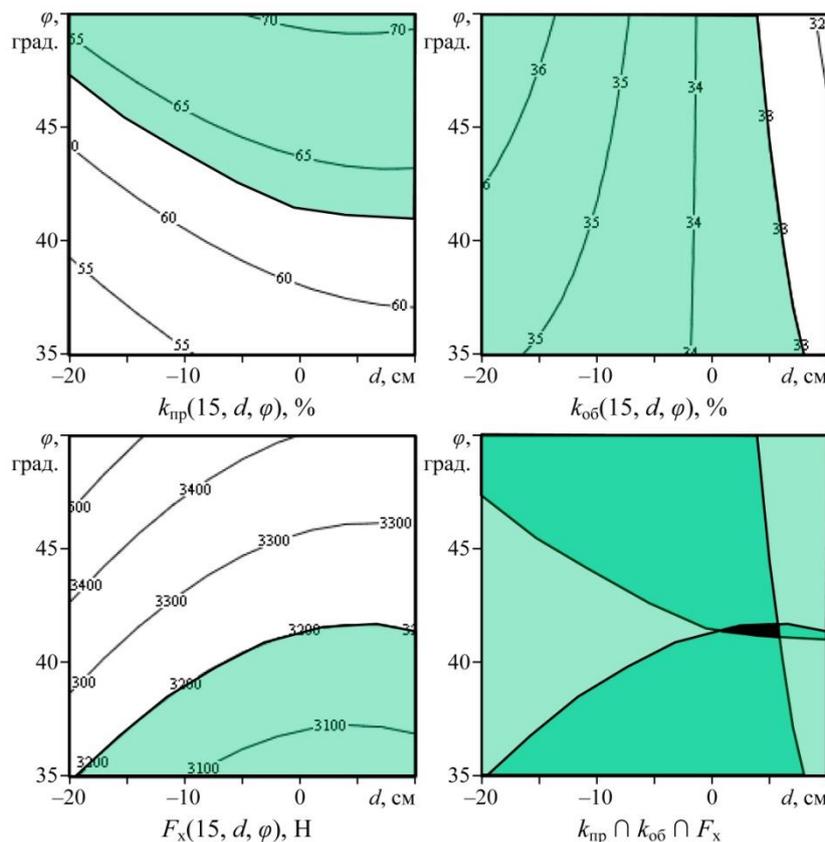


Рис. 5. Картограммы оптимизации в упрощенном факторном пространстве  $(d, \varphi)$  при фиксированном значении переменной  $a = 15$  см

При этом коэффициент полноты рыхления превышает 63 %, коэффициент оборачиваемости пласта превышает 33 %, сила сопротивления движению орудия не превышает 3200 Н. Аналогичные выводы могут быть сделаны по оптимальным областям на рис. 4 и 5.

Однако оптимизация с использованием полиномиальной аппроксимации и «срезом» гиперповерхности

отклика дает довольно грубые результаты. Для более точного определения оптимальных диапазонов далее использовалась оптимизация с использованием радиальных нейронных сетей.

Для реализации нейросетевой оптимизации разработана компьютерная программа на языке Object Pascal в среде программирования Delphi 7 (рис. 6).

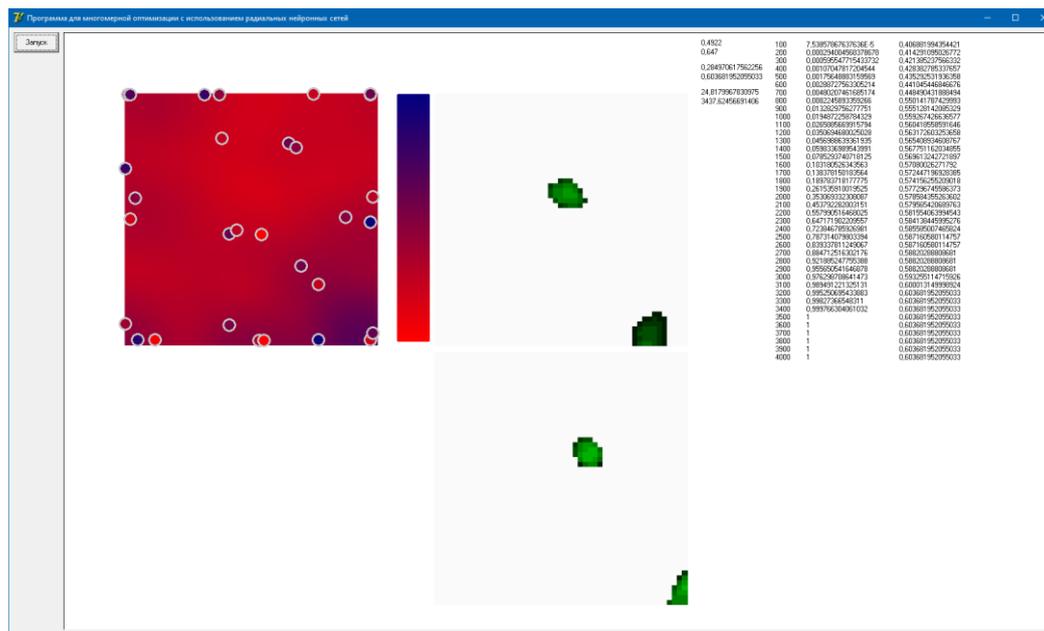


Рис. 6. Интерфейсная форма программы для многомерной оптимизации с использованием радиальных нейронных сетей

Нейросетевой метод позволяет значительно более точно аппроксимировать гиперповерхность отклика по сравнению с полиномиальным, и позволяет просканировать многомерное факторное пространство с малым шагом, определить оптимальные области и найти их проекции на координатные плоскости или оси.

Конфигурация оптимальной области может быть очень сложной и протяженной. Например, если ограничить оптимальную область условиями  $k_{пр} > 57\%$ ,  $k_{об} > 36\%$ ,  $F_x < 4500$  Н, получается протяженная общая оптимальная сложной формы (рис. 7).

Для уменьшения размеров оптимальной области целесообразно сделать более жесткими условия выделения оптимальной области. В частности, удалось уменьшить и упростить конфигурацию оптимальной области до тела, близкого к эллипсоиду (рис. 8).

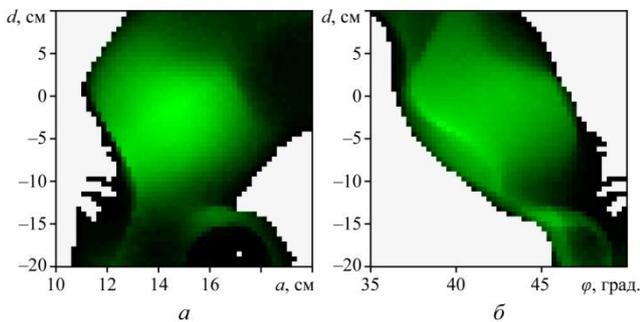


Рис. 7. Проекция оптимальных областей факторного пространства ( $a$ ,  $d$ ,  $\varphi$ )

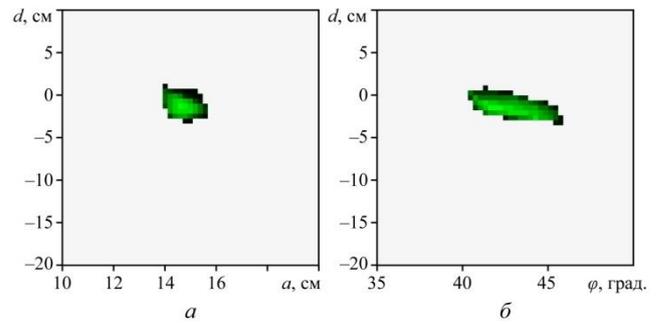


Рис. 8. Проекция оптимальных областей факторного пространства ( $a$ ,  $d$ ,  $\varphi$ )

**Выводы.** Были получены оптимальные значения технологических параметров орудия в зависимости от его тяговых сопротивлений и физико-механических свойств почвы.

По проекциям оптимальной области на координатные плоскости можно сделать следующий вывод. Для комбинированного орудия «плоскорез + дисковый плуг» оптимальная величина заглабления плоскореза 14–16 см, оптимальное боковое смещение плоскореза минус 3–0 см, оптимальный угол атаки дискового плуга 42–45°. При этом комбинированное орудие обеспечивает коэффициент полноты рыхления более 62 %, коэффициент оборачиваемости пласта более 39 %, силу сопротивления движению орудия менее 4400 Н.

Полученные данные помогут разработать новые виды конструкций лесных комбинированных агрегатов с улучшенными характеристиками, которые позволят улучшить качество и эффективность почвообработки, а также сократить расход топлива при выполнении работ.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>*

#### Литература

1. Development of combined tillage tool for melon cultivation / N. Aldoshin, F. Mamatov, I. Ismailov, G. Ergashov // 19th international scientific conference engineering for rural development Proceedings. – 2020. – Vol. 19. – P. 767–772. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF175
2. Zhirnov A. Construction of active working machines for the care of seed-lings // Proceedings of the XXXVIII International Multidisciplinary Conference "Recent Scientific Investigation". Primedia E-launch LLC. Shawnee, USA. 2022. P. 37–47. DOI: 10.32743/UsaConf.2022.11.38.346741
3. Анализ дисковых рабочих органов лесных почвообрабатывающих орудий / С.В. Малюков, М.Н. Лысыч, Л.Д. Бухтояров [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. № 2 (50). – С. 128–141. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7.
4. Метод динамики частиц: моделирование комбинированного почвообрабатывающего орудия, применяемого при лесовосстановлении и защите леса / С.В. Малюков, М.Н. Лысыч, Л.Д. Бухтояров [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2023. – № 245. – С. 215–234. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.215-234.
5. Improving the efficiency of the soil uncompaction by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control / A.B. Kalinin, M.A. Novikov, V.A. Ruzhev, I.Z. Teplinsky // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science – 2021. – № 723. – 032061. DOI: 10.1088/1755-1315/723/3/032061
6. Investigation of various options for processing gray forest soil in a field crop rotation / V. Balabanov, A. Lee, B. Norov [et al.]. // E3S Web of Conferences. "International Scientific Conference "Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering, Conmechydro 2021". – 2021. – 04025. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404025>
7. Review of Discrete Element Method Simulations of Soil Tillage and Furrow Opening / K.A. Aikins, M. Ucgul, J.B. Barr [et al.] // Agriculture. – 2023. – № 13. – P. 541. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13030541>
8. Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review / H. Zhao, Y. Huang, Z. Liu [et al.] // Agriculture. – 2021. – № 11. – P. 425. – DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11050425>
9. Soil Particle Modeling and Parameter Calibration Based on Discrete Element Method / D. Yan, J. Yu, Y. Wang, L. Zhou [et al.] // Agriculture. – 2022. – № 12. – 1421. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12091421>
10. Calibration and Verification of Discrete Element Parameters of Surface Soil in Camellia Oleifera Forest / X. Ma, Y. You, D. Yang [et al.] // Agronomy. – 2024. – № 14. – 1011. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14051011>

11. Discrete element method simulation of disc type furrow openers in paddy soil / F. Ahmad, B. Ding, Q. S. Ding [et al.] // *Int J Agric & Biol Eng.* – 2020. – № 13(4). – P. 103–110.
12. Nelson R. M., Changying Ji, Ian T. Prediction of cutting forces and soil behavior with discrete element simulation, *Computers and Electronics in Agriculture.* – 2020. – № 179. – 105848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105848>
13. Parameter calibration of the discrete element simulation model for soaking paddy loam soil based on the slump test / Z. Tienan, H. Zhou, J. Ji [et al.] // *PLoS ONE.* – 2023. – № 18(6). e0285428. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285428>
14. Simulation Analysis and Experiments for Blade-Soil-Straw Interaction under Deep Ploughing Based on the Discrete Element Method / J. Zhang, M. Xia, W. Chen // *Agriculture.* 2023. – № 13. – 136. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13010136>
15. Analysis of *Cyperus esculentus*–Soil Dynamic Behavior during Rotary Tillage Based on Discrete Element Method / Z. Zhao, D. Wang, S. Shang // *Agriculture.* 2023. № 13. 358. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020358>
16. Design and Discrete Element (DEM) Simulation Analysis of Grassland Ecological Cleaning and Restoration Vehicle / L. Yin, A. Guo, C. Liu [et al.] // *Machines.* 2025. №13. 114. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13020114>
17. Simulation of Track-Soft Soil Interactions Using a Discrete Element Method / J. Wu, Y. Shen, S. Yang, Z. Feng // *Appl. Sci.* – 2022. – № 12. – 2524. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12052524>
18. Modeling Soil–Plant–Machine Dynamics Using Discrete Element Method: A Review / A. Walunj, Y. Chen, Y. Tian, Z. Zeng // *Agronomy.* 2023. №13. 1260. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051260>
19. Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM) / Z. Zeng, X. Ma, Y. Chen, L. Qi // *Soil and Tillage Research.* – 2020. – № 197. – 104505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104505>
20. A Review of Discrete Element Method Applications in Soil–Plant Interactions: Challenges and Opportunities / Y. Tian, Z. Zeng, Y. Xing // *Agriculture.* – 2024. – № 14. – 1486. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14091486>
- Environmental Science. – 2021. – № 723. – 032061. DOI: [10.1088/1755-1315/723/3/032061](https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032061)
6. Balabanov V., Lee A., Norov B., Khudaev I., Egorov V. Investigation of various options for processing gray forest soil in a field crop rotation // *E3S Web of Conferences.* "International Scientific Conference "Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering, Conmechhydro 2021". 2021. – 04025. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126404025>
7. Aikins K.A., Ucgul M., Barr J.B., Awuah E., Antille D.L., Jensen T.A., Desbiolles J.M.A. Review of Discrete Element Method Simulations of Soil Tillage and Furrow Opening // *Agriculture.* – 2023. – № 13. – P. 541. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13030541>
8. Zhao H., Huang Y., Liu Z., Liu W., Zheng Z. Applications of Discrete Element Method in the Research of Agricultural Machinery: A Review // *Agriculture.* – 2021. – № 11. – P. 425. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11050425>
9. Soil Particle Modeling and Parameter Calibration Based on Discrete Element Method / D. Yan, J. Yu, Y. Wang // *Agriculture.* – 2022. – № 12. – 1421. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12091421>
10. Calibration and Verification of Discrete Element Parameters of Surface Soil in *Camellia Oleifera* Forest / X. Ma, Y. You, D. Yang // *Agronomy.* – 2024. – № 14. – 1011. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14051011>
11. Ahmad F., Qiu B. J., Ding Q. S., Ding W. M., Khan Z. M., Shoiab M., et al. Discrete element method simulation of disc type furrow openers in paddy soil // *Int J Agric & Biol Eng.* 2020. – № 13(4). – P. 103–110.
12. Nelson R. M., Changying Ji, Ian T. Prediction of cutting forces and soil behavior with discrete element simulation, *Computers and Electronics in Agriculture.* 2020. – № 179. – 105848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105848>
13. Parameter calibration of the discrete element simulation model for soaking paddy loam soil based on the slump test / Z. Tienan, H. Zhou, J. Ji [et al.] // *PLoS ONE.* – 2023. – № 18(6). – e0285428. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285428>
14. Simulation Analysis and Experiments for Blade-Soil-Straw Interaction under Deep Ploughing Based on the Discrete Element Method / J. Zhang, M. Xia, W. Chen // *Agriculture.* – 2023. – № 13. – 136. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13010136>
15. Analysis of *Cyperus esculentus*–Soil Dynamic Behavior during Rotary Tillage Based on Discrete Element Method / Z. Zhao, D. Wang, S. Shang // *Agriculture.* – 2023. – № 13. – 358. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13020358>
16. Design and Discrete Element (DEM) Simulation Analysis of Grassland Ecological Cleaning and Restoration Vehicle / L. Yin, A. Guo, C. Liu [et al.] // *Machines.* – 2025. – № 13. – 114. – DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13020114>
17. Simulation of Track-Soft Soil Interactions Using a Discrete Element Method / J. Wu, Y. Shen, S. Yang, Z. Feng // *Appl. Sci.* – 2022. – № 12. – 2524. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12052524>
18. Walunj A., Chen Y., Tian Y., Zeng Z. Modeling Soil–Plant–Machine Dynamics Using Discrete Element Method: A Review // *Agronomy.* 2023. no.13. 1260. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051260>
19. Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM) / Z. Zeng, X. Ma, Y. Chen, L. Qi // *Soil and Tillage Research.* – 2020. – № 197. 104505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104505>
20. Tian Y., Zeng Z., Xing Y. A Review of Discrete Element Method Applications in Soil–Plant Interactions: Challenges and Opportunities // *Agriculture.* – 2024. – № 14. – 1486. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14091486>

#### *References*

1. Development of combined tillage tool for melon cultivation / Aldoshin N., Mamatov F., Ismailov I. [et al.] // 19th international scientific conference engineering for rural development *Proceedings.* – 2020. – Vol. 19. – P. 767–772. DOI: [10.22616/ERDev.2020.19.TF175](https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF175)
2. Zhirnov A. Construction of active working machines for the care of seed-lings // *Proceedings of the XXXVIII International Multidisciplinary Conference "Recent Scientific Investigation".* Primedia E-launch LLC. Shawnee, USA. – 2022. – P. 37–47. DOI: [10.32743/UsaConf.2022.11.38.346741](https://doi.org/10.32743/UsaConf.2022.11.38.346741)
3. Analysis of disk working bodies of forest soil-cultivating implements / S.V. Maluykov, M.N. Lysykh, L.D. Buhtoyarov, [et al.] // *Forestry Engineering journal.* – 2023. – Vol. 13. 2 (50). – P. 128–141. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/7>
4. Maluykov S. V., Bukhtoyarov L. D., Lysykh M. N. Particle dynamics method: simulation of a combined tillage tool used in reforestation and forest protection // *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii.* 2023. no. 245. P. 215–234. DOI: [10.21266/2079-4304.2023.245.215-234](https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.245.215-234)
5. Improving the efficiency of the soil uncompaction by the cultivator-subsoiler through the use of digital systems for working depth control / A.B. Kalinin, M.A. Novikov, V.A. Ruzhev, I.Z. Teplinsky // *IOP Conf. Series: Earth and*