

**А. Н. Леонов<sup>1</sup>, Т. А. Непарко<sup>1</sup>, Цинчжэнь Ли<sup>2</sup>, Э. В. Дыба<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»  
г. Минск, Республика Беларусь  
E-mail: lannik@rambler.ru

<sup>2</sup>Ибиньский профессиональный технический колледж  
г. Сычуань, Китайская Народная Республика  
E-mail: 190570873@qq.com

<sup>3</sup>РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»  
г. Минск, Республика Беларусь  
E-mail: dibua-18@mail.ru

## **ОПЕРАЦИЯ ВСПАШКИ: ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТРУДА И УДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ ЧАСТЬ 1. МНОГОФАКТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ВСПАШКИ**

*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 материалоемкие 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 производственного процесса 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 производственного процесса, повышающего 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.

**A. N. Leonov<sup>1</sup>, T. A. Neparko<sup>1</sup>, Qingzhen Li<sup>2</sup>, E. V. Dyba<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>EI “Belarusian State Agrarian Technical University”  
Minsk, Republic of Belarus  
E-mail: lannik@rambler.ru

<sup>2</sup>YiBin Vocational and Technical College  
Cychuan, China  
E-mail: 190570873@qq.com

<sup>3</sup>RUE “SPC NAS of Belarus for Agricultural Mechanization”  
Minsk, Republic of Belarus  
E-mail: dibua-18@mail.ru

## ПЛОУЖЕНИЕ: ТРУДОВАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ И СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ. ЧАСТЬ 1. МУЛЬТИФАКТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОУЖЕНИЯ

*Abstract.* One of the most important problems in grain production in the Republic of Belarus is the increase in labor productivity, which is 4–5 times less than labor production in the EU countries. Energy-intensive operations, such as ploughing and cleaning, have a large impact on labor productivity and unit operating costs. This article is devoted to the study of the main regularities of plowing operations, which, being a complex technical system, is associated with the use of a large amount of agrotechnological, technical, operational, resource and economic information (operation duration, running length, physical and mechanical properties of soils, depth of processing, permissible range of speeds of the unit, fuel-energy, power and traction characteristics of the engine, width of the unit capture, economic indicators, etc.). Currently, as a result of the introduction of computer mathematics systems, effective methods for studying complex technical systems have appeared, allowing for multifactorial modeling and multi-criteria optimization of the production process and the formation of a complex of machines by system analysis. A necessary condition for a complete and comprehensive description of the functioning of a complex technical system is the presence of conflicting optimization parameters, as well as the presence of a complete set of independent control factors that significantly affect these parameters. A distinctive feature of the proposed method consists in determining not one optimal solution, but a set of Pareto-optimal solutions that give the manufacturer new opportunities to choose when organizing a production process that increases the efficiency of the plowing operation, and, therefore, the profitability of grain production as a whole. Therefore, increasing labor productivity at permissible specific ex-pluational costs by forming a rational complex of machines and modes of its operation in specific production conditions is an urgent scientific and technical task. The mathematical illustration of the method is given for the natural production conditions of the Republic of Belarus.

*Keywords:* labor productivity, specific operating costs, rated engine power, speed of the unit movement, duration of operation, working length of the race, depth of cultivation, soil resistance, multifactorial modeling, multi-criteria optimization, set of Pareto-optimal resolutions.

### 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 относительно высокой энерго- и материалоемкости производства, так как энергоемкость экономики республики по паритету покупательной способности почти на 20 % выше среднемирового уровня при отставании по производительности труда от уровня стран ЕС в 4–5 раз [1].

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

### Основная часть

**Моделирование операции вспашки.** Операция вспашки относится к классу сложных технических систем (СТС), методология изучения которой в данной работе базируется на следующих положениях [2–6]:

– 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 применении 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 вспашки), связанных с использованием большого объема агротехнологической, технической, эксплуатационной, ресурсной и экономической информации, 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 [7]. В данной работе в качестве таких параметров приняты производительность труда  $W$ , характеризующая уровень социально-экономического развития государства, и удельные эксплуатационные затраты  $\gamma$ , 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  $Ne_n$  и скорость движения агрегата при вспашке  $v$  [6, 8]. Интервал варьирования управляющих факторов предопределен техническими возможностями сельскохозяйственного предприятия и агротехническими требованиями:  $Ne_n \in [Ne_{min}, Ne_{max}]$ ,  $v \in [v_{min}^{arp}, v_{max}^{arp}]$ .

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

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

Моделирование операции вспашки выполнено с учетом следующих параметров:  $S_0$  – площадь всех земельных участков сельскохозяйственного предприятия, м<sup>2</sup> (га);  $\Delta T_0$  – планируемая продолжительность операции, с (ч);  $L_p$  – рабочая длина гона, м;  $C_{yч}$  – ширина одного земельного участка, м;  $a$  – глубина обработки, м;  $k_{пл}$  – удельное сопротивление почв при вспашке, Н/м<sup>2</sup> (кН/м<sup>2</sup>).

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

#### **Модель параметра оптимизации – производительность труда при вспашке**

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

где  $\Delta T_0$  – 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,

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

где  $n_{yч}$  – количество всех земельных участков в сельскохозяйственном предприятии,

$$n_{yч} = \frac{S_0}{L_p C_{yч}}, \quad (4)$$

$\Delta t_1$  – продолжительность обработки одного земельного участка, с (ч),

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

$\Delta t_p$  – время работы в загоне, с (ч)

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

$\Delta t_{xx1}$  – время движения на поворотах

$$\Delta t_{xx1} = \left( \frac{l_{xx1}}{v} \right) \left( \frac{C_{уч}}{b_p} - 1 \right), \quad (7)$$

$\Delta t_{xx2}$  – время переезда с участка на участок

$$\Delta t_{xx2} = \frac{l_{xx2}}{v}, \quad (8)$$

$\Delta t_{ост}$  – время технологического обслуживания агрегата

$$\Delta t_{ост} = \Delta t_{ост,xx1} \left( \frac{C_{уч}}{b_p} - 1 \right) + \Delta t_{ост,xx2}, \quad (9)$$

где  $k_{отд}$  – коэффициент, учитывающий время, затраченное на личные надобности;  $b_p$  – рабочая ширина захвата агрегата, м;  $l_{xx1}, l_{xx2}$  – длина траектории одного поворота и одного переезда с участка на участок, м;  $\Delta t_{ост,xx1}, \Delta t_{ост,xx2}$  – продолжительность остановки на технологическое обслуживание агрегата на повороте, при переезде с участка на участок, с (ч).

$$\Delta t_{ост,xx1} = \Delta t_{xx1,1} \frac{N_{ен}}{N_0} + \Delta t_{xx1,0}, \quad (10)$$

$$\Delta t_{ост,xx2} = \Delta t_{xx2,1} \frac{N_{ен}}{N_0} + \Delta t_{xx2,0}, \quad (11)$$

где  $\Delta t_{xx1,1}, \Delta t_{xx1,0}, \Delta t_{xx2,1}, \Delta t_{xx2,0}$  – константы, характеризующие производственный процесс конкретного сельскохозяйственного предприятия, с (ч); константа  $N_0 = 1000$  Вт (введена для придания выражению  $N_{ен} / N_0$  безразмерного вида).

**Модель параметра оптимизации – удельные эксплуатационные затраты при вспашке**

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

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

$$D_1 = (1 + k_{ссм}) p_{топ} n_{уч} (N_{ep} g_{ep} \Delta t_p + N_{exx1} g_{exx1} \Delta t_{xx1} + N_{exx2} g_{exx2} \Delta t_{xx2} + k_{ост} N_{ен} g_{ен} \Delta t_{ост}), \quad (13)$$

где  $k_{ссм}$  – коэффициент, учитывающий стоимость смазочных материалов;  $p_{топ}$  – удельная стоимость топлива, усл. ед./кг (усл. ед./т);  $N_{ep}, N_{exx1}, N_{exx2}$  – эффективная мощность двигателя трактора на рабочем ходу, на поворотах, при переезде с участка на участок, Вт (кВт);  $g_{ep}, g_{exx1}, g_{exx2}$  – удельный расход топлива на рабочем ходу, на поворотах, при переезде с участка на участок, кг/Дж (г/кВт·ч);  $g_{ен}$  – удельный расход топлива при номинальной мощности двигателя трактора, кг/Дж (г/кВт·ч);  $k_{ост}$  – коэффициент, учитывающий расход топлива на холостом режиме работы двигателя.

Мощность двигателя на рабочем режиме работы агрегата

$$N_{ер} = \eta_{леp} N_{ен}, \quad (14)$$

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

Затраты на заработную плату

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

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

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

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

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

$$D_3 = n_a \left[ \frac{C_{тр} \Delta t_0 (a_{а тр} + a_{ТО тр} + a_{ТР тр} + a_{ХР тр})}{T_{Г тр}} + \frac{c_{схм} b_p \Delta t_0 (a_{а схм} + a_{ТО схм} + a_{ТР схм} + a_{ХР схм})}{T_{Г схм}} \right], \quad (17)$$

где  $C_{тр}$  – стоимость трактора, усл. ед.;  $a_{а тр}$ ,  $a_{ТО тр}$ ,  $a_{ТР тр}$ ,  $a_{ХР тр}$ ,  $a_{а схм}$ ,  $a_{ТО схм}$ ,  $a_{ТР схм}$ ,  $a_{ХР схм}$  – коэффициенты отчислений на амортизацию, техническое обслуживание, текущий ремонт и хранение трактора и сельскохозяйственной машины соответственно;  $c_{схм}$  – удельная стоимость сельскохозяйственной машины, усл. ед./м;  $T_{Г тр}$ ,  $T_{Г схм}$  – 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  $\vec{X} = (N_{ен}, v)$  – вектор управляющих факторов;  $\vec{Z}(\vec{X})$  – вектор вспомогательных параметров ( $b_p, N_{ех1}, N_{ех2}, l_{хх1}, g_{ер}, g_{ех1}, g_{ех2}$ ), 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 ( $R_{тр}, L_{тр}, g_{ен}, M_{тр}, C_{тр}$ ) (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 предопределяются природно-производственными условиями сельскохозяйственного предприятия. Поэтому математические модели операции вспашки, пригодные для многокритериальной оптимизации, должны иметь следующий вид:  $W = W(\vec{X}, \vec{B})$ ,  $\gamma = \gamma(\vec{X}, \vec{B})$ .

Расчет вспомогательного параметра  $b_p$  в явном виде с использованием тягового баланса (вектор  $\vec{Z}(\vec{X})$ ). Тяговый баланс при установившемся режиме описывается уравнением [9, 10]

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

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

$$P_f = M_{тр} g f_T, \quad (19)$$

$P_\alpha$  – сопротивление движению трактора на местности с уклоном  $\alpha$ , Н (кН),

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

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

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

где  $M_{\text{тр}}$  – эксплуатационная масса трактора, кг (т);  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $f_{\text{T}}$  – коэффициент сопротивления качению движителей трактора;  $m_{\text{схм}}$  – удельная масса рабочей машины, кг/м (т/м);  $\alpha$  – уклон местности, рад (град);  $k_{\text{пл}}$  – удельное сопротивление почвы при вспашке со скоростью движения агрегата  $v_1$ , Н/м<sup>2</sup> (кН/м<sup>2</sup>);  $a$  – глубина обработки, м;  $\Delta_c$  – темп нарастания удельного тягового сопротивления, с/м (ч/км).

Из уравнений (18)–(21) следует

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

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

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

где  $P_{\text{к}}$  – касательная сила тяги, Н (кН),

$$P_{\text{к}} = \frac{N_{\text{еН}} \eta_{\text{неР}} \eta_{\text{мГ}} (1 - \delta)}{v}, \quad (24)$$

$F_{\text{сн}}$  – максимальная сила сцепления движителей трактора с почвой, Н (кН),

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

где  $\eta_{\text{мГ}}$  – КПД трансмиссии;  $\delta$  – буксование движителей трактора;  $\mu$  – коэффициент сцепления движителей трактора с почвой.

Из уравнений (22)–(25) следует

$$b_p = \begin{cases} \frac{\left( \frac{N_{\text{еН}} \eta_{\text{неР}} \eta_{\text{мГ}} (1 - \delta)}{v} \right) - M_{\text{тр}} g (f_{\text{T}} + \sin \alpha)}{ak_{\text{пл}} [1 + \Delta_c (v - v_1)] + m_{\text{схм}} g \sin \alpha}, & \text{если } P_{\text{к}} \leq F_{\text{сн}} \\ \frac{M_{\text{тр}} g [\mu - (f_{\text{T}} + \sin \alpha)]}{ak_{\text{пл}} [1 + \Delta_c (v - v_1)] + m_{\text{схм}} g \sin \alpha}, & \text{если } P_{\text{к}} > F_{\text{сн}} \end{cases}, \quad (26)$$

Параметр  $\delta$ , входящий в уравнение (26), зависит от управляющих факторов  $N_{\text{еН}}$  и  $v$ , поэтому его необходимо выразить как функцию управляющих факторов в явном виде, используя систему уравнений [11, 12]:

$$\begin{cases} \delta = \delta_{\text{max}} \left[ 1 - (1 - P_{\text{к}} / P_{\text{к max}})^m \right] \\ P_{\text{к}} = \frac{N_{\text{еН}} \eta_{\text{неР}} \eta_{\text{мГ}} (1 - \delta)}{v} \\ P_{\text{к max}} = M_{\text{тр}} g (f_{\text{T}} + \varphi_{\text{к, max}}) \end{cases}, \quad (27)$$

где  $\delta_{\text{max}}$  – максимально допустимое буксование движителей трактора;  $P_{\text{к max}}$  – максимальное значение касательной силы тяги на ведущих колесах трактора, при которой начинается полное буксование, Н (кН);  $m$  – показатель степени, характеризующий интенсивность буксования;  $\varphi_{\text{к, max}}$  – отношение максимальной силы тяги к эксплуатационному весу трактора.

Система уравнений (27) сводится к уравнению

$$M_{\text{тр}} g (\varphi_{\text{к, max}} + f_{\text{T}}) \left[ 1 - (1 - \delta / \delta_{\text{max}})^{1/m} \right] v - \eta_{\text{мГ}} \eta_{\text{неР}} N_{\text{еН}} (1 - \delta) = 0. \quad (28)$$

Получение зависимости  $\delta = \delta(N_{eH}, v)$  в явном виде возможно численным методом после подстановки значений констант  $\varphi_{k, \max}, f_T, \delta_{\max}, m, \eta_{MГ}, \eta_{Mер}$  (например, «Подбор параметров» в MS Excel), а также аппроксимирующего уравнения  $M_{тр} = M_{тр}(N_{eH})$ .

Расчет параметров  $N_{e_{xx1}}, N_{e_{xx2}}$  в явном виде (вектор  $\vec{Z}(\vec{X})$ ) с использованием баланса мощности. Баланс мощности при установившемся 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 [13–16]:

$$N_e = N_M + N_\delta + N_f + N_\alpha + N_T, \quad (29)$$

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

$$N_M = N_e(1 - \eta_{MГ}), \quad (30)$$

$N_\delta$  – затраты мощности на буксование, Вт (кВт),

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

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

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

$N_\alpha$  – затраты мощности на преодоление уклона, Вт (кВт),

$$N_\alpha = (M_{тр} + m_{схм} b_p) v g \sin \alpha, \quad (33)$$

$N_T$  – тяговая мощность трактора, Вт (кВт),

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

Из уравнений (29)–(34) определяются:

– мощность двигателя  $N_{e_{xx1}}$  при движении пахотного агрегата на повороте, при  $N_e = N_{e_{xx1}}, \delta \approx 0, f_T = f_{T, xx1}, N_T = 0$

$$N_{xx1} = (1 - \eta_{MГ}) N_{eH} + (f_{T, xx1} + \sin \alpha) (M_{тр} + m_{схм} b_p) g v; \quad (35)$$

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

$$N_{xx2} = (1 - \eta_{MГ}) N_{eH} + (f_{T, xx2} + \sin \alpha) (M_{тр} + m_{схм} b_p) g v, \quad (36)$$

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 Лейдερмана), показывающего, какая часть тепловой энергии, выделяемая при сжигании дизельного топлива в двигателе, переходит в механическую энергию маховика [17]:

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

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<sup>-1</sup> (мин<sup>-1</sup>); интервал варьирования  $n_e / n_H \in [0,3; 1,0]$ .

Из системы уравнений (37) следует, что при  $n_e / n_H = 1$ ,  $g_e / g_{eH}$  при  $N_e = N_{eH}$ , 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

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

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

Рассчитав значения  $c_0$ ,  $c_1$ , по уравнениям (39)–(40) с учетом паспортных данных  $g_{e_{\min}} / g_{eH}$ ,  $N_{e_{g_{\min}}} / N_{eH}$  для дизельных двигателей с турбонаддувом, методом наименьших квадратов [18] может быть получено уравнение  $g_e = g_e(N_e)$  в явном виде, которое позволит рассчитать удельный расход топлива  $g_{ep}$ ,  $g_{exx1}$  и  $g_{exx2}$  при заранее рассчитанных параметрах  $N_{ep}$ ,  $N_{exx1}$  и  $N_{exx2}$ .

Расчет параметра  $l_{exx1}$  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 (рис. 1) описывается уравнением

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

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

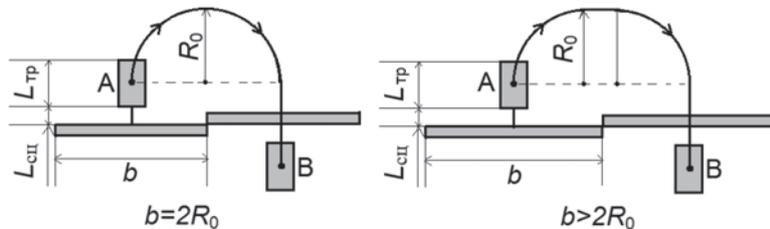


Рис. 1. Схема движения агрегата на повороте  $l_{xx1} = l_{AB}$

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  $R_{тр}$ ,  $L_{тр}$ ,  $g_{eH}$ ,  $M_{тр}$ ,  $C_{тр}$  (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 многокритериальной 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. Многокритериальная 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. О приоритетных направлениях укрепления экономической безопасности государства : Директива Президента Республики Беларусь, 14 июня 2007 г., № 3 : в ред. Указа Президента Респ. Беларусь от 26.01.2016 г. // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2016.
2. Операционная технология вспашки полей / В. Я. Тимошенко [и др.] // Агропанорама. – 2001. – № 2. – С. 27–31.
3. Оценка годовой загрузки новых отечественных тракторов «БЕЛАРУС» класса тяги 6 / А. В. Новиков [и др.] // Агропанорама. – 2016. – № 3. – С. 20–22.
4. Эксплуатационная оценка широкозахватного пахотного агрегата на базе трактора «БЕЛАРУС 4522С» / А. В. Новиков [и др.] // Агропанорама. – 2017. – № 2. – С. 2–8.
5. 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.
6. Ли, Цинчжэнь. Моделирование и оптимизация технологического процесса и средств механизации производства зерна для Среднего Китая на базе белорусской техники / Цинчжэнь Ли, А. Н. Леонов // Вес. Нац. акад. наук Беларусі, Сер. аграр. навук. – 2020. – Т. 58, № 1. – С. 90–107.
7. Ли, Цинчжэнь. Определение номинальной мощности двигателя трактора и скорости МТА для выполнения конкретной операции с минимальным уровнем удельных затрат / Цинчжэнь Ли, А. Н. Леонов // Агропанорама. – 2019. – № 4. – С. 26–32.
8. Параметры оценки приспособленности энергосредств к агрегатированию в составе МТА / А. П. Ляхов [и др.] // Агропанорама. – 2022. – № 3. – С. 6–10.
9. 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.
10. Технологии и техническое обеспечение производства продукции растениеводства. Практикум: учеб. пособие / Т. А. Непарко [и др.]; под ред. Т. А. Непарко. – Минск: ИВЦ Минфина, 2018. – 220 с.
11. Савочкин, В. А. Тяговый расчет трактора / В. А. Савочкин. – М.: МГТУ «МАМИ», 2001. – 48 с.
12. Тверсков, Б. М. Тяговый расчет трактора / Б. М. Тверсков. – Курган: КГУ, 2016. – С. 11.
13. Тимошенко, В. Я. Технологическая надежность вспашки торфяно-болотных почв / В. Я. Тимошенко // Агропанорама. – 2004. – № 2. – С. 10–13.
14. Зангиев, А. А. Эксплуатация машинно-тракторного парка / А. А. Зангиев, А. В. Шпилько, А. Г. Глевшин. – М.: Колос, 2008. – С. 88–102.
15. Техническое обеспечение производства продукции растениеводства / А. В. Новиков [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2011. – 408 с.
16. Техническое обеспечение производства продукции растениеводства / Т. А. Непарко [и др.]; под общ. ред. Т. А. Непарко // Минск, БГАТУ, 2013. – С. 80.
17. Удельный эффективный расход топлива [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belstu.by/Portals/0/userfiles/217/Lekcii/8-Lekciya-Tipi-tractorov-i-avtomobilej-Klassifikaciya.pdf>. – Дата доступа: 25.10.2023.
18. Себер, Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер. – М.: Мир, 1980. – 456 с.