



Научная статья

УДК 631.3.072.31

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-4-130-142

Методика расчета и результаты оптимизации конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора при агрегатировании с лесными почвообрабатывающими орудиями

В.И. Посметьев, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

М.А. Савинков, аспирант; *ResearcherID*: [LPQ-1007-2024](https://orcid.org/0009-0004-6331-8136),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6331-8136>

В.В. Посметьев, канд. физ.-мат. наук, доц.; *ResearcherID*: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

А.Ю. Мануковский, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID*: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

В.О. Никонов[✉], канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID*: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; posmetyev@mail.ru, savinkov99max03@mail.ru, victorvpo@mail.ru, mayu1964@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru[✉]

Поступила в редакцию 22.11.24 / Одобрена после рецензирования 21.02.25 / Принята к печати 24.02.25

Аннотация. Рассмотрены недостатки современных лесных почвообрабатывающих орудий. Приведены перспективные направления исследований, проводимых российскими и зарубежными учеными, позволяющие повысить эффективность работы тракторов, агрегируемых навесным технологическим оборудованием. Обоснована актуальность разработки для лесных почвообрабатывающих орудий систем рекуперации энергии рабочей жидкости, обеспечивающих снижение на 20–30 % суммарных энергозатрат при выполнении лесохозяйственных работ на примере тракторов тягового класса 20 кН, широко используемых в настоящее время. Предложена перспективная конструкция рекуперативной навесной системы трактора, позволяющая сократить расход топлива машинно-тракторным агрегатом за счет рекуперации энергии рабочей жидкости, снизить динамические нагрузки, действующие на навесное орудие и трактор, повысить производительность и надежность трактора, улучшить качество обработки почвы на лесных объектах, а также сделать более удобным управление навесным орудием. Цель исследования – получение аналитических выражений изменения изучаемых конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора, обеспечивающих оптимальные значения ее эффективности. Приведена методика расчета показателей эффективности и двухфакторной оптимизации конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора. На основе компьютерных экспериментов получены аналитические выражения для описываемых функций, по этим выражениям построены графики и картограммы влияния основных конструктивных параметров навесной системы на эффективность ее работы. Установлено, что для рекуперативной навесной



системы трактора оптимальная длина рычагов составляет 0,33...0,36 м, а оптимальный диаметр гидроцилиндра – 62...66 мм. При этом средняя рекуперлируемая мощность при обработке неровной поверхности без препятствий равняется не менее 0,9 кВт; среднее отклонение глубины обработки почвы от целевого значения 100 мм не превышает 20 мм; максимальная сила, испытываемая дисковой батареей при контакте с неперерезаемым препятствием, не превышает 11 кН, длина огреха обработки почвы после схода с пня высотой 0,2 м – не более 0,6 м.

Ключевые слова: конструктивные параметры, навесная система, энергоэффективность, оптимизация, рекуперлируемая мощность, трактор, лесные ресурсы, факторное пространство, имитационное моделирование, лесовосстановление

Для цитирования: Посметьев В.И., Савинков М.А., Посметьев В.В., Мануковский А.Ю., Никонов В.О. Методика расчета и результаты оптимизации конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора при агрегатировании с лесными почвообрабатывающими орудиями // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 4. С. 130–142. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-130-142>

Original article

Calculation Methodology and Results of Optimization of Design Parameters of the Tractor Recuperative Mounted System When Aggregated with Forest Tillage Implements

Valeryi I. Posmetyev, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1411-2015](https://orcid.org/0000-0001-9878-7451),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9878-7451>

Maksim A. Savinkov, Postgraduate Student; ResearcherID: [LPQ-1007-2024](https://orcid.org/0009-0004-6331-8136),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6331-8136>

Viktor V. Posmetyev, Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof.;
ResearcherID: [Z-3736-2019](https://orcid.org/0000-0001-6622-5358), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-5358>

Andrey Yu. Manukovskii, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAR-1976-2020](https://orcid.org/0000-0003-4289-6581),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4289-6581>

Vadim O. Nikonov✉, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-3510-2019](https://orcid.org/0000-0002-7380-9180),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7380-9180>

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; posmetyev@mail.ru,
savinkov99max03@mail.ru, victorvpo@mail.ru, mayu1964@mail.ru, 8888nike8888@mail.ru✉

Received on November 22, 2024 / Approved after reviewing on February 21, 2025 / Accepted on February 24, 2025

Abstract. The article considers the disadvantages of modern forest tillage implements. Promising areas of research conducted by Russian and foreign scientists are presented, which make it possible to increase the efficiency of tractors aggregated with mounted technological equipment. The relevance of developing working fluid energy recovery systems for forest tillage implements, ensuring a 20–30 % reduction in total energy consumption during forestry operations, is substantiated using the example of 20 kN traction class tractors, which are widely used at present. A promising design of a tractor recuperative mounted system is proposed, which makes it possible to reduce fuel consumption by a machine-tractor unit due to energy recovery of the working fluid, reduce dynamic loads acting on the mounted implement and the tractor, increase the productivity and reliability of the tractor, improve the quality of tillage

at forest sites, and make it more convenient to operate the mounted implement. The aim of the study has been to obtain analytical expressions for changes in the studied design parameters of the tractor recuperative mounted system, ensuring optimal values of its efficiency. A methodology for calculating the efficiency indicators and two-factor optimization of the design parameters of the tractor recuperative mounted system is presented. Based on computer experiments, analytical expressions have been obtained for the described functions, and graphs and cartograms of the influence of the main design parameters of the mounted system on the efficiency of its operation have been constructed using these expressions. It has been established that for the tractor recuperative mounted system, the optimal length of the levers is 0.33... 0.36 m, and the optimal design of the hydraulic cylinder is 62...66 mm. In this case, the average recuperated power when processing an uneven surface without obstacles is at least 0.9 kW; the average deviation of the tillage depth from the target value of 100 mm does not exceed 20 mm; the maximum force experienced by the disk battery when in contact with an uncuttable obstacle does not exceed 11 kN, and the length of the tillage defect after leaving a stump 0.2 m high does not exceed 0.6 m.

Keywords: design parameters, mounted system, energy efficiency, optimization, recuperated power, tractor, forest resources, factor space, simulation modeling, reforestation

For citation: Posmetyev V.I., Savinkov M.A., Posmetyev V.V., Manukovskii A.Yu., Nikonov V.O. Calculation Methodology and Results of Optimization of Design Parameters of the Tractor Recuperative Mounted System When Aggregated with Forest Tillage Implements. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 4, pp. 130–142. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-4-130-142>

Введение

Значительные ежегодные потери лесных ресурсов в результате пожаров, от воздействия вредителей и болезней, а также от других факторов сопровождаются существенным возрастанием расходов на охрану, защиту и воспроизводство лесов. К основным видам работ, осуществляемых в процессе лесовосстановления, относят подготовительные операции, первичную обработку и последующие многократные уходы за почвой в междурядьях лесных культур. Своевременное и качественное проведение рассматриваемых видов работ в условиях вырубок, гарей, склонов, косогоров, рекультивируемых земель и оврагов невозможно без применения специализированных почвообрабатывающих агрегатов. В процессе лесовосстановления задействовано большое количество разнообразных по назначению, а также по технико-эксплуатационным характеристикам лесных почвообрабатывающих орудий. Несмотря на это, их использование на вырубках все еще не в полной мере соответствует основным требованиям эффективности. Современные лесные почвообрабатывающие орудия обладают низкими показателями энергосбережения. Причиной являются значительные энергетические потери при холостых движениях массивных деталей и узлов данных орудий, такие потери достигают до 30 % [5].

Анализ результатов исследований, выполненных российскими и зарубежными учеными, показывает, что повышение эффективности тракторов, агрегатируемых навесным технологическим оборудованием, можно достичь за счет применения: интеллектуального алгоритма управления и многопараметрического метода регулировки глубины обработки почвы; оптимального соотношения скорости движения трактора и глубины обработки почвы в зависимости от характеристики ее влажности; управления давлением рабочей жидкости в

гидроцилиндре навесной системы трактора в зависимости от глубины обработки почвы; интеллектуальных систем дистанционного мониторинга, фиксирующих в режиме реального времени параметры неровностей обрабатываемой почвы и принимающих на этой основе решения об изменении углов поворота рычагов навесной системы, корректирующих через гидравлическую систему глубину обработки почвы; активного управления демпфированием нагрузок между трактором и гидравлическими задними сцепками; усовершенствованных конструкций 3-точечных сцепок [7–20].

Одним из перспективных направлений, позволяющих снизить на 20–30 % суммарные энергозатраты при выполнении лесохозяйственных работ, является разработка для лесных почвообрабатывающих орудий систем рекуперации энергии рабочей жидкости. Многолетний опыт ученых в области конструирования рекуперативных систем и устройств для транспортно-технологических и лесных машин позволил предложить перспективную конструкцию рекуперативной навесной системы трактора (рис. 1). Такая конструкция дает возможность сократить расход топлива машинно-тракторным агрегатом за счет рекуперации энергии рабочей жидкости, динамические нагрузки, действующие на навесное орудие и трактор, повысить производительность и надежность трактора, качество обработки почвы на лесных объектах, а также удобство управления навесным орудием [4, 6].

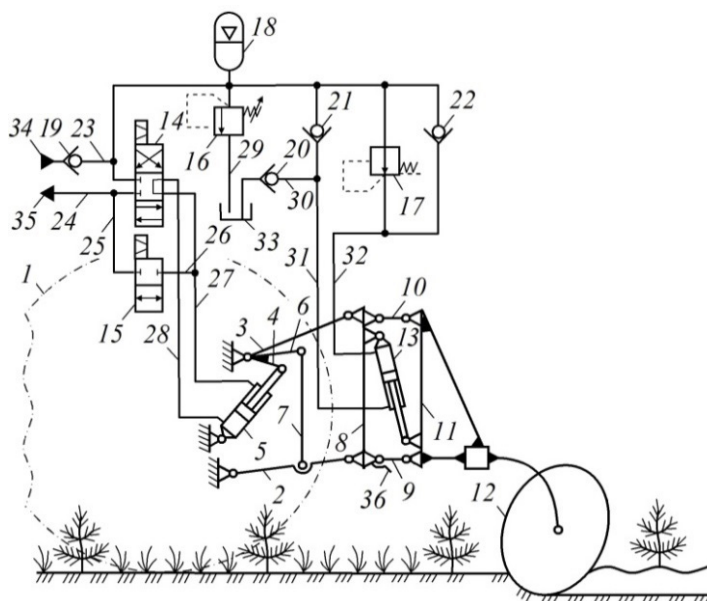


Рис. 1. Рекуперативная навесная система трактора: 1 – трактор; 2, 3 – тяги; 4, 6, 9, 10 – рычаги; 5, 13 – гидроцилиндры; 7 – раскосы; 8 – треугольная ферма; 11 – рама; 12 – дисковые рабочие органы; 14, 15 – гидрораспределители; 16, 17 – регулируемый предохранительный и редуцирующий клапаны; 18 – пневмогидравлический аккумулятор; 19–22 – обратные клапаны; 23–32 – трубопроводы; 33 – гидробак; 34, 35 – напорный и сливной порты

Fig. 1. The recuperative mounted system of the tractor: 1 – tractor; 2, 3 – rods; 4, 6, 9, 10 – levers; 5, 13 – hydraulic cylinders; 7 – diagonals; 8 – triangular truss; 11 – frame; 12 – disk operative parts; 14, 15 – hydraulic distributors; 16, 17 – adjustable safety and pressure-reducing valves; 18 – pneumohydraulic accumulator; 19–22 – check valves; 23–32 – pipelines; 33 – hydraulic tank; 34, 35 – pressure and drain ports

Целью исследования является получение аналитических выражений изменения конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора для обеспечения ее оптимальной эффективности.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является рекуперативная навесная система трактора. Предметом – конструктивные параметры рекуперативной навесной системы трактора, обеспечивающие максимальную рекуперированную навесной системой мощность N_p , а также минимальное среднее отклонение глубины Δa обработки от целевого значения a , силы F_m взаимодействия дисковой батареи с неперерезаемым препятствием в виде пня и огреха L_o обработки почвы после схода орудия с неперерезаемого препятствия в виде пня. Для изучения влияния длины L_p нижних и верхних рычагов навесного устройства и диаметра D_r гидроцилиндра навесного устройства орудия на изменение показателей эффективности рекуперативной навесной системы трактора разработаны математическая модель и реализующая ее компьютерная программа [1–3].

Для обоснования конструктивных параметров рекуперативной навесной системы трактора решена 2-факторная задача оптимизации. В качестве факторов оптимизации выбраны 2 основных конструктивных параметра рекуперативной навесной системы: длина нижних и верхних рычагов навесного устройства; диаметр гидроцилиндра навесного устройства орудия. Критериями оптимизации выступают 4 показателя эффективности рекуперативной навесной системы: средняя рекуперированная мощность; среднее отклонение глубины обработки почвы от целевого значения a ; максимальная сила взаимодействия дискового орудия с неперерезаемым препятствием в виде пня; огрех обработки почвы после схода орудия с неперерезаемого препятствия в виде пня.

Для определения показателей эффективности N_p и Δa проводили компьютерные эксперименты по обработке почвы со случайным неровным рельефом поверхности и отсутствием неперерезаемых препятствий (рис. 2).

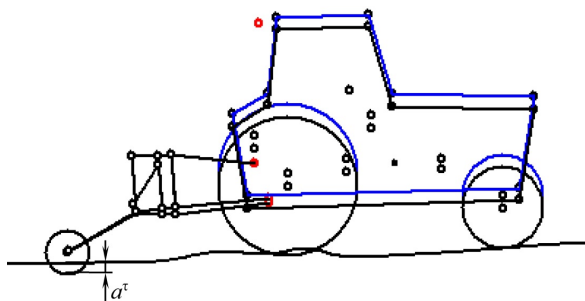
Средняя рекуперированная мощность устанавливалась по формуле:

$$N_p = \frac{\Delta t}{\tau_2 - \tau_1} \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} P_{\text{пга}0} Q_{\text{пга}}^{\tau},$$

где Δt – шаг интегрирования по времени дифференциальных уравнений; τ_1 и τ_2 – номера шагов интегрирования, соответствующие началу и концу интервала наблюдения; $P_{\text{пга}0}$ – давление начала зарядки незаряженного пневмогидравлического аккумулятора; $Q_{\text{пга}}^{\tau}$ – поступление (расход) рабочей жидкости в полость пневмогидравлического аккумулятора на шаге интегрирования τ .

Рис. 2. Текущее заглубление a^{τ}
1 из 2 дисковых батарей на шаге
интегрирования τ

Fig. 2. The current depth value a^{τ}
of 1 of the 2 disk batteries
at the integration step τ



Среднее отклонение глубины обработки почвы от целевого значения $a = 10$ см определялось по формуле:

$$\Delta a = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_2} |a^\tau - a|.$$

Для установления показателей эффективности F_m и L_o проводили компьютерные эксперименты с моделированием движения агрегата по ровной поверхности почвы и одним неперерезаемым препятствием в виде пня.

Максимальная сила взаимодействия дисковой батареи с модельным пнем определялась следующим образом:

$$F_m = \max_{\tau=\tau_1 \dots \tau_2} \sum_{i=1}^{N_\tau} F_{i\tau}^C, \quad (1)$$

где i и N_τ – номер точки и общее количество точек дискретизации опорной поверхности соответственно; $F_{i\tau}^C$ – сила, действующая на ось C дисковой батареи со стороны опорной поверхности с неперерезаемым препятствием в виде пня со стороны i -й точки поверхности на шаге интегрирования τ .

Огрех L_o определялся расстоянием вдоль оси OX между правой границей модельного пня $x_{п2}$ и ближайшей точкой x_3 , в которой заглубление орудия достигло целевого значения a (рис. 3):

$$L_o = x_C (y_C = y_{\text{почв}} - a + R) - x_{п2}, \quad (2)$$

где x_C и y_C – продольная и вертикальная координаты оси дисковой батареи соответственно; $y_{\text{почв}}$ – вертикальная координата уровня почвы; R – радиус дисковой батареи.

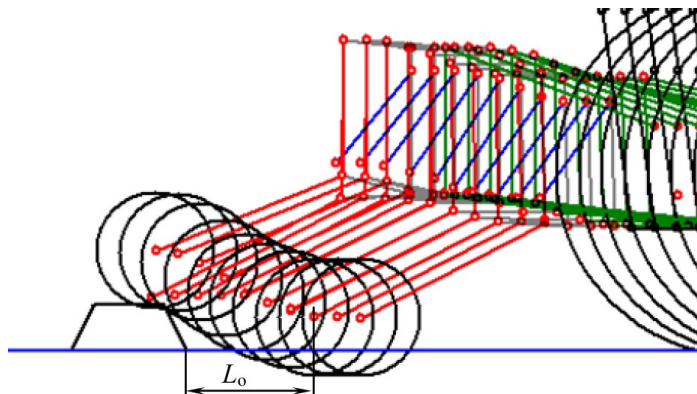


Рис. 3. Определение огреха обработки почвы после схода дисковой батареи с неперерезаемого препятствия

Fig. 3. The determination of the tillage defect after the disk battery has left an uncuttable obstacle

В обоих случаях проводимых компьютерных экспериментов в соответствии с выражениями (1) и (2) гидроцилиндр навесного устройства трактора был заблокирован и копирование рельефа поверхности производилось за счет работы гидроцилиндра навесного устройства орудия.

Задачу оптимизации параметров рекуперативной навесной системы трактора можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} N_p(L_p, D_r) \rightarrow \max; \\ \Delta a(L_p, D_r) \rightarrow \min; \\ F_m(L_p, D_r) \rightarrow \min; \\ L_o(L_p, D_r) \rightarrow \min; \end{cases} \Rightarrow L_p^{\text{опт}}, D_r^{\text{опт}},$$

где $L_p^{\text{опт}}$ и $D_r^{\text{опт}}$ – оптимальные значения параметров L_p и D_r соответственно.

Задача оптимизации считается решенной, если определена область в факторном пространстве (L_p, D_r), в которой одновременно будет максимальным критерий N_p и минимальными критерии $\Delta a, F_m, L_o$.

Для оптимизации параметров рекуперативной навесной системы трактора проведены 2 серии (неровная поверхность без препятствий, ровная поверхность с препятствием) из 9 компьютерных экспериментов, в которых варьировали длину рычагов на уровнях 0,2, 0,3, 0,4 м и диаметр гидроцилиндра навесного устройства орудия на уровнях 60, 70, 80 мм (рис. 4, см. таблицу).

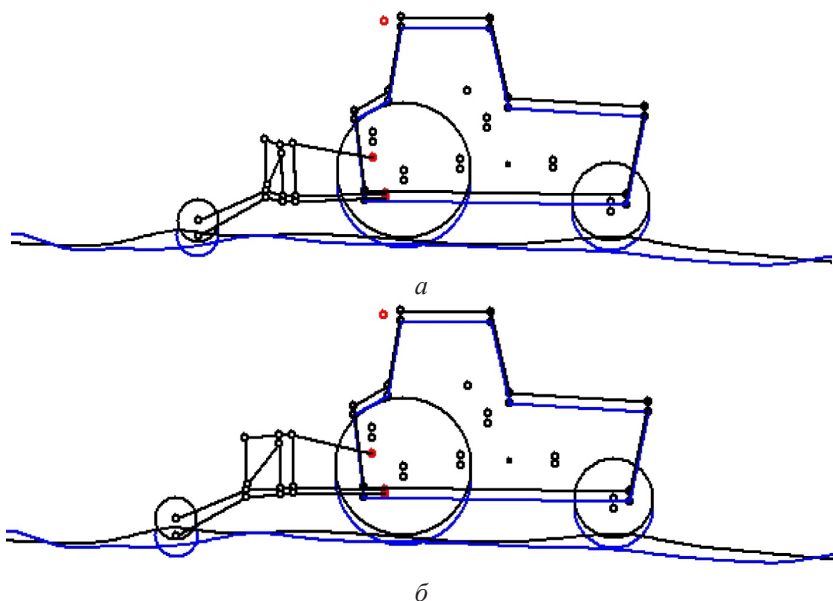


Рис. 4. Варианты рекуперативного навесного устройства с различной длиной нижних и верхних рычагов: a – 0,2 м; b – 0,4 м

Fig. 4. The variants of a recuperative mounted device with different lengths of the lower and upper levers: a – 0.2 m; b – 0.4 m

Результаты оптимизационной серии компьютерных экспериментов The results of the optimization series of computer experiments

Эксперимент	Длина рычагов, м	Диаметр гидроцилиндра, мм	Рекуперированная мощность, кВт	Неравномерность глубины обработки, мм	Максимальная сила, действующая на дисковую батарею, кН	Длина огреха обработки после пня, м
1	0,2	60	0,65	30	12,1	0,48
2	0,2	70	0,82	34	13,8	0,55
3	0,2	80	0,78	37	17,0	0,66
4	0,3	60	0,70	19	10,2	0,51

Окончание таблицы

Эксперимент	Длина рычагов, м	Диаметр гидроцилиндра, мм	Рекуперированная мощность, кВт	Неравномерность глубины обработки, мм	Максимальная сила, действующая на дисковую батарею, кН	Длина огреха обработки после пня, м
5	0,3	70	0,91	21	12,2	0,60
6	0,3	80	0,86	24	13,9	0,72
7	0,4	60	0,95	16	9,10	0,63
8	0,4	70	1,17	18	10,5	0,68
9	0,4	80	1,10	21	11,7	0,78

На основе данных компьютерных экспериментов определены аналитические выражения для функций $N_p(L_p, D_r)$, $\Delta a(L_p, D_r)$, $F_m(L_p, D_r)$, $L_o(L_p, D_r)$. Аналитические выражения получали в виде многочленов 2-го порядка, которые позволяют не только интерполировать результаты эксперимента, но и сгладить случайный разброс, а также более четко выделить экстремальные области функции:

$$K(L_p, D_r) = k_1 L_p^2 + k_2 D_r^2 + k_3 L_p D_r + k_4 L_p + k_5 D_r + k_6,$$

где K – критерий оптимизации ($N_p/\Delta a/F_m/L_o$); $k_1...k_6$ – параметры полинома. Параметры полиномов установлены методом наименьших квадратов, в рамках которого минимизировалась сумма квадратов отклонений аналитической зависимости от результатов компьютерного эксперимента:

$$\sum_{i=1}^{N_{кэ}} \left(K_{\text{аналит}}(L_p^i, D_r^i) - K_{кэ}^i(L_p^i, D_r^i) \right)^2 \rightarrow \min,$$

где i и $N_{кэ}$ – порядковый номер и общее количество компьютерных экспериментов, $N_{кэ} = 9$; $K_{\text{аналит}}$ – искомая аналитическая (полиномиальная) зависимость критерия K от факторов L_p и D_r ; $K_{кэ}^i$ – значения критерия K , определенные в i -м компьютерном эксперименте с параметрами L_p^i и D_r^i . В результате получены следующие аналитические формулы для показателей рекуперативной навесной системы трактора:

$$N_p(L_p, D_r) = 8,833 L_p^2 - 1,267 \cdot 10^{-3} \cdot D_r^2 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot L_p D_r - 4,033 L_p + 0,183 D_r - 5,397;$$

$$\Delta a(L_p, D_r) = 466,7 L_p^2 + 1,667 \cdot 10^{-3} \cdot D_r^2 - 0,5 L_p D_r - 321,7 L_p + 0,2 D_r + 64,06;$$

$$F_m(L_p, D_r) = 26,67 L_p^2 + 1,667 \cdot 10^{-3} \cdot D_r^2 - 0,575 L_p D_r + 4,917 L_p + 0,126 D_r + 3,214;$$

$$L_o(L_p, D_r) = 2 L_p^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot D_r^2 - 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot L_p D_r - 8,333 \cdot 10^{-3} \cdot L_p - 0,017 D_r + 0,769.$$

Результаты исследования и их обсуждение

Для анализа функций $N_p(L_p, D_r)$, $\Delta a(L_p, D_r)$, $F_m(L_p, D_r)$, $L_o(L_p, D_r)$ построены графики и картограммы. Графики (рис. 5) позволяют визуально выявить тенденции влияния параметров рекуперативной навесной системы трактора на показатели его эффективности. Картограммы оптимизации дают возможность графоаналитическим методом определить эффективность рекуперативной навесной системы трактора. На рис. 6, а приведен пример использования картограммы. Допустим, длина рычагов навесного устройства составляет 0,3 м (точка А) и диаметр гидроцилиндра – 70 мм (точка В). Проводим перпендикуляры к координатным осям и находим их точку пересечения С. Точка С лежит между линиями уровня 0,9 и 1 кВт, однако ближе к линии уровня 0,9 кВт. Поэтому рекуперлируемая мощность составляет 0,91 кВт. Аналогично графоаналитическим способом определяются показатели Δa , F_m , L_o .

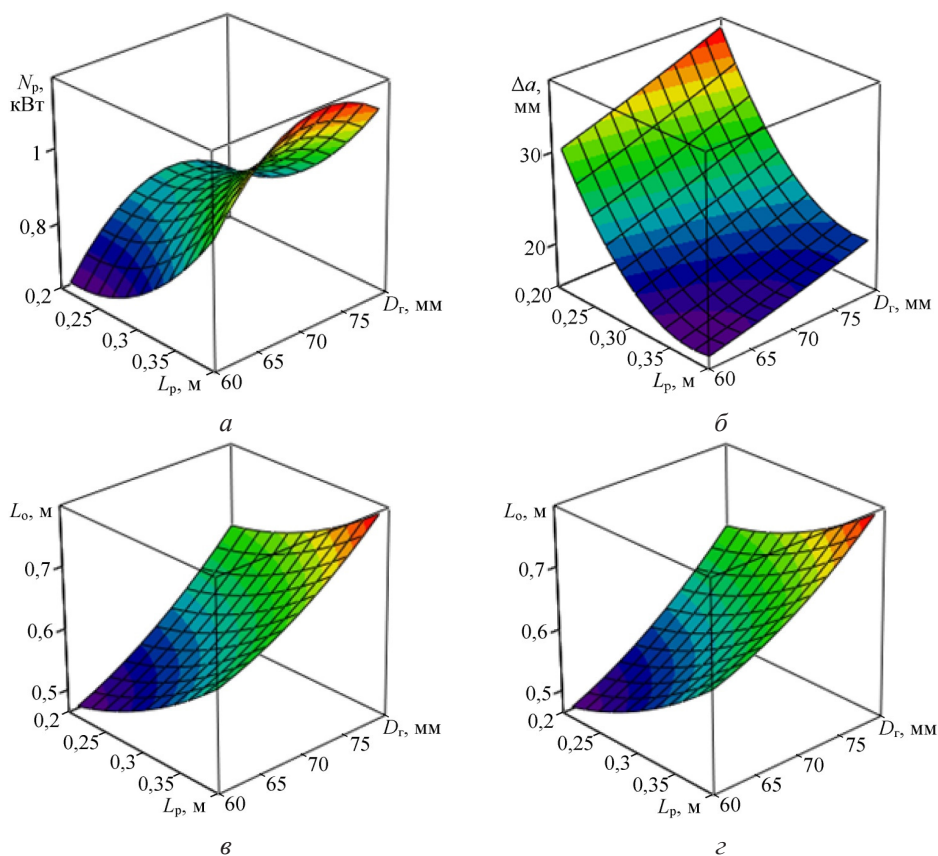


Рис. 5. Графики влияния длины рычагов и диаметра гидроцилиндра навесного устройства орудия: а – на рекуперлируемую мощность; б – на неравномерность обработки; в – на максимальную силу, действующую на дисковую батарею; з – на длину огреха за препятствием

Fig. 5. The graphs of the influence of the lever length and the hydraulic cylinder diameter of the implement's mounted device: а – on the recuperated power; б – on the unevenness of processing; в – on the maximum force acting on the disk battery; з – on the length of the defect behind the obstacle

На каждой из 4 картограмм рис. 6 можно выделить благоприятную область факторного пространства (L_p, D_r) , в которой соответствующий критерий

имеет наилучшие значения. В качестве линий уровня, разграничивающих благоприятные и неблагоприятные области, выбраны следующие: $N_p = 0,9$ кВт, $\Delta a = 20$ мм, $F_m = 11$ кН, $L_o = 0,6$ м. Пересечение 4 благоприятных областей формирует общую оптимальную область (выделена черным цветом на рис. 7). По расположению оптимальной области в факторном пространстве можно сделать вывод, что наилучшая длина рычагов составляет 0,33...0,36 м, а оптимальный диаметр гидроцилиндра – 62...66 мм.

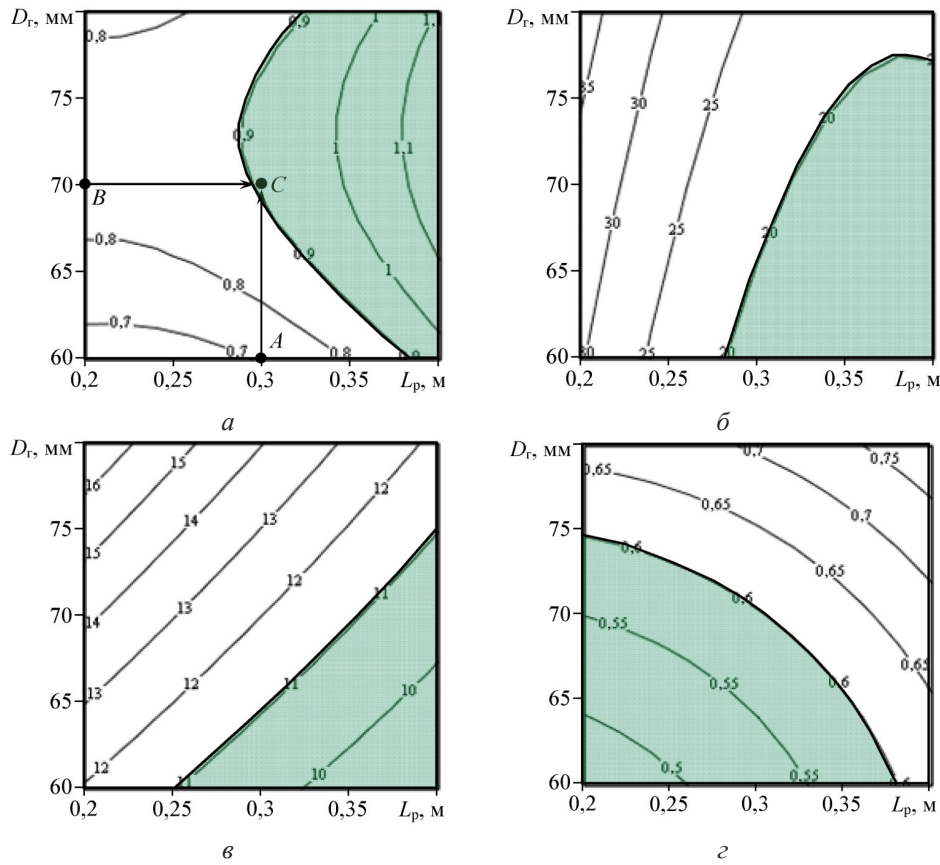


Рис. 6. Картограммы оптимизации параметров рекуперативного навесного устройства трактора: а – $N_p(L_p, D_r)$, кВт; б – $\Delta a(L_p, D_r)$, мм; в – $F_m(L_p, D_r)$, кН; г – $L_o(L_p, D_r)$, мм
Fig. 6. The cartograms of optimization of parameters of the tractor recuperative mounted device: а – $N_p(L_p, D_r)$, kW; б – $\Delta a(L_p, D_r)$, mm; в – $F_m(L_p, D_r)$, kN; г – $L_o(L_p, D_r)$, mm

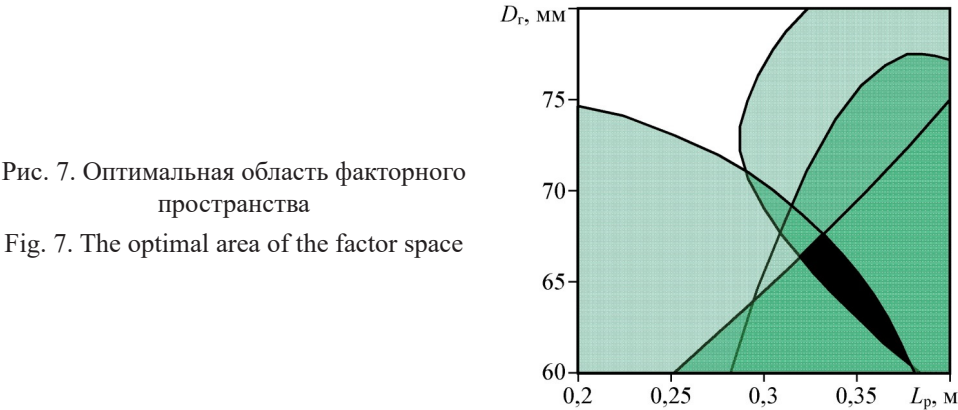


Рис. 7. Оптимальная область факторного пространства
Fig. 7. The optimal area of the factor space

При этом средняя рекуперлируемая мощность при обработке неровной поверхности без препятствий равняется не менее 0,9 кВт; среднее отклонение глубины обработки почвы от целевого значения 100 мм не превышает 20 мм; максимальная сила, испытываемая дисковой батареей при контакте с неперерезаемым препятствием не выходит за пределы значения 11 кН, огрех обработки почвы после схода с пня высотой 0,2 м – не более 0,6 м.

Выводы

1. Одним из перспективных направлений, позволяющих снизить на 20–30 % суммарные энергозатраты при выполнении лесохозяйственных работ, является разработка для их конструкций систем рекуперации энергии рабочей жидкости. Предложена перспективная конструкция рекуперативной навесной системы трактора, использование которой способствует сокращению расхода топлива машинно-тракторным агрегатом за счет рекуперации энергии рабочей жидкости, динамических нагрузок, действующих на навесное орудие и трактор, повышению производительности и надежности трактора, улучшению качества обработки почвы на лесных объектах, а также удобства управления навесным орудием.

2. Приведена методика расчета показателей эффективности и оптимизации параметров рекуперативной навесной системы трактора. На основе компьютерных экспериментов получены аналитические выражения для исследуемых функций, позволившие построить графики и картограммы влияния основных конструктивных параметров навесной системы на показатели эффективности ее работы.

3. Установлено, что оптимальная длина рычагов рекуперативной навесной системы трактора составляет 0,33...0,36 м, а оптимальный диаметр гидроцилиндра – 62...66 мм. При этом средняя рекуперлируемая мощность при обработке неровной поверхности без препятствий равняется не менее 0,9 кВт; среднее отклонение глубины обработки почвы от целевого значения 100 мм не превышает 20 мм; максимальная сила, испытываемая дисковой батареей при контакте с неперерезаемым препятствием, – не более 11 кН, огрех обработки почвы после схода с пня высотой 0,2 м – не больше 0,6 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1976. 279 с.

Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskij Yu.V. *Planning an Experiment When Searching for Optimal Conditions*: 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, Nauka Publ., 1976. 279 p. (In Russ.).

2. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 288 с.

Granovskij V.A., Siraya T.N. *Methods for Processing Experimental Data during Measurements*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. (Leningrad Branch), 1990. 288 p. (In Russ.).

3. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. Томск: Раско, 1991. 270 с.

Mudrov A.E. *Numerical Methods for PC in Basic, Fortran and Pascal Languages*. Tomsk, Rasko Publ., 1991. 270 p. (In Russ.).

4. Патент 2830434 РФ МПК A01B 63/10. Навесная система трактора: № 2023136342: заявл. 30.12.2023: опубл. 19.11.2024 / В.И. Посметьев, М.А. Савинков, В.О. Никонов, В.В. Посметьев, Е.В. Снятков.

Posmetyev V.I., Savinkov M.A., Nikonov V.O., Posmetyev V.V., Snyatkov E.V. *Tractor Mounted System*. Patent RF, no. RU 2830434 C1, 2024. (In Russ.).

5. Посметьев В.И., Зеликов В.А. Состояние и пути повышения эффективности почвообрабатывающих агрегатов при лесовосстановлении на вырубках. Воронеж: ВГЛТУ, 2015. 236 с.

Posmetyev V.I., Zelikov V.A. *Status and Ways to Improve the Efficiency of Tillage Units in Reforestation in Clearings*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2015. 236 p. (In Russ.).

6. Посметьев В.И., Никонов В.О., Савинков М.А., Снятков Е.В. Перспективы разработки рекуперативного навесного механизма трактора с приспособлением для агрегатирования его с лесными дисковыми орудиями // Проблемы эксплуатации и перспективы развития автомобильного транспорта: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 2023. С. 101–111.

Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Savinkov M.A., Snyatkov E.V. Prospects for the Development of a Recuperative Mounted Mechanism for a Tractor with a Device for its Aggregation with Forest Disk Tools. *Problems of Operation and Development Prospects of Automobile Transport: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference*. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov Publ., 2023, pp. 101–111. (In Russ.).

7. Abbaspour-Gilandeh Y., Fazeli M., Roshanianfard A., Hernández-Hernández J.L., Penna A.F., Herrera-Miranda I. Effect of Different Working and Tool Parameters on Performance of Several Types of Cultivators. *Agriculture*, 2020, vol. 10, no. 5, art. no. 145. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050145>

8. Chukewad Y.M., Chadha S., Jagdale K.S., Elkunchwar N., Rosa U.A., Omohundro Z. Tractor Three-Point Hitch Control for an Independent Lower Arms System. *AgriEngineering*, 2024, vol. 6, no. 2, pp. 1725–1746. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6020100>

9. Gao Y., Yang Y., Fu S., Feng K., Han X., Hu Y., Zhu Q., Wei X. Analysis of Vibration Characteristics of Tractor-Rotary Cultivator Combination Based on Time Domain and Frequency Domain. *Agriculture*, 2024, vol. 14, no. 7, art. no. 1139. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071139>

10. Khaechanchanpong Y., Ahamed T., Takigawa T. Design, Fabrication and Performance Evaluation of an Inter-Row Cultivator for Sugarcane Fields. *Inventions*, 2017, vol. 2, no. 3, art. no. 25. <https://doi.org/10.3390/inventions2030025>

11. Kim Y-S., Kim W-S., Baek S-Y., Baek S-M., Kim Y-J., Lee S-D., Kim Y-J. Analysis of Tillage Depth and Gear Selection for Mechanical Load and Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Using an Agricultural Field Measuring System. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 9, art. no. 2450. <https://doi.org/10.3390/s20092450>

12. Koo Y.M., Kang Y. Characteristics of Power and Fuel Use of a Tractor-Mounted Integrated Implement for Round Ridge Preparation. *Journal of Biosystems Engineering*, 2021, vol. 46, pp. 496–507. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00122-w>

13. Liu C., Gu J., Du X., Yang L., Mao E. A Vibration Reduction Control Method for Tractor Rear Hydraulic Hitch Based on Pressure Feedback. *Agriculture*, 2023, vol. 13, no. 8, art. no. 1546. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081546>

14. Luo C., Chen J., Guo S., An X., Yin Y., Wen C., Liu H., Meng Z., Zhao C. Development and Application of a Remote Monitoring System for Agricultural Machinery Operation in Conservation Tillage. *Agriculture*, 2022, vol. 12, no. 9, art. no. 1460. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091460>

15. Luo Z., Wang J., Wu J., Zhang S., Chen Z., Xie B. Research on a Hydraulic Cylinder Pressure Control Method for Efficient Traction Operation in Electro-Hydrau-

lic Hitch System of Electric Tractors. *Agriculture*, 2023, vol. 13, no. 8, art. no. 1555. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081555>

16. Md-Tahir H., Zhang J., Xia J., Zhou Y., Zhou H., Du J., Sultan M., Mamona H. Experimental Investigation of Traction Power Transfer Indices of Farm-Tractors for Efficient Energy Utilization in Soil Tillage and Cultivation Operations. *Agronomy*, 2021, vol. 11, no. 1, art. no. 168. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010168>

17. Sun X., Lu Z., Song Y., Cheng Z., Jiang C., Qian J., Lu Y. Development Status and Research Progress of a Tractor Electro-Hydraulic Hitch System. *Agriculture*, 2022, vol. 12, no. 10, art. no. 1547. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101547>

18. Sun X., Song Y., Wang Y., Qian J., Lu Z., Wang T. Design and Test of a Tractor Electro-Hydraulic-Suspension Tillage-Depth and Loading-Control System Test Bench. *Agriculture*, 2023, vol. 13, no. 10, art. no. 1884. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101884>

19. Xu J., Li R., Li Y., Zhang Y., Sun H., Ding X., Ma Y. Research on Variable-Universal Fuzzy Control Technology of an Electro-Hydraulic Hitch System. *Processes*, 2021, vol. 9, no. 11, art. no. 1920. <https://doi.org/10.3390/pr9111920>

20. Zhou M., Xia J., Zhang S., Hu M., Liu Z., Liu G., Luo C. Development of a Depth Control System Based on Variable-Gain Single-Neuron PID for Rotary Burying of Stubbles. *Agriculture*, 2022, vol. 12, no. 1, art. no. 30. <https://doi.org/10.3390/agriculture12010030>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest