

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

МЕХАНИЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА
MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК [631.512:633.1]:519.8
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2023-61-3-243-252>

Поступила в редакцию 12.04.2023
Received 12.04.2023

А. Н. Леонов¹, Т. А. Непарко¹, Цинчжэнь Ли²

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь
²Ибинский профессиональный технический колледж, Сычуань, Китайская Народная Республика

**ОПЕРАЦІЯ ВСПАШКІ: ПРОІЗВОДІЛЬНОСТЬ ТРУДА І УДЕЛЬНЫЕ
ЭКСПЛУАТАЦІОННЫЕ ЗАТРАТЫ**

ЧАСТЬ 1. МНОГОФАКТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦІИ ВСПАШКІ

Аннотация. Одна из важнейших проблем при производстве зерна в Республике Беларусь – повышение производительности труда, которая в 4–5 раз меньше производительности труда в странах ЕС. Большое влияние на производительность труда и удельные эксплуатационные затраты оказывают энерго- и материоемкие операции, такие как вспашка и уборка. Данная статья посвящена изучению основных закономерностей операции вспашки, которая, являясь сложной технической системой, связана с использованием большого объема агротехнологической, технической, эксплуатационной, ресурсной и экономической информации (продолжительность операции, рабочая длина гона, физико-механические свойства почв, глубина обработки, допустимый интервал скоростей движения агрегата, топливно-энергетические, мощностные и тяговые характеристики двигателя, ширина захвата агрегата, экономические показатели и др.). В настоящее время, в результате внедрения систем компьютерной математики, появились эффективные методы изучения сложных технических систем, позволяющие проводить многофакторное моделирование и многокритериальную оптимизацию производственных процессов и формирование комплекса машин методом системного анализа. Необходимым условием полного и всестороннего описания функционирования сложной технической системы является наличие конфликтующих параметров оптимизации, а также полного комплекса независимых управляющих факторов, существенно влияющих на эти параметры. Отличительная особенность предложенного метода заключается в определении не одного оптимального решения, а множества Парето-оптимальных решений, дающих производителю новые возможности выбора при организации производственных процессов, повышающих эффективность операции вспашки и, следовательно, рентабельность производства зерна в целом. Поэтому повышение производительности труда при допустимых удельных эксплуатационных затратах путем формирования рационального комплекса машин и режимов его эксплуатации в конкретных условиях производства является актуальной научно-технической задачей. Математическая иллюстрация метода приведена для природно-производственных условий Республики Беларусь.

Ключевые слова: производительность труда, удельные эксплуатационные затраты, номинальная мощность двигателя, скорость движения агрегата, продолжительность операции, рабочая длина гона, глубина обработки, сопротивление почвы, многофакторное моделирование, многокритериальная оптимизация, множество Парето-оптимальных решений

Для цитирования: Леонов, А. Н. Операция вспашки: производительность труда и удельные эксплуатационные затраты. Ч. 1. Многофакторное моделирование операции вспашки / А. Н. Леонов, Т. А. Непарко, Цинчжэнь Ли // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2023. – Т. 61, № 3. – С. 243–252. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2023-61-3-243-252>

Andrey N. Leonov¹, Tatyana A. Neparko¹, Qingzhen Li²

¹Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus
²YiBin Vocational and Technical College, Cychyan, People's Republic of China

PLOWING OPERATION: LABOR PRODUCTIVITY AND SPECIFIC OPERATING COSTS

PART 1. MULTIFACTOR SIMULATION OF PLOWING OPERATION

Abstract. One of the most important problems in grain production in the Republic of Belarus is increasing labor productivity, which is 4–5 times less than labor productivity in the EU countries. A great influence on labor productivity and specific operating costs is exerted by energy- and material-intensive operations, such as plowing and harvesting. The main patterns

of the plowing operation, which is a complex technical system, is connected with the use of a large volume of agrotechnological, technical, operational, resource and economic information (operation duration, working length of the harrow, physical and mechanical properties of soil, depth of treatment, permissible interval of the unit speed, fuel and energy, engine power and traction characteristics, width of the unit, economic indicators, etc.) are considered. Currently, as a result of introduction of computer mathematics systems, there are effective methods available for studying complex technical systems, allowing for multi-factor modeling and multi-criteria optimization of the production processes and formation of a set of machines by system analysis. A prerequisite for a complete and comprehensive description of the functioning of a complex technical system is the presence of conflicting optimization parameters, as well as a complete set of independent control factors significantly affecting these parameters. A distinctive feature of the proposed method is to determine not one optimal solution, but a set of Pareto-optimal solutions, giving the producer new opportunities of choice when organizing the production processes, increasing the efficiency of plowing operation and, consequently, the profitability of grain production in general. Therefore, increasing productivity at permissible specific operating costs through the formation of a rational set of machines and modes of its operation under specific conditions of production is an important scientific and engineering task. A mathematical illustration of the method is provided for natural-production conditions of the Republic of Belarus.

Keywords: labor productivity, specific operational costs, nominal engine power, unit movement speed, duration of operation, working length of the harrow, working depth, soil resistance, multifactor modeling, multicriteria optimization, Pareto-optimal solutions set

For citation: Leonov A. N., Neparko T. A., Li Qingzhen. Plowing operation: labor productivity and specific operating costs. Part 1. Multifactor simulation of plowing operation. *Vestsi Natsyyanal'nyi akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2023, vol. 61, no. 3, pp. 243–252 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2023-61-3-243-252>

Введение. В настоящее время главным приоритетным направлением повышения эффективности сельского хозяйства Республики Беларусь является реализация курса, направленного на инновационную модернизацию АПК, при повышении производительности труда и снижении энерго- и материоемкости производства, так как энергоемкость экономики республики по параметру покупательной способности почти на 20 % выше среднемирового уровня при отставании по производительности труда от уровня стран ЕС в 4–5 раз¹.

Известно, что эффективность растениеводства можно повысить за счет использования высокуюрожайных культур и севооборотов, совершенствования производственных процессов, внедрения высокопроизводительной техники нового поколения, формирования рациональных комплексов машин и приемов точного земледелия.

Моделирование операции всепашки. Операция всепашки относится к классу сложных технических систем (СТС), методология изучения которой в данной работе базируется на следующих положениях [1–5]:

- полное и всестороннее математическое описание СТС возможно только при использовании большого объема агротехнологической, технической, эксплуатационной, ресурсной и экономической информации (продолжительность операции, рабочая длина гона, физико-механические свойства почв, глубина обработки, допустимый интервал скоростей движения агрегата, топливно-энергетические, мощностные и тяговые характеристики двигателя, ширина захвата агрегата, экономические показатели и др.) и применение фундаментальных законов механики (топливно-энергетический, мощностной, тяговый и экономический балансы, баланс времени);
- цель производственного процесса – получение конечного продукта;
- наличие конфликтующих параметров оптимизации;
- наличие полного комплекса независимых управляющих факторов, влияющих на параметры оптимизации;
- функциональные и факторные ограничения, учитывающие конъюнктуру рынка и природно-производственные условия сельскохозяйственного предприятия;
- основной математический инструмент научных исследований – многофакторное моделирование, многокритериальная оптимизация, множество Парето-оптимальных решений.

Цель исследования – создание методологических основ изучения основных закономерностей сложных технических систем (операция всепашки), связанных с использованием большого объема агротехнологической, технической, эксплуатационной, ресурсной и экономической информа-

¹ О внесении изменений и дополнений в Директиву Президента Республики Беларусь [Электронный ресурс]: Указ Президента Респ. Беларусь, 26 янв. 2016 г., № 26 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Минск, 2023.

ции, позволяющих обеспечить максимально возможную производительность труда при допустимых удельных эксплуатационных затратах путем формирования рационального комплекса машин.

Решение поставленной задачи включает в себя выполнение четырех этапов.

Первый этап – обоснование и выбор конфликтующих параметров оптимизации [6]. В данной работе в качестве таких параметров приняты производительность труда W , характеризующая уровень социально-экономического развития государства и удельные эксплуатационные затраты γ , влияющие на себестоимость конечного продукта, которые позволяют судить о конкурентоспособности разработанного технического решения на внутреннем и мировом рынках.

Второй этап – обоснование и выбор полного набора независимых управляющих факторов, влияющих на конфликтующие параметры оптимизации. В данной работе в качестве таких факторов выбраны номинальная мощность двигателя трактора N_{e_h} и скорость движения агрегата при вспашке v [5, 7]. Интервалы варьирования управляющих факторов предопределены техническими возможностями сельскохозяйственного предприятия и агротехническими требованиями: $N_{e_h} \in [N_{e_{\min}}, N_{e_{\max}}]$, $v \in [v_{\min}^{\text{arp}}, v_{\max}^{\text{arp}}]$.

Третий этап – детерминированное многофакторное моделирование операции вспашки, заключающееся в составлении математических уравнений, отражающих зависимость параметров оптимизации от управляющих факторов: $W = W(N_{e_h}, v)$, $\gamma = \gamma(N_{e_h}, v)$.

Четвертый этап – многокритериальная оптимизация, в которой целевая функция – удельные эксплуатационные затраты при вспашке $\gamma(N_{e_h}, v) \rightarrow \min$, а на производительность труда накладывается функциональное ограничение $W(N_{e_h}, v) \geq W_t$, где W_t – максимально возможное значение производительности труда при вспашке.

Моделирование операции вспашки выполнено с учетом следующих исходных параметров: S_0 – площадь всех земельных участков сельскохозяйственного предприятия, м^2 (га); Δt_0 – планируемая продолжительность операции, с (ч); L_p – рабочая длина гона, м; $C_{y\text{ч}}$ – ширина одного земельного участка, м; a – глубина обработки, м; $k_{\text{пл}}$ – удельное сопротивление почв при вспашке, Н/м² (кН/м²).

Предварительная модель процесса вспашки построена на базе экономического баланса и баланса времени.

Модель параметра оптимизации – производительность труда при вспашке рассчитывается следующим образом:

$$W = \frac{S_0}{\Delta T_0}, \quad (1)$$

где ΔT_0 – фактический ресурс времени, затраченный на вспашку всех земельных участков сельскохозяйственного предприятия, с (ч),

$$\Delta T_0 = n_a \Delta t_0, \quad (2)$$

где n_a – необходимое количество агрегатов,

$$n_a = \frac{n_{y\text{ч}} \Delta t_1}{\Delta t_0}, \quad (3)$$

где $n_{y\text{ч}}$ – количество всех земельных участков в сельскохозяйственном предприятии,

$$n_{y\text{ч}} = \frac{S_0}{L_p C_{y\text{ч}}}, \quad (4)$$

Δt_1 – продолжительность обработки одного земельного участка, с (ч),

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta t_p + \Delta t_{xx1} + \Delta t_{xx2} + \Delta t_{\text{ост}}}{1 - k_{\text{отд}}}, \quad (5)$$

Δt_p – время работы в загоне, с (ч),

$$\Delta t_p = \frac{L_p C_{y^q}}{v b_p}, \quad (6)$$

Δt_{xx_1} – время движения на поворотах, с (ч),

$$\Delta t_{xx_1} = \left(\frac{l_{xx_1}}{v} \right) \left(\frac{C_{y^q}}{b_p} - 1 \right), \quad (7)$$

Δt_{xx_2} – время переезда с участка на участок, с (ч),

$$\Delta t_{xx_2} = \frac{l_{xx_2}}{v}, \quad (8)$$

Δt_{ost} – время технологического обслуживания агрегата, с (ч),

$$\Delta t_{ost} = \Delta t_{ost, xx_1} \left(\frac{C_{y^q}}{b_p} - 1 \right) + \Delta t_{ost, xx_2}, \quad (9)$$

где k_{otd} – коэффициент, учитывающий время, затраченное на личные надобности; b_p – рабочая ширина захвата агрегата, м; l_{xx_1}, l_{xx_2} – длина траектории одного поворота и одного переезда с участка на участок, м; $\Delta t_{ost, xx_1}, \Delta t_{ost, xx_2}$ – продолжительность остановки на технологическое обслуживание агрегата на повороте, при переезде с участка на участок, с (ч),

$$\Delta t_{ost, xx_1} = \Delta t_{xx_1, 1} \frac{N_{e_h}}{N_0} + \Delta t_{xx_1, 0}, \quad (10)$$

$$\Delta t_{ost, xx_2} = \Delta t_{xx_2, 1} \frac{N_{e_h}}{N_0} + \Delta t_{xx_2, 0}, \quad (11)$$

где $\Delta t_{xx_1, 1}, \Delta t_{xx_1, 0}, \Delta t_{xx_2, 1}, \Delta t_{xx_2, 0}$ – константы, характеризующие производственный процесс конкретного сельскохозяйственного предприятия, с (ч); константа $N_0 = 1000$ Вт (введена для придания выражению N_{e_h}/N_0 безразмерного вида).

Модель параметра оптимизации – удельные эксплуатационные затраты при вспашке вычисляются по формуле

$$\gamma = \frac{D_1 + D_2 + D_3}{S_0}, \quad (12)$$

где D_1, D_2, D_3 – затраты при вспашке всех земельных участков: на топливно-смазочные материалы; заработную плату; амортизацию, техническое обслуживание (ТО), текущий ремонт (ТР) и хранение техники), усл. ед.

Затраты на топливно-смазочные материалы:

$$D_1 = (1 + k_{cmm}) p_{top} n_{y^q} \left(N_{e_p} g_{e_p} \Delta t_p + N_{e_{xx1}} g_{e_{xx1}} \Delta t_{xx1} + N_{e_{xx2}} g_{e_{xx2}} \Delta t_{xx2} + k_{ost} N_{e_h} g_{e_h} \Delta t_{ost} \right), \quad (13)$$

где k_{cmm} – коэффициент, учитывающий стоимость смазочных материалов; p_{top} – удельная стоимость топлива, усл. ед/кг (усл. ед/т); $N_{e_p}, N_{e_{xx1}}, N_{e_{xx2}}$ – эффективная мощность двигателя трактора на рабочем ходу, на поворотах, при переезде с участка на участок, Вт (кВт); $g_{e_p}, g_{e_{xx1}}, g_{e_{xx2}}$ – удельный расход топлива на рабочем ходу, на поворотах, при переезде с участка на участок, кг/Дж (г/кВт·ч); g_{e_h} – удельный расход топлива при номинальной мощности двигателя трактора, кг/Дж (г/кВт·ч); k_{ost} – коэффициент, учитывающий расход топлива на холостом режиме работы двигателя.

Мощность двигателя на рабочем режиме работы агрегата:

$$N_{e_p} = \eta_{N_{e_p}} N_{e_h}, \quad (14)$$

где $\eta_{N_{e_p}}$ – коэффициент загрузки двигателя трактора на рабочем ходу.

Затраты на заработную плату:

$$D_2 = p_{\text{мех}} (1 + k_{\text{нак}}) \Delta T_0, \quad (15)$$

где $p_{\text{мех}}$ – удельная оплата труда механизатора, усл. ед/с (усл. ед/ч),

$$p_{\text{мех}} = p_{\text{мех},1} \frac{N_{e_h}}{N_0} + p_{\text{мех},0}, \quad (16)$$

где $k_{\text{нак}}$ – коэффициент накладных расходов; $p_{\text{мех},1}$, $p_{\text{мех},0}$ – коэффициенты, учитывающие оплату труда в конкретном сельскохозяйственном предприятии, усл. ед/с (усл. ед/ч).

Затраты на амортизацию, техническое обслуживание, текущий ремонт и хранение техники:

$$D_3 = n_a \left[\frac{C_{\text{тр}} \Delta t_0 (a_{a_{\text{тр}}} + a_{TO_{\text{тр}}} + a_{TP_{\text{тр}}} + a_{xp_{\text{тр}}})}{T_{\Gamma_{\text{тр}}}} + \frac{c_{\text{схм}} b_p \Delta t_0 (a_{a_{\text{схм}}} + a_{TO_{\text{схм}}} + a_{TP_{\text{схм}}} + a_{xp_{\text{схм}}})}{T_{\Gamma_{\text{схм}}}} \right], \quad (17)$$

где $C_{\text{тр}}$ – стоимость трактора, усл. ед.; $a_{a_{\text{тр}}}, a_{TO_{\text{тр}}}, a_{TP_{\text{тр}}}, a_{xp_{\text{тр}}}, a_{a_{\text{схм}}}, a_{TO_{\text{схм}}}, a_{TP_{\text{схм}}}, a_{xp_{\text{схм}}}$ – коэффициенты отчислений на амортизацию, техническое обслуживание, текущий ремонт, хранение трактора и сельскохозяйственной машины соответственно; $c_{\text{схм}}$ – удельная стоимость сельскохозяйственной машины, усл. ед/м; $T_{\Gamma_{\text{тр}}}, T_{\Gamma_{\text{схм}}}$ – годовая загрузка трактора и сельскохозяйственной машины соответственно, ч.

Математические модели вспашки (уравнения (1)–(17)), построенные только на базе экономического баланса и баланса времени, имеют концептуальный недостаток: они не могут быть использованы для многокритериальной оптимизации. Построенные модели имеют вид $W = W(\vec{X}, \vec{Z}(\vec{X}), \vec{A}(\vec{X}), \vec{B})$, $\gamma = \gamma(\vec{X}, \vec{Z}(\vec{X}), \vec{A}(\vec{X}), \vec{B})$, где $\vec{X} = (N_{e_h}, v)$ – вектор управляющих факторов; $\vec{Z}(\vec{X})$ – вектор вспомогательных параметров ($b_p, N_{e_{xx1}}, N_{e_{xx2}}, l_{xx1}, g_{e_p}, g_{e_{xx1}}, g_{e_{xx2}}$), зависящих от управляющих факторов в неявном виде (для получения в явном виде следует использовать тяговый баланс, баланс мощности и топливно-энергетический баланс); $\vec{A}(\vec{X})$ – вектор технических параметров энергосредств, зависящих от управляющих факторов в неявном виде ($R_{\text{тр}}, L_{\text{тр}}, g_{e_h}, M_{\text{тр}}, C_{\text{тр}}$) (для получения зависимостей в явном виде необходимо построить аппроксимирующие зависимости на базе данных линейки тракторов); \vec{B} – вектор констант, не зависящих от управляющих факторов, значения которых предопределены природно-производственными условиями сельскохозяйственного предприятия. Поэтому математические модели операции вспашки, пригодные для многокритериальной оптимизации, должны иметь следующий вид: $W = W(\vec{X}, \vec{B})$, $W = W(\vec{X}, \vec{B})$, $\gamma = \gamma(\vec{X}, \vec{B})$.

Расчет вспомогательного параметра b_p в явном виде с использованием тягового баланса (вектор $\vec{Z}(\vec{X})$). Тяговый баланс при установленвшемся режиме описывается уравнением [8, 9]

$$P_{\text{дв}} = P_f + P_\alpha + R_m, \quad (18)$$

где $P_{\text{дв}}$ – движущая сила трактора, Н (кН); P_f – сопротивление качению движителей трактора, Н (кН),

$$P_f = M_{\text{тр}} g f_t, \quad (19)$$

P_α – сопротивление движению трактора на местности с уклоном α , Н (кН),

$$P_\alpha = (M_{\text{тр}} + m_{\text{схм}} b_p) g \sin \alpha, \quad (20)$$

R_M – тяговое сопротивление рабочей машины, Н (кН),

$$R_M = ak_{\text{пл}} [1 + \Delta_c(v - v_1)] b_p, \quad (21)$$

где $M_{\text{тр}}$ – эксплуатационная масса трактора, кг (т); g – ускорение свободного падения, м/с²; f_t – коэффициент сопротивления качению движителей трактора; $m_{\text{схм}}$ – удельная масса рабочей машины, кг/м (т/м); α – уклон местности, рад (град); a – глубина обработки, м; $k_{\text{пл}}$ – удельное сопротивление почвы при вспашке со скоростью движения агрегата v_1 , Н/м² (кН/м²); Δ_c – темп нарастания удельного тягового сопротивления, с/м (ч/км).

Из уравнений (18)–(21) следует

$$b_p = \frac{P_{\text{дв}} - M_{\text{тр}} g (f_t + \sin \alpha)}{ak_{\text{пл}} [1 + \Delta_c(v - v_1)] + m_{\text{схм}} g \sin \alpha}. \quad (22)$$

Значение $P_{\text{дв}}$ определяют из условия [4]

$$P_{\text{дв}} = \begin{cases} P_k, & \text{если } P_k \leq F_{c_h}, \\ F_{c_h}, & \text{если } P_k > F_{c_h}, \end{cases} \quad (23)$$

где P_k – касательная сила тяги, Н (кН),

$$P_k = \frac{N_{e_h} \eta_{N_{e_p}} \eta_{M_r} (1 - \delta)}{v}, \quad (24)$$

F_{c_h} – максимальная сила сцепления движителей трактора с почвой, Н (кН),

$$F_{c_h} = \mu M_{\text{тр}} g \cos \alpha, \quad (25)$$

где η_{M_r} – КПД трансмиссии; δ – буксование движителей трактора; μ – коэффициент сцепления движителей трактора с почвой.

Из уравнений (22)–(25) следует

$$b_p = \begin{cases} \frac{\left(\frac{N_{e_h} \eta_{N_{e_p}} \eta_{M_r} (1 - \delta)}{v} \right) - M_{\text{тр}} g (f_t + \sin \alpha)}{ak_{\text{пл}} [1 + \Delta_c(v - v_1)] + m_{\text{схм}} g \sin \alpha}, & \text{если } P_k \leq F_{c_h}, \\ \frac{M_{\text{тр}} g [\mu - (f_t + \sin \alpha)]}{ak_{\text{пл}} [1 + \Delta_c(v - v_1)] + m_{\text{схм}} g \sin \alpha}, & \text{если } P_k > F_{c_h}. \end{cases} \quad (26)$$

Параметр δ , входящий в уравнение (26), зависит от управляющих факторов N_{e_h} и v , поэтому его необходимо выразить как функцию управляющих факторов в явном виде, используя систему уравнений [5]

$$\begin{cases} \delta = \delta_{\max} \left[1 - \left(1 - \frac{P_k}{P_{k_{\max}}} \right)^m \right], \\ P_k = \frac{N_{e_h} \eta_{N_{e_p}} \eta_{M_r} (1 - \delta)}{v}, \\ P_{k_{\max}} = M_{\text{тр}} g (f_t + \varphi_{k_{\max}}), \end{cases} \quad (27)$$

где δ_{\max} – максимально допустимое буксование движителей трактора; $P_{k_{\max}}$ – максимальное значение касательной силы тяги на ведущих колесах трактора, при которой начинается полное

буксование, Н (кН); m – показатель степени, характеризующий интенсивность буксования; $\Phi_{K_{\max}}$ – отношение максимальной силы тяги к эксплуатационному весу трактора.

Система уравнений (27) сводится к уравнению

$$M_{\text{tp}} g (\Phi_{K_{\max}} + f_t) \left[1 - (1 - \delta/\delta_{\max})^{1/m} \right] v - \eta_{\text{МГ}} \eta_{N_e} N_{e_H} (1 - \delta) = 0. \quad (28)$$

Получение зависимости $\delta = \delta(N_{e_H}, v)$ в явном виде возможно численным методом после подстановки значений констант $\Phi_{K_{\max}}$, f_t , δ_{\max} , m , $\eta_{\text{МГ}}$, η_{N_e} (например, «Подбор параметров» в MS Excel), а также аппроксимирующего уравнения $M_{\text{tp}} = M_{\text{tp}}(N_{e_H})$.

Расчет параметров $N_{e_{xx1}}$, $N_{e_{xx2}}$ в явном виде (вектор $\bar{Z}(\bar{X})$) с использованием баланса мощности. Баланс мощности при установленном режиме, представляющий закон сохранения энергии и предопределяющий распределение механической энергии, полученной от двигателя в результате сжигания топлива, на преодоление различных сопротивлений при эксплуатации агрегата определяется уравнением [10–13]

$$N_e = N_m + N_\delta + N_f + N_\alpha + N_t, \quad (29)$$

где N_e – эффективная мощность двигателя, Вт (кВт); N_m – потери мощности в трансмиссии трактора, Вт (кВт),

$$N_m = N_e (1 - \eta_{\text{МГ}}), \quad (30)$$

N_δ – затраты мощности на буксование, Вт (кВт),

$$N_\delta = N_e \delta \eta_{\text{МГ}}, \quad (31)$$

N_f – затраты мощности на качение трактора, Вт (кВт),

$$N_f = \begin{cases} f_t M_{\text{tp}} g v, & \text{на рабочем ходу,} \\ f_t g v (M_{\text{tp}} + m_{\text{схм}} b_p), & \text{на холостом ходу (на повороте),} \end{cases} \quad (32)$$

N_α – затраты мощности на преодоление уклона, Вт (кВт),

$$N_\alpha = (M_{\text{tp}} + m_{\text{схм}} b_p) v g \sin \alpha. \quad (33)$$

N_t – тяговая мощность трактора, Вт (кВт),

$$N_t = \begin{cases} a k_{\text{пл}} b_p v, & v \leq v_1, \\ a k_{\text{пл}} b_p v [1 + \Delta_c (v - v_1)], & v > v_1. \end{cases} \quad (34)$$

Из уравнений (29)–(34) определяются:

– мощность двигателя $N_{e_{xx1}}$ при движении пахотного агрегата на повороте, при $N_e = N_{e_{xx1}}$ $\delta \approx 0$, $f_t = f_{t_{xx1}}$, $N_t = 0$

$$N_{e_{xx1}} = (1 - \eta_{\text{МГ}}) N_{e_H} + (f_{t_{xx1}} + \sin \alpha) (M_{\text{tp}} + m_{\text{схм}} b_p) g v; \quad (35)$$

– мощность двигателя $N_{e_{xx2}}$ при движении пахотного агрегата при переезде с участка на участок, при $N_e = N_{e_{xx2}}$ $\delta \approx 0$, $f_t = f_{t_{xx2}}$, $N_t = 0$

$$N_{e_{xx2}} = (1 - \eta_{\text{МГ}}) N_{e_H} + (f_{t_{xx2}} + \sin \alpha) (M_{\text{tp}} + m_{\text{схм}} b_p) g v, \quad (36)$$

где f_t , $f_{t_{xx1}}$, $f_{t_{xx2}}$ – коэффициенты сопротивления качению движителей трактора на рабочем ходу, на повороте, при переезде с участка на участок.

Расчет параметров $g_{e_{xx1}}$, $g_{e_{xx2}}$ в явном виде (вектор $\vec{Z}(\vec{X})$) с использованием топливно-энергетического баланса (параметрические уравнения Лейдермана), показывающего, какая часть тепловой энергии, выделяемая при сжигании дизельного топлива в двигателе, переходит в механическую энергию маховика [6]:

$$\begin{cases} \frac{g_e}{g_{e_H}} = c_0 - c_0 \left(\frac{n_e}{n_H} \right) + \left(\frac{n_e}{n_H} \right)^2, \\ \frac{N_e}{N_{e_H}} = c_1 \left(\frac{n_e}{n_H} \right) + (2 - c_1) \left(\frac{n_e}{n_H} \right)^2 - \left(\frac{n_e}{n_H} \right)^3, \end{cases} \quad (37)$$

где g_e – удельный расход топлива при эффективной мощности двигателя N_e , кг/Дж (г/кВт·ч); c_0 , c_1 – константы, характеризующие режим работы дизельных двигателей; n_e , n_H – частота вращения коленчатого вала при эффективной и номинальной мощности двигателя, с^{-1} (мин⁻¹); интервал варьирования $n_e / n_H \in [0,3; 1,0]$.

Из системы уравнений (37) при $n_e / n_H = 1$, $g_e = g_{e_H}$ следует $N_e = N_{e_H}$, что косвенно подтверждает корректность уравнений Лейдермана.

Минимальное значение $g_{e_{\min}}$ следует из 1-го уравнения системы (37) при $\frac{dg_e}{dn_e} = 0$:

$$n_{g_{\min}} = \frac{c_0 n_H}{2}. \quad (38)$$

Подставляя уравнение (38) в систему уравнений (37), получаем

$$\frac{g_{e_{\min}}}{g_{e_H}} = c_0 - \frac{c_0^2}{4}, \quad (39)$$

$$\frac{N_{e_{g_{\min}}}}{N_{e_H}} = \frac{c_0}{8} \left[4c_1 + 2(2 - c_1)c_0 - c_0^2 \right]. \quad (40)$$

Рассчитав значения c_0 , c_1 , по уравнениям (39), (40) с учетом паспортных данных $g_{e_{\min}} / g_{e_H}$, $N_{e_{g_{\min}}} / N_{e_H}$ для дизельных двигателей с турбонаддувом, методом наименьших квадратов [14] может быть получено уравнение $g_e = g_e(N_e)$ в явном виде, которое позволит рассчитать удельный расход топлива g_{e_p} , $g_{e_{xx1}}$ и $g_{e_{xx2}}$ при заранее рассчитанных параметрах N_{e_p} , $N_{e_{xx1}}$ и $N_{e_{xx2}}$.

Расчет параметра l_{xx1} в явном виде (вектор $\vec{Z}(\vec{X})$) с использованием кинематического уравнения траектории одного поворота. Траектории движения агрегата на повороте, различающиеся своими параметрами, оказывают влияние на энергетический и временной баланс производственной операции. В качестве примера траектория движения (рисунок) описывается уравнением

$$l_{xx1} = \pi R_0 + |b_p - 2R_0| + L_{tp}, \quad (41)$$

где R_0 – радиус поворота, м; L_{tp} – длина трактора, м.

После представления зависимости вектора вспомогательных параметров $\vec{Z} = \vec{Z}(\vec{X})$ от управляющих факторов в явном виде предварительная математическая модель вспашки (уравнения (1)–(17)) приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} W = W(\vec{X}, \vec{A}(\vec{X}), \vec{B}), \\ \gamma = \gamma(\vec{X}, \vec{A}(\vec{X}), \vec{B}). \end{cases} \quad (42)$$

Дальнейший шаг, направленный на придание математической модели вида, пригодного для многокритериальной оптимизации, заключается в подстановке в модель вспашки аппроксимирующих зависимостей технико-экономических параметров энергосредств R_{tp} , L_{tp} , g_{e_H} , M_{tp} , C_{tp}

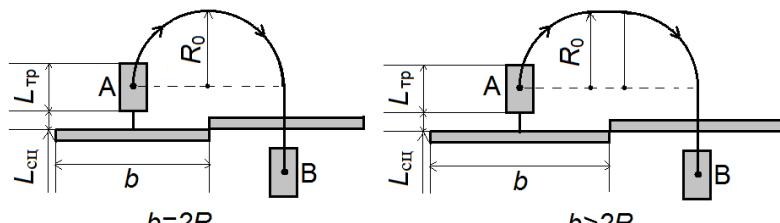


Схема движения агрегата на повороте $l_{xx_1} = l_{AB}$
Movement pattern of the machine when turning $l_{xx_1} = l_{AB}$

(вектор $\vec{A}(\vec{X})$) от номинальной мощности двигателей в явном виде с использованием базы данных конкретной линейки тракторов, а также полного комплекса констант (вектор \vec{B}), не зависящих от управляющих факторов, значения которых предопределяются природно-производственными условиями сельскохозяйственного предприятия. В результате математическая модель операции вспашки, пригодная для многофункциональной оптимизации, примет вид: $W = W(\vec{X}, \vec{B})$, $\gamma = \gamma(\vec{X}, \vec{B})$.

Заключение. 1. Создана методология изучения основных закономерностей сложных технических систем (операция вспашки), связанных с использованием большого объема агротехнологической, технической, эксплуатационной, ресурсной и экономической информации, позволяющая обеспечить максимально возможную производительность труда при допустимых удельных эксплуатационных затратах путем формирования рационального комплекса машин.

2. Отличительная особенность полученной математической модели процесса вспашки заключается в использовании двух конфликтующих между собой параметров оптимизации (производительность труда, удельные эксплуатационные затраты) и двух независимых управляющих факторов (номинальная мощность двигателя трактора, скорость движения агрегата) для любой линейки тракторов и природно-производственных условий любой страны мира.

3. Многофункциональная оптимизация и построение Парето-оптимальных решений на базе созданной модели вспашки будет выполнена для линейки тракторов Минского тракторного завода и природно-производственных условий Республики Беларусь.

Список использованных источников

1. Операционная технология вспашки полей / В. Я. Тимошенко [и др.] // Агропанорама. – 2001. – № 2. – С. 27–31.
2. Оценка годовой загрузки новых отечественных тракторов «БЕЛАРУС» класса тяги 6 / А. В. Новиков [и др.] // Агропанорама. – 2016. – № 3. – С. 20–22.
3. Эксплуатационная оценка широкозахватного агрегата на базе трактора «БЕЛАРУС 4522С» / А. В. Новиков [и др.] // Агропанорама. – 2017. – № 2. – С. 2–7.
4. Новиков, А. В. Обоснование нормативов потребности сельскохозяйственного предприятия в мобильных энергетических средствах / А. В. Новиков, Д. А. Жданко, Т. А. Непарко // Изобретатель. – 2017. – № 2. – С. 41–45.
5. Ли, Цинчжэнъ. Моделирование и оптимизация технологического процесса и средств механизации производства зерна для Среднего Китая на базе белорусской техники / Цинчжэнъ Ли, А. Н. Леонов // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2020. – Т. 58, № 1. – С. 90–107. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-1-90-107>
6. Ли, Цинчжэнъ. Определение номинальной мощности двигателя трактора и скорости МТА для выполнения конкретной операции с минимальным уровнем удельных затрат / Цинчжэнъ Ли, А. Н. Леонов // Агропанорама. – 2019. – № 4. – С. 26–32.
7. Параметры оценки приспособленности энергосредств к агрегированию в составе МТА / А. П. Ляхов [и др.] // Агропанорама. – 2022. – № 3. – С. 6–10.
8. Техническое обеспечение производства продукции растениеводства: учебник / А. Н. Новиков [и др.]; под ред. А. В. Новикова. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2012. – 512 с.
9. Технологии и техническое обеспечение производства продукции растениеводства. Практикум: учеб. пособие / Т. А. Непарко [и др.]; под ред. Т. А. Непарко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2018. – 217 с.
10. Тимошенко, В. Я. Технологическая надежность вспашки торфяно-болотных почв / В. Я. Тимошенко, Т. А. Непарко, Л. Ю. Дутко // Агропанорама. – 2004. – № 2. – С. 10–13.
11. Зангиев, А. А. Эксплуатация машинно-тракторного парка: учебник / А. А. Зангиев, А. В. Шпилько, А. Г. Глевшин. – М.: Колос, 2008. – 319 с.

12. Техническое обеспечение производства продукции растениеводства: практикум / А. В. Новиков [и др.]; ред. А. В. Новиков. – Минск: БГАТУ, 2011. – 407 с.
13. Техническое обеспечение производства продукции растениеводства. Курсовое проектирование / Т. А. Непарко [и др.]; под общ. ред. Т. А. Непарко. – Минск: БГАТУ, 2013. – 307 с.
14. Себер, Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер; пер. с англ. В. П. Носко; под ред. М. Б. Малютова. – М.: Мир, 1980. – 456 с.

References

1. Timoshenko V. Ya., Neparko T. A., Dutko L. Yu., Ketsko V. N. Operational technology of plowing fields. *Agropanorama*, 2001, no. 2, pp. 27–31 (in Russian).
2. Novikov A. V., Zhdanko D. A., Neparko T. A., Zen'ko A. A. Assessment of the annual load of new domestic tractors "BELARUS" of the traction class 6. *Agropanorama*, 2016, no. 3, pp. 20–22 (in Russian).
3. Novikov A. V., Zhdanko D. A., Neparko T. A., Nazarov F. I., Lepeshkin N. D. Operational assessment of a wide-cut arable unit based on the BELARUS 4522C tractor. *Agropanorama*, 2017, no. 2, pp. 2–7 (in Russian).
4. Novikov A. V., Zhdanko D. A., Neparko T. A. Substantiation of the standards for the needs of an agricultural enterprise in mobile power equipment. *Izobretatel'* [Inventor], 2017, no. 2, pp. 41–45 (in Russian).
5. Li Qingzhen, Leonov A. N. Modeling and optimization of technological process and means of mechanization of grain production for middle China based on Belarusian technology. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2020, vol. 58, no. 1, pp. 90–107 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2020-58-1-90-107>
6. Li Qingzhen, Leonov A. N. Determining the rated power of the tractor engine and the speed of the MTA to perform a specific operation with a minimum level of unit costs. *Agropanorama*, 2019, no. 4, pp. 26–32 (in Russian).
7. Lyakhov A. P., Neparko T. A., Bykov N. N., Zhavrid O. V. Parameters for assessing the suitability of energy facilities for aggregation as part of the MTA. *Agropanorama*, 2022, no. 3, pp. 6–10 (in Russian).
8. Novikov A. N. (ed.). *Technical support of crop production*. Minsk, Novoe znanie Publ., Moscow, INFRA-M Publ., 2012. 512 p. (in Russian).
9. Neparko T. A. (ed.). *Technologies and technical support for the production of crop products. Workshop*. Minsk, IVTs Minfina Publ., 2018. 217 p. (in Russian).
10. Timoshenko V. Ya., Neparko T. A., Dutko L. Yu. Technological reliability of plowing peat-bog soils. *Agropanorama*, 2004, no. 2, pp. 10–13 (in Russian).
11. Zangiev A. A., Shpil'ko A. V., Glevshin A. G. *Operation of the machine and tractor fleet*. Moscow, Kolos Publ., 2008. 319 p. (in Russian).
12. Novikov A. V. (ed.). *Technical support for the production of crop production*. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 2011. 407 p. (in Russian).
13. Neparko T. A. (ed.). *Technical support of crop production. Course design*. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 2013. 307 p. (in Russian).
14. Seber G. A. F. *Linear regression analysis*. New York, Wiley, 1977. 465 p.

Информация об авторах

Леонов Андрей Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры моделирования и проектирования, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lannik@rambler.ru

Непарко Татьяна Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой эксплуатации машинно-тракторного парка и агротехнологий, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mta_mtp@tut.by

Ли Цинчжэнь – кандидат технических наук, преподаватель кафедры автомобилей с новым способом управления, Ибинский профессиональный технический колледж (Синьцунь 74, г. Ибин, район Цуйпин, провинция Сычуань, Китайская Народная Республика). E-mail: 190570873@qq.com

Information about the authors

Andrey N. Leonov – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of Modeling and Design Department, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lannik@rambler.ru

Tatyana A. Neparko – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department for Tractor and Machinery Operation and Agrotechnologies, Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mta_mtp@tut.by

Qingzhen Li – Ph. D. (Engineering), Lecturer in the Department of Vehicles with New Means of Control, YiBin Vocational and Technical College (74 Xincun, Yibin City, Tsui Ping District, Sichuan Province, People's Republic of China). E-mail: 190570873@qq.com