

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ КОМБАЙНА И СКОРОСТИ ЕГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ УБОРКЕ ЗЕРНОВЫХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ МИНИМАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ УДЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ ПРИ ЗАДАННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА

А.Н. Леонов,

профессор каф. моделирования и проектирования БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

Ли Цинчжэнь,

соискатель БГАТУ (Китай, Синь Лэ)

Методом многофакторного моделирования и многокритериальной оптимизации рассчитаны оптимальные мощность двигателя (пропускная способность) и скорость движения комбайна, обеспечивающие при уборке зерновых минимальный уровень удельных затрат γ_{min} при заданной производительности труда $W \geq W_0$.

Ключевые слова: номинальная мощность двигателя, скорость движения комбайна, пропускная способность, уровень удельных затрат, производительность труда, многофакторное моделирование, многокритериальная оптимизация, урожайность, срок уборки, длина участка.

The optimal engine power (carrying capacity) and the speed of the combine harvester have been calculated by means of multivariate modeling and multi criteria optimization methods. These ensure the minimum unit cost γ_{min} at a given labor productivity $W \geq W_0$ when harvesting grain.

Keywords: engine power rating, the speed of the combine harvester, carrying capacity, the level of unit costs, labour productivity, multivariate modeling, multi criteria optimization, crop yield, harvesting time, length of land.

Введение

Данная статья посвящена изучению сложных технических систем, отличительная особенность которых заключается в том, что всестороннее их описание возможно только при наличии конфликтующих между собой параметров оптимизации. В работе [1] методом многофакторного моделирования (МФМ) и многокритериальной оптимизации (МКО) определены оптимальные номинальная мощность двигателя трактора и скорость движения МТА. В качестве параметров оптимизации выбраны: уровень удельных затрат γ и производительность труда W , а в качестве управляющих факторов – номинальная мощность двигателя трактора $N_{ном}$ и скорость его движения v .

Уборка зерновых прямым комбайнированием, по сравнению с раздельным способом уборки, обеспечивает относительно низкий уровень удельных затрат. Именно поэтому в Республике Беларусь прямым комбайнированием убирается более 80 % зерновых.

В настоящее время при выборе комбайна исходя из рекомендаций разработчика, опыта работы и рациональных комплексов, рекомендованных системой машин для механизации растениеводства для конкретного предприятия. Поэтому состав агрегата задается, а рассчитывается в этом случае только скорость движения комбайна с учетом мощности двига-

теля, пропускной способности молотильного аппарата и агротехнического интервала скоростей [2, 3].

Сначала рассчитывается максимальная рабочая скорость движения комбайна $(v_p^q)_{max}$ исходя из его пропускной способности

$$(v_p^q)_{max} = q_d / (b_p H_w), \quad (1)$$

$$H_w = h_w (1 + \delta_c) \quad (2)$$

где q_d – допустимая пропускная способность комбайна, кг/с;

b_p – рабочая ширина жатки, м;

H_w – биологическая урожайность культуры, кг/м²;

h_w – урожайность зерна в поле, кг/м²;

δ_c – соломистость культуры – отношение массы соломы к массе зерна [2].

Затем рассчитывается рабочая скорость комбайна $(v_p^q)_{max}$, исходя из мощности двигателя

$$(v_p^{N_e})_{max} = \frac{\left[N_e - (N_{вoмx} + N_{вoмд}) / \eta_{вoм} \right]}{\frac{R_M}{\eta_{мг} \eta_{\delta} \eta_{рп} \eta_{гп}} + \frac{E_{уд} b_p H}{\eta_{вoм}}}, \quad (3)$$

где N_e – эффективная мощность двигателя, Вт;

$N_{\text{ВОМк}}$ – мощность механизмов холостого хода, обеспечивающих технологический процесс, Вт;

$N_{\text{ВОМд}}$ – мощность на реализацию дополнительных процессов (измельчение соломы), Вт;

R_m – тяговое сопротивление комбайна, Н;

$\eta_{\text{ВОМ}}, \eta_{\text{МГ}}, \eta_{\delta}, \eta_{\text{РП}}, \eta_{\text{ГП}}$ – КПД привода ВОМ, трансмиссии, буксования, клиноременной передачи от ведущего шкива к гидронасосу, гидропривода;

$E_{\text{уд}}$ – удельная энергия при выполнении технологического процесса, Дж/кг.

В итоге рабочая скорость комбайна при уборке зерновых находится из уравнения [2]

$$v = \min \left[\left(v_p^g \right)_{\max}, \left(v_p^{N_e} \right)_{\max} \right] \in \left[v_{\min}^{\text{agr}}, v_{\max}^{\text{agr}} \right], \quad (4)$$

где $v_{\min}^{\text{agr}}, v_{\max}^{\text{agr}}$ – минимальная и максимальная рабочие скорости уборки зерновых, обусловленные агротехнологическими требованиями, м/с.

Однако выбор номинальной мощности комбайна нормативным способом не гарантирует минимальный уровень удельных затрат при уборке зерновых, тем более, что в качестве управляющих факторов следует использовать не только мощность двигателя, но и рабочую скорость движения комбайна.

Наиболее эффективным методом проектирования комбайна является математический, заключающийся в многофакторном моделировании процесса уборки урожая с последующей многокритериальной оптимизацией. Математический метод базируется на большом объеме банка данных: агротехнология (сорт культуры, урожайность, длина участка, срок уборки, рабочая скорость движения комбайна и т.п.), технические параметры комбайна (мощность двигателя, пропускная способность молотильного аппарата, ширина захвата жатки, эксплуатационная масса комбайна, объем бункера и т.п.) и в недалеком прошлом был достаточно сложным для оперативного использования в аграрных предприятиях. Однако, в связи с развитием методов компьютерной математики, изучение сложных технических систем, каковой является уборка зерновых, значительно упростилось.

Поэтому определение номинальной мощности двигателя и скорости движения комбайна методом МФМ и МКО, при наличии нескольких конфликтующих между собой параметров оптимизации и нескольких управляющих факторов, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Цель данной работы – разработка теории расчета оптимальной мощности двигателя комбайна и его рабочей скорости для уборки зерновых прямым комбайнированием в заданный срок с минимальным уровнем удельных затрат при заданной производительности труда.

Основная часть

Решение поставленной задачи включает в себя 4 этапа [1].

Первый этап – обоснование и выбор параметров оптимизации. В качестве конфликтующих параметров оптимизации выбраны:

1) уровень удельных затрат γ (у.е./кг), который является критерием, характеризующим интеллект технического решения;

2) производительность труда W (кг/с), имеющая большое значение для решения социальных проблем.

Конфликтующий характер этих параметров заключается в различных тенденциях их изменения с увеличением номинальной мощности двигателя.

Второй этап – выбор управляющих факторов.

Управляющие факторы, характеризующие состояние технической системы, должны быть независимыми и оказывать существенное влияние на параметры оптимизации. В качестве таких факторов выбраны:

1) номинальная мощность двигателя комбайна $N_{\text{НОМ}}$ (Вт);

2) скорость движения комбайна v (м/с).

Интервал их варьирования обусловлен техническими и агротехнологическими требованиями

$$N_{\text{НОМ}} \in [N_1, N_2], \quad v \in [v_{\min}^{\text{agr}}, v_{\max}^{\text{agr}}].$$

Третий этап – многофакторное моделирование операции уборки зерновых прямым комбайнированием, заключающееся в составлении уравнений, отражающих зависимость параметров оптимизации от управляющих факторов.

В данной статье моделируется процесс уборки зерновых, который реализуется на площади S_0 в срок ΔT_0 и характеризуется следующими параметрами:

$$n_{\text{уч}} = S_0 / (L_{\text{уч}} C_{\text{уч}}), \quad (5)$$

где S_0 – общая площадь всех участков, м²;

$n_{\text{уч}}$ – число участков;

$L_{\text{уч}}, C_{\text{уч}}$ – длина и ширина первого участка, м;

Моделирование параметра оптимизации – уровень удельных затрат γ ($N_{\text{НОМ}}, v$):

$$\gamma = D/M, \quad (6)$$

$$D = \sum_{j=1}^3 D_j, \quad (7)$$

где γ – уровень удельных затрат при уборке зерновых, у.е./кг;

M – собранная масса зерна, пересчитанная на влажность длительного хранения w_0 , кг;

D, D_1, D_2, D_3 – затраты: общие, на топливо, труд, амортизацию, у.е.

Затраты на топливо D_1 :

$$D_1 = (1 + k_{\text{СММ}}) p_{\text{ТОП}} Q_{\text{ТОП}}, \quad (8)$$

где $k_{\text{СММ}}$ – коэффициент использования смазочных материалов;

$p_{\text{ТОП}}$ – стоимость топлива, у.е./кг;

$Q_{\text{ТОП}}$ – расход топлива всеми комбайнами при уборке зерновых за время ΔT_0 , кг.

$$Q_{\text{топ}} = n_{\text{уч}}(N_{\text{р}} g_{\text{р}} t_{\text{р}} + N_{\text{хх1}} g_{\text{хх1}} t_{\text{хх1}} + N_{\text{хх2}} g_{\text{хх2}} t_{\text{хх2}} + G_{\text{выгр}} t_{\text{выгр}} + G_{\text{ост}} t_{\text{ост}}), \quad (9)$$

$$G_{\text{выгр}} = k_{\text{выгр}} N_{\text{ном}} g_{\text{ном}}, \quad (10)$$

$$G_{\text{ост}} = k_{\text{ост}} N_{\text{ном}} g_{\text{ном}}, \quad (11)$$

где $N_{\text{р}}$, $g_{\text{р}}$, $N_{\text{хх1}}$, $g_{\text{хх1}}$, $N_{\text{хх2}}$, $g_{\text{хх2}}$ – эффективная мощность двигателя комбайна и удельный расход топлива: при уборке урожая в загоне, при движении в поворотной полосе и при переезде с участка на участок, Вт, кг/Дж;

$t_{\text{р}}$, $t_{\text{хх1}}$, $t_{\text{хх2}}$, $t_{\text{выгр}}$, $t_{\text{ост}}$ – время: чистой работы комбайна, движения в поворотной полосе, при переезде с участка на участок, при выгрузке зерна, технологических остановок в пересчете на один участок, с;

$g_{\text{ном}}$ – удельный расход топлива при номинальной мощности двигателя, кг/Дж;

$G_{\text{выгр}}$, $G_{\text{ост}}$ – расход топлива при выгрузке зерна и на остановках технологического обслуживания, кг/с;

$k_{\text{выгр}}$, $k_{\text{ост}}$ – коэффициенты расхода топлива при выгрузке зерна и на остановках технологического обслуживания.

Затраты на труд D_2 :

$$D_2 = \Delta T_0 n_{\text{км}} (p_{\text{кб}} + k_{\text{вс}} p_{\text{вс}})(1 + k_{\text{нак}}), \quad (12)$$

$$n_{\text{км}} = n_{\text{уч}} / n_{\text{уч1}}, \quad (13)$$

$$n_{\text{уч1}} = k_{\text{см}} \Delta T_0 / \Delta t_1, \quad (14)$$

где ΔT_0 – срок уборки урожая, с;

$n_{\text{км}}$ – количество комбайнов, используемых для уборки урожая в срок ΔT_0 ;

$p_{\text{кб}}$, $p_{\text{вс}}$ – удельная оплата труда комбайнера и вспомогательного рабочего, у.е./с;

$k_{\text{вс}}$ – число вспомогательных рабочих на одном комбайне;

$k_{\text{нак}}$ – коэффициент накладных расходов;

$n_{\text{уч1}}$ – количество участков, убранных одним комбайном за срок ΔT_0 ;

$k_{\text{см}}$ – коэффициент сменности;

Δt_1 – время уборки урожая одним комбайном с одного участка, с.

$$\Delta t_1 = t_{\text{р}} + t_{\text{выгр}} + t_{\text{хх1}} + t_{\text{хх2}} + t_{\text{ост}}, \quad (15)$$

$$t_{\text{р}} = \frac{L_{\text{уч}} C_{\text{уч}}}{b_{\text{р}} v}, \quad (16)$$

$$b_{\text{р}} = \frac{q_{\text{д}}}{v h_w (1 + \delta_c)}, \quad (17)$$

$$t_{\text{хх1}} = L_{\text{хх1}} / v, \quad (18)$$

$$t_{\text{хх2}} = L_{\text{хх2}} / v, \quad (19)$$

$$t_{\text{выгр}} = t_{\text{Б}} \frac{L_{\text{уч}} C_{\text{уч}} h_w (1 - \mu_{T_0})(1 - \mu_{\text{T}})}{V_{\text{Б}} \rho_{\text{зер}}}, \quad (20)$$

$$t_{\text{ост}} = t_{\text{ост1}} (N_{\text{ном}} / N_0) + t_{\text{ост0}}, \quad (21)$$

где $L_{\text{хх1}}$ – общая длина поворотов на одном участке, м;

$L_{\text{хх2}}$ – длина переезда с участка на участок, м;

$t_{\text{Б}}$ – время разовой выгрузки зерна из бункера, с;

μ_{T_0} – потери зерна за срок T_0 ;

μ_{T} – технологические потери комбайна;

$V_{\text{Б}}$ – емкость бункера, м³;

$\rho_{\text{зер}}$ – насыпная плотность собранного в поле зерна, кг/м³;

$t_{\text{ост1}}$, $t_{\text{ост0}}$ – технологические константы, характеризующие специфику агротехнологии, с;

$N_0 = 1000$ Вт (для придания выражению $N_{\text{ном}}/N_0$ безразмерного вида).

Допустимая пропускная способность молотильного аппарата равна

$$q_{\text{д}} = 0,6 a_1 \left(1 + b_1 \frac{h_w - h_3}{h_3} \right) \times \left(1 + \frac{1}{\delta_c} \right) (1 - k_w (w - w_0)) q_{\text{н}}, \quad (22)$$

где a_1 – коэффициент обмолачиваемости – для безостных культур и двухбарабанного молотильного аппарата $a_1 = 1$;

b_1 – коэффициент, учитывающий тип молотильного устройства – для двухбарабанного молотильного аппарата $b_1 = 0,27$;

$q_{\text{н}}$ – номинальная пропускная способность молотильного аппарата, определяемая при эталонной урожайности пшеницы $h_3 = 0,4$ кг/м², $\delta_c = 1,5$, $w_0 = 0,15$, кг/с;

k_w – коэффициент, учитывающий влияние влажности зерна;

w – влажность зерна в поле.

$$p_{\text{кб}} = p_{\text{кб1}} (N_{\text{ном}} / N_0) + p_{\text{кб0}}, \quad (23)$$

$$p_{\text{вс}} = p_{\text{вс1}} (N_{\text{ном}} / N_0) + p_{\text{вс0}}, \quad (24)$$

где $p_{\text{кб1}}$, $p_{\text{вс1}}$, $p_{\text{кб0}}$, $p_{\text{вс0}}$ – константы, характеризующие удельную оплату труда, у.е./с.

Затраты на амортизацию D_3 :

$$D_3 = n_{\text{км}} (C_{\text{м}} + c_{\text{ж}} b) z_{\text{км}} (1 + \xi_{\text{км}}) \Delta T_0 / \tau_{\text{км}}, \quad (25)$$

где $z_{\text{км}}$ – коэффициент годовой амортизации комбайна;

$C_{\text{м}}$ – стоимость комбайна без жатки, у.е.;

$c_{\text{ж}}$ – удельная стоимость жатки, у.е./м;

$\xi_{\text{км}}$ – коэффициенты затрат на ремонт и техобслуживание;

$\tau_{\text{км}}$ – норматив годовой загрузки комбайна, с.

Масса зерна, пересчитанная на влажность при длительном хранении w_0

$$M = h_{w_0} (1 - \mu_{\text{T}})(1 - \mu_{T_0}) S_0 \quad (26)$$

$$h_{w_0} = h_w (1 - w) / (1 - w_0) \quad (27)$$

где h_{w_0} – урожайность зерна при влажности длительного хранения w_0 , кг/м².

Для того, чтобы математическую модель для уровня удельных затрат γ , представленную уравнени-

ями (5)-(27), можно было использовать для многокритериальной оптимизации, необходимо привлечь уравнение баланса мощности комбайна [3], позволяющее рассчитать N_p, N_{xx1}, N_{xx2} как функции $N_{ном}$ и v , и уравнения Лейдермана [4], позволяющие рассчитать $g_p, g_{выгр}, g_{xx1}, g_{xx2}$ как функции $N_{ном}$ и v .

Баланс мощности двигателя комбайна для расчета N_p, N_{xx1}, N_{xx2} :

$$N_e = N_f / \eta_f + N_{вом} / \eta_{вом}, \quad (28)$$

$$N_f = M_3 g v (f_{кч} + \sin \alpha), \quad (29)$$

$$M_3 = M_{кон} + \overline{M}_{зер} + \overline{M}_{топ} + M_{кб} + m_ж b, \quad (30)$$

$$\overline{M}_{зер} = V_B \rho_{зер} / 2, \quad (31)$$

$$\overline{M}_{топ} = V_{топ} \rho_{топ} / 2, \quad (32)$$

$$\eta_f = \eta_{мг} \eta_{\delta} \eta_{рп} \eta_{гп}, \quad (33)$$

$$N_{вом} = N_{техн} + N_{xx} + N_{изм} + N_{выг}, \quad (34)$$

$$N_{техн} = E_{уд} q_d, \quad (35)$$

$$N_{изм} = k_{изм} N_{техн}, \quad (36)$$

$$N_{xx} = E_{xx} q_n, \quad (37)$$

$$N_{выгр} = k_{выгр} N_{ном}, \quad (38)$$

где $N_e, N_f, N_{техн}, N_{xx}, N_{изм}, N_{выг}$ – мощность: эффективная, на самодвижение комбайна, на выполнение технологического процесса (срезание, транспортировка, обмолот, разделение соломы и зерна), холостого хода, работы измельчителя, шнека при выгрузке зерна из бункера, Вт;

η_f – КПД ходовой части;

$M_3, M_{кон}, \overline{M}_{зер}, \overline{M}_{топ}, M_{кб}$ – масса: эксплуатационная комбайна, конструкционная комбайна (без жатки), зерна в бункере (средняя), топлива (средняя), комбайнера, кг;

$V_{топ}$ – объем топливного бака, м³;

$\rho_{топ}$ – плотность дизельного топлива, кг/м³;

$m_ж$ – удельная масса жатки, кг/м;

$f_{кч}$ – коэффициент сопротивления качению;

α – угол уклона местности, рад;

$k_{изм}$ – коэффициент мощности измельчения;

E_{xx} – удельная энергия механизмов холостого хода, обеспечивающих технологический процесс, Дж/кг;

$k_{выгр}$ – коэффициент мощности при выгрузке зерна из бункера.

Мощность двигателя комбайна при уборке урожая в загоне N_p рассчитывается по уравнениям (28) – (38), причем $N_e = N_p, N_{выг} = 0$

$$N_p = \frac{M_3 g f_{кч,г} v}{\eta_{мг} \eta_{\delta} \eta_{рп} \eta_{гп}} + \frac{(1 + k_{изм}) E_{уд} b v h_w (1 + \delta_c)}{\eta_{вом}} + \frac{E_{xx} q_n}{\eta_{вом}}, \quad (39)$$

где $f_{кч,г}$ – коэффициент сопротивления качению комбайна при уборке в гоне.

Мощность двигателя при движении комбайна в поворотной полосе ($j = 1$) и при переезде с участка на участок ($j = 2$) N_{xxj} рассчитывается по уравнениям (28) – (38), причем $N_e = N_{xxj}, N_{вом} = 0$

$$N_{xxj} = \frac{M_3 g f_{кч,xxj} v}{\eta_{мг} \eta_{\delta} \eta_{рп} \eta_{гп}}, \quad (40)$$

где $f_{кч,xxj}$ – коэффициент сопротивления качению комбайна в поворотной полосе ($j = 1$), при переезде с участка на участок ($j = 2$).

Для расчета g_p, g_{xx1}, g_{xx2} воспользуемся уравнениями Лейдермана [4]:

$$g_e / g_{ном} = c_0 - c_0 (n/n_{ном}) + (n/n_{ном})^2, \quad (41)$$

$$N_e / N_{ном} = c_1 (n/n_{ном}) + (2 - c_1) (n/n_{ном})^2 - (n/n_{ном})^3, \quad (42)$$

где g_e – удельный расход топлива при мощности двигателя N_e , кг/Дж;

c_0, c_1 – константы для конкретной марки дизельного двигателя;

$n, n_{ном}$ – скорость коленчатого вала: угловая, номинальная угловая, с⁻¹;

$N_{ном}$ – номинальная мощность двигателя, Вт.

Интервал варьирования $n/n_{ном} \in [0,3; 1,0]$.

Из уравнений (41) и (42) следует, что при $n/n_{ном} = 1$, $g_e = g_{ном}, N_e = N_{ном}$.

Значения c_0 и c_1 различные для разных линеек дизельных двигателей, и могут быть рассчитаны по паспортным данным $g_{мин}/g_{ном}$ и $N_{g_{мин}}/N_{ном}$.

Значение угловой скорости $n_{g_{мин}}$, обеспечивающее минимальное значение $g_{мин}$, при условии $dg_e/dn = 0$ находится из уравнения (41)

$$n_{g_{мин}} / n_{ном} = c_0 / 2. \quad (43)$$

Подставляя уравнение (43) в уравнения (41) и (42), получим

$$g_{мин} / g_{ном} = c_0 - c_0^2 / 4, \quad (44)$$

$$N_{g_{мин}} / N_{ном} = (4c_1 c_0 + 2(2 - c_1)c_0^2 - c_0^3) / 8. \quad (45)$$

Уравнения (44) и (45) позволяют рассчитать значения c_0, c_1 , используя паспортные данные $g_{мин}/g_{ном}$ и $N_{g_{мин}}/N_{ном}$. После этого, уравнения (41) и (42) описывают зависимость $g_e/g_{ном} = g_e/g_{ном} (n/n_{ном})$ и $N_e/N_{ном} = N_e/N_{ном} (n/n_{ном})$ для конкретной линейки дизельных двигателей. Исключая из них $n/n_{ном}$, методом МНК можно получить выражения $g_e = g_e(N_e)$ в явном виде, что позволит рассчитать удельный расход топлива g_{xx1} и g_{xx2} при известных значениях N_{xx1} и N_{xx2} .

Уравнения (5)-(45) являются математической моделью уровня удельных затрат $\gamma = \gamma(N_{ном}, v)$.

Моделирование параметра оптимизации – производительность труда $W = W(N_{\text{ном}}, v)$. Для этого воспользуемся уравнениями (13)-(23) и (27)

$$W = \frac{M}{\Delta T_0 n_{\text{км}} (1 + k_{\text{вс}})}, \quad (46)$$

где W – производительность труда, кг/с.

Уравнение (46) с учетом уравнений (13)-(23), (27) являются математической моделью производительности труда W .

Четвертый этап – многокритериальная оптимизация (метод ϵ -ограничений [5]).

В качестве целевой функции использован параметр оптимизации γ

$$\gamma \rightarrow \min. \quad (47)$$

На параметр оптимизации W наложено функциональное ограничение

$$W \geq W_0. \quad (48)$$

Факторные ограничения:

– исследованный диапазон мощностей двигателей комбайнов

$$N_1 \leq N_{\text{ном}} \leq N_2; \quad (49)$$

– агротехнологическое требование

$$v_{\text{мин}}^{\text{арп}} \leq v \leq v_{\text{макс}}^{\text{арп}}; \quad (50)$$

– энергетическое требование

$$N_p \leq N_{\text{ном}}. \quad (51)$$

Так как траектория движения комбайна в поворотной полосе оказывает влияние на энергетический и временной баланс времени, в данной статье, в качестве примера, выбрана траектория комбайна, схематично представленная на рис. 1 с очередностью обработки полос 1-7. Каждые 7 полос образуют один загон, ширина которого $7b$. Количество таких загон на одном участке равно

$$n_{\text{бл}} = C_{\text{уч}} / 7b. \quad (52)$$

Суммарная длина поворотов на одном участке равна

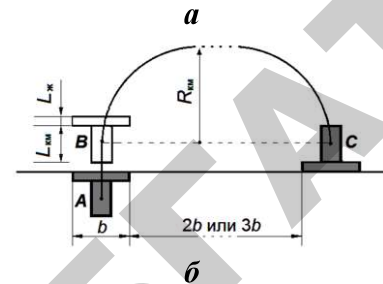
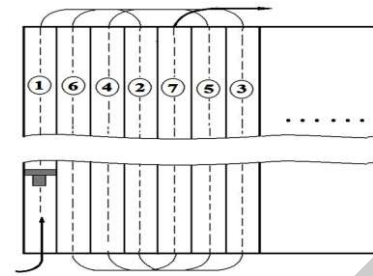


Рис. 1. Схема движения комбайна в поворотной полосе: а – схема движения комбайна в загоне и поворотной полосе; б – параметры траектории движения комбайна в поворотной полосе

$$L_{\text{хх}_1} = AB + BC =$$

$$= n_{\text{бл}} [7R_{\text{км}} (\pi - 2) + 23b + 7(L_{\text{км}} + 2L_{\text{ж}})], \quad (53)$$

где $R_{\text{км}}$ – радиус поворота комбайна, м;

$L_{\text{км}}, L_{\text{ж}}$ – длина комбайна и жатки, м.

Кроме того, для оптимизации процесса уборки зерновых необходимо выбрать линейку комбайнов с перечнем технико-экономических параметров. В качестве примера выбрана линейка комбайнов марки «ПАЛЕССЕ», технико-экономические параметры которых приведены в таблицах 1-3.

Структурные параметры земельного участка, технологические и экономические параметры агротехнологии уборки зерновых, характерные для среднего Китая, в качестве примера, приведены в таблицах 4-7.

Таблица 1. Техничко-экономические параметры комбайнов торговой марки «ПАЛЕССЕ» [6,7], коррелирующие с мощностью комбайна

Марка	$N_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$q_{\text{нз}}, \text{кг/с}$	$R_{\text{км}}, \text{м}$	$M_{\text{кон}}, \text{т}$	$V_{\text{б}}, \text{м}^3$	$V_{\text{топ}}, \text{м}^3$	$g_{\text{ном}}, \text{кг/кВт/ч}$	$C_{\text{км}}, \text{у.е.}$
«ПАЛЕССЕ GS16»	390	16	10,0	18,1	9	0,8	0,210	181100
«ПАЛЕССЕ GS14»	294	14	10,0	17,6	9	0,8	0,215	152500
«ПАЛЕССЕ GS12A1»	243	12	8,6	14,4	8	0,6	0,212	131000
«ПАЛЕССЕ GS10»	184	10	9,0	13,6	7	0,5	0,220	99600
«ПАЛЕССЕ GS812»	169	8	7,5	12,0	5,5	0,5	0,217	94600
«ПАЛЕССЕ GS575»	114	5	7,2	10,1	3,5	0,3	0,223	61650

Таблица 2. Техничко-экономические константы комбайнов торговой марки «ПАЛЕССЕ» [3], не зависящие от мощности двигателя

$\eta_{\text{мг}}$	η_{δ}	$\eta_{\text{рп}}$	$\eta_{\text{гп}}$	$\eta_{\text{вом}}$	$\xi_{\text{км}}$	$\tau_{\text{км}}, \text{ч}$	$z_{\text{км}}$	$k_{\text{нзм}}$	$E_{\text{хх}}, \text{Дж/кг}$	$E_{\text{вд}}, \text{Дж/кг}$	$L_{\text{км}}, \text{м}$	$L_{\text{ж}}, \text{м}$	$m_{\text{ж}}, \text{кг/м}$
0,85	0,97	0,90	0,80	0,95	0,5	130	0,10	0,70	2750	7400	10,8	2	320

Таблица 3. Технические константы двигателей ЯМЗ с турбонадувом [8]

Марка двигателя	$N_{g_{\text{мин}}} / N_{\text{ном}}$	$g_{\text{мин}} / g_{\text{ном}}$	ϵ	$k_{\text{смз}}$	$\rho_{\text{топ}}, \text{кг/м}^3$
ЯМЗ	0,696	0,927	0,25	0,05	850

Таблица 4. Структурные константы земельного участка

S_0 , га	$L_{уч}$, м	$C_{уч}$, м	$L_{хх2}$, м	α , рад
1000	100–1500	$L_p/2$	500	0

Таблица 5. Технологические константы процесса уборки пшеницы [2]

$f_{тр,хх1}$	$f_{тр,хх2}$	$v_{мин}^{ар}$, м/с	$v_{макс}^{ар}$, м/с	Δt_0 , дн	$U_{вс}$, т/га	μ_r	$\mu_{т0}$	w	w_0	$t_{ост1}$, с	$t_{ост0}$, с	$\rho_{зер}$, т/м ³	t_B , с
0,10	0,06	0,8	2,2	5	2-8	0,015	0,035	0,22	0,15	2,6	-90	0,7	180

Таблица 6. Зависимость коэффициента солоmistости от урожайности пшеницы [9]

h_w , т/га	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
δ_c	1,4	1,2	1,1	1,0	0,91	0,85	0,80

Таблица 7. Природно-производственные константы для среднего Китая

$p_{топ}$, у.е./кг	$k_{нак}$	$k_{см}$	W_0 , т/ч	$n_{мех}$	$n_{всп}$	$p_{мех1}$, у.е./с	$p_{мех0}$, у.е./с	$p_{всп1}$, у.е./с	$p_{всп0}$, у.е./с	$p_{жэ}$, у.е./м
1	0,35	0,8	2	1	0	$4,17 \cdot 10^{-6}$	$6,94 \cdot 10^{-4}$	$2,89 \cdot 10^{-6}$	$6,19 \cdot 10^{-4}$	1000

Для осуществления многокритериальной оптимизации на базе данных табл. 1, методом МНК были получены регрессионные зависимости параметров q_n , $R_{км}$, $M_{км}$, $g_{ном}$, $C_{км}$ от $N_{ном}$ в явном виде (рис. 2), а на базе данных табл. 6 – зависимость солоmistости δ_c от урожайности $U_{в0}$ (рис. 2).

$$q_n = k_q (N_{ном} / N_0) + a_q, R^2 = 0,940, \quad (54)$$

$$R_{км} = k_R \ln(N_{ном} / N_0) + a_R, R^2 = 0,931, \quad (55)$$

$$g_{ном} = k_g (N_{ном} / N_0) + a_g, R^2 = 0,781, \quad (56)$$

$$M_{км} = k_M (N_{ном} / N_0) + M_0, R^2 = 0,912, \quad (57)$$

$$C_{км} = k_C (N_{ном} / N_0) + C_0, R^2 = 0,970, \quad (58)$$

$$V_B = k_{V_B} \ln(N_{ном} / N_0) + V_{B,0}, R^2 = 0,913, \quad (59)$$

$$V_{топ} = k_{V_{топ}} \ln(N_{ном} / N_0) + V_{топ0}, R^2 = 0,945, \quad (60)$$

$$\delta_c = k_{\delta_c} \ln(h_w / h_0) + \delta_{c0}, R^2 = 0,998, \quad (61)$$

где $k_q = 0,0393$ кг/с; $a_q = 1,695$ кг/с; $k_R = 2,91$ м; $a_R = -6,98$ м; $k_g = -1,22 \cdot 10^{-11}$ кг/Дж; $a_g = 6,29 \cdot 10^{-8}$ кг/Дж; $k_M = 30,0$ кг; $M_0 = 7300$ кг; $k_C = 362,1$ у.е.; $C_0 = 2,53 \cdot 10^4$ у.е.; $k_{V_B} = 4,75$ м³; $V_{B,0} = -18,5$ м³; $k_{V_{топ}} = 0,432$ м³; $V_{топ0} = -1,74$ м³; $k_{\delta_c} = -0,431$; $\delta_{c0} = 0,698$; R^2 – коэффициент детерминации уравнения регрессии.

На базе данных табл. 3 и уравнений (45) и (46) рассчитаны константы $c_0 = 1,46$; $c_1 = 0,0987$, а затем методом МНК было получено $g_e = g_e(N_e)$ в явном виде

$$g_e / g_{ном} = 1,257 - 0,976(N_e / N_{ном}) + 0,718(N_e / N_{ном})^2, \quad R^2 = 0,998. \quad (62)$$

С помощью уравнения (62) для $N_e = N_{хх1}$, $N_e = N_{хх2}$ (уравнение (41)) рассчитывается удельный расход топлива $g_{лх1}$ и $g_{лх2}$.

Уравнения (54)-(62) статистически значимы по критерию Фишера [10], так как

$$F_3 = R^2(n-k-1)/k/(1-R^2) > F_{k, n-k-1; 0,95}, \quad (63)$$

где n – количество опытов; k – число переменных факторов; $F_{k, n-k-1; 0,95} \in (5, 9)$.

Результаты многокритериальной оптимизации:

1. Для любого участка, длиной $L_{уч}$, существует оптимальный комплекс факторов ($N_{ном})_{опт}$ и $v_{опт}$, обеспечивающий минимальный уровень удельных затрат $\gamma_{мин}$, при условии, что производительность труда $W \geq W_0$ (рис. 3а). Показано, что с увеличением длины участка $L_{уч}$ эффективность уборки повышается, так как $\gamma_{мин}$ уменьшается, а W увеличивается (рис. 3 б).

2. Оптимальная рабочая скорость комбайна $v_{опт}$ – результат компромисса между изменением топливных затрат на самодвижение комбайна и амортизационных затрат за счет изменения времени в поворотной полосе. С увеличением $L_{уч}$, уровень удельных затрат γ в большей степени зависит от экономии топлива, и поэтому при увеличении $L_{уч}$, скорость комбайна $v_{опт}$ уменьшается. При этом пропускная способность $q = q_d$ обеспечивается за счет увеличения ширины захвата $b_{опт}$.

3. С увеличением урожайности h_w , которая сопровождается уменьшением коэффициента солоmistости δ_c , увеличивается допустимая пропускная способность q_d , что приводит к уменьшению $\gamma_{мин}$ и увеличению W . Повышение q_d достигается за счет увеличения мощности двигателя, которое реализуется на технологические цели. В результате, с увеличением h_w , ($N_{ном})_{опт}$ увеличивается.

4. При урожайности $h_w = 5,6$ т/га (рис. 4а, точка А) $v_{опт} = 2,2$ м/с (что определяется агротехнологическими требованиями), $N_p = (N_{ном})_{опт}$ и $q = q_d$. Дальнейшее увеличение $h_w > 5,6$ т/га (рис. 4а, точка Б) приводит к увеличению N_p . Выполнение условия $N_p = (N_{ном})_{опт}$ достигается за счет уменьшения $v_{опт}$ (уменьшение энергии на самодвижение комбайна). При этом снижается уровень удельных затрат γ , а условие $q = q_d$ обеспечивается за счет увеличения $b_{опт}$ (рис. 4в).

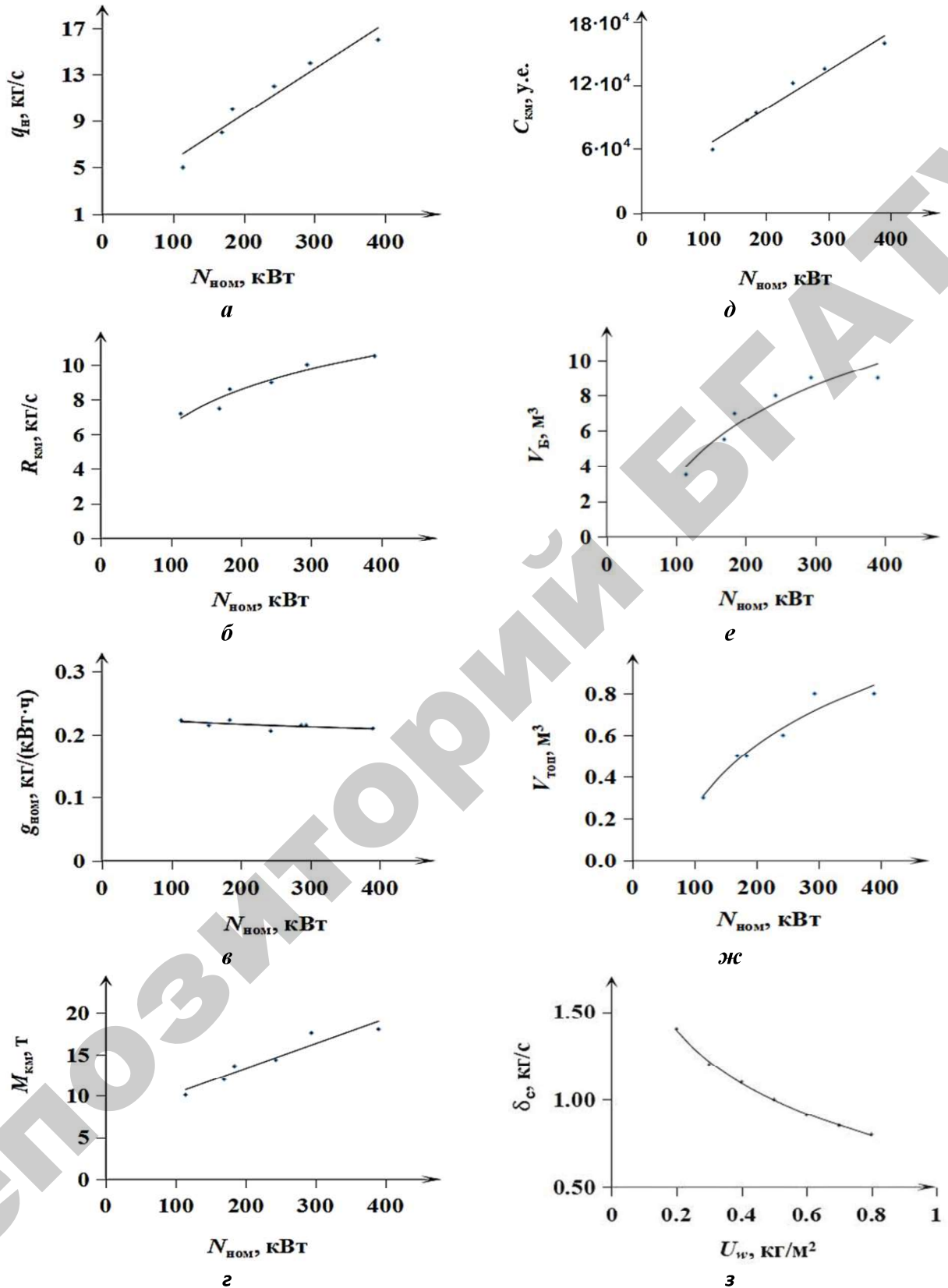


Рис. 2. Графики зависимостей q_H (а), R_{KM} (б), $g_{НОМ}$ (в), M_{KM} (г), C_{KM} (д), V_B (е), $V_{ТОП}$ (ж) от мощности двигателя $N_{НОМ}$ и зависимость δ_c (з) от урожайности U_w

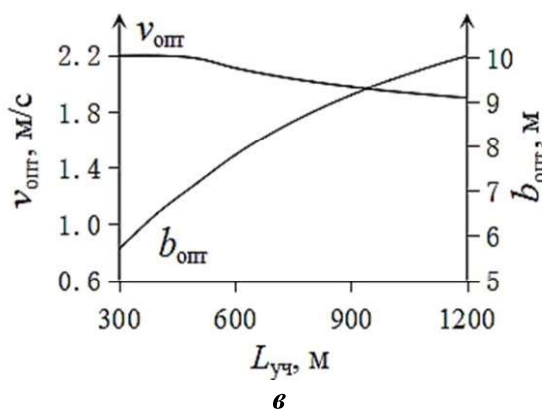
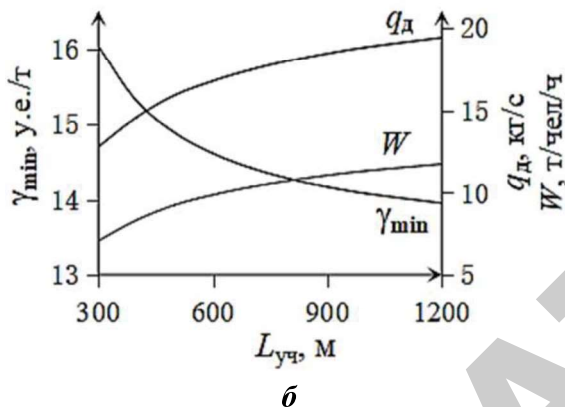
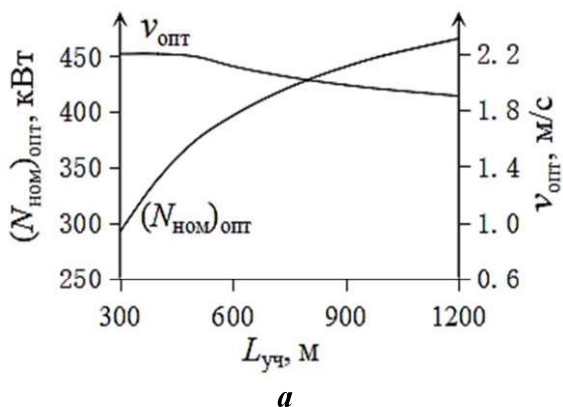


Рис. 3. Графики зависимостей $(N_{\text{НОМ}})_{\text{ОПТ}}$ и $v_{\text{ОПТ}}$ (а); γ_{min} , q_d и W (б); $v_{\text{ОПТ}}$ и $b_{\text{ОПТ}}$ (в) от $L_{\text{уч}}$ при $U_w = 5 \text{ м/га}$ и $\Delta T_0 = 5 \text{ дн}$.

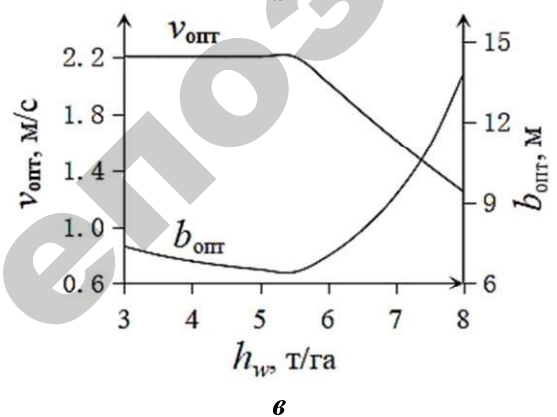
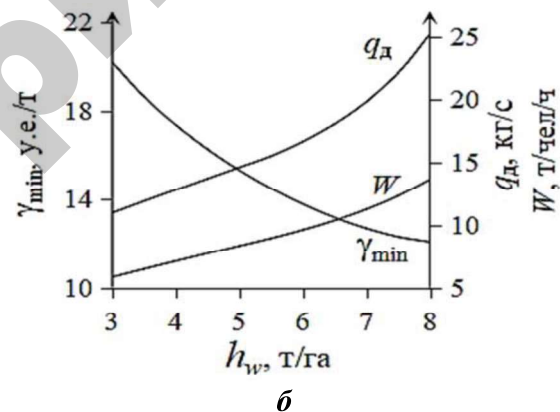
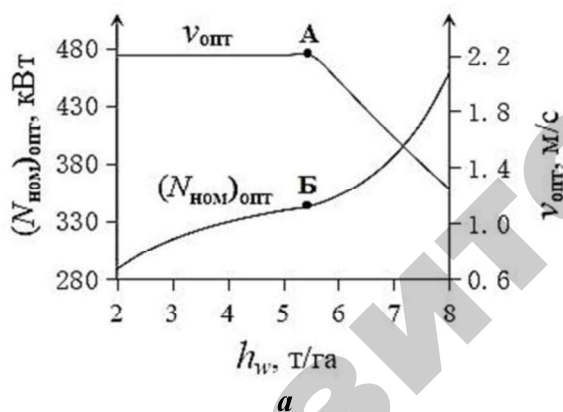


Рис. 4. Графики зависимостей $(N_{\text{НОМ}})_{\text{ОПТ}}$ и $v_{\text{ОПТ}}$ (а); γ_{min} , q_d и W (б); $v_{\text{ОПТ}}$ и $b_{\text{ОПТ}}$ (в) от h_w при $L_{\text{уч}} = 400 \text{ м}$, $C_{\text{уч}} = 200 \text{ м}$ и $\Delta T_0 = 5 \text{ дн}$.

5. При уборке зерновых изменение параметров оптимизации γ и W носит конфликтующий характер (рис. 5, участок b-c), так как увеличение производительности труда W возможно только за счет увеличения уровня удельных затрат γ . Например, для участка $L_{\text{уч}} = 300$ м, $C_{\text{уч}} = 150$ м, увеличение W с 7 до 10 т/ч возможно только за счет увеличения γ_{min} с 16,0 до 16,5 у.е./т (рис. 5).

6. Эксплуатация комбайна на участке a-b бессмысленна, так как параметры точки b ($\gamma_{\text{min}} = 16,0$ у.е./т; $W = 7,0$ т/чел/ч) лучше, чем параметры всех точек на участке a-b (рис. 5).

Заключение

Разработана математическая модель, позволяющая рассчитать номинальную мощность двигателя комбайна, и, следовательно, коррелирующую с ней пропускную способность, а также рабочую скорость его движения при уборке зерновых для участков различной длины и урожайности в требуемый срок, отличающаяся тем, что в качестве управляющих факторов выбраны – мощность двигателя и рабочая скорость комбайна, что позволяет добиться минимального уровня удельных затрат при заданной производительности труда.

Показано, что между параметрами оптимизации «уровень удельных затрат» и «производительность труда» существует конфликтующий характер изменений: добиться увеличения производительности труда можно только за счет увеличения уровня удельных затрат.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Непарко, Т.А. Техническое обеспечение производства продукции растениеводства. / Т.А. Непарко, А.В. Новиков, И.Н. Шило [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2013. – С. 75.
3. Техническое обеспечение производства продукции растениеводства / А.В. Новиков [и др.]. –

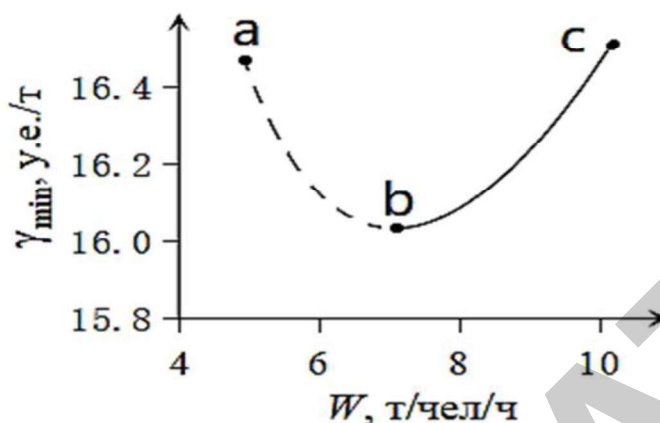


Рис. 5. График зависимости минимального уровня удельных затрат γ_{min} от производительности труда W при $L_{\text{уч}} = 300$ м, $C_{\text{уч}} = 150$ м, $h_w = 5$ м/га, $v_{\text{опт}} = 2,20$ м/с

Минск: БГАТУ, 2011. – С. 110.

4. Удельный расход топлива [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.belstu.by/Portals/0/userfiles/217/lekci/8-Lekciya-Tipi-tractorov-i-avtomobilejKlassifikaciya.pdf>. – Дата доступа: 25.03.2019.

5. Sawaragi, Y. Theory of Multiobjective Optimization / Y. Sawaragi // J. of Mathematics in Science and Engineering. – Orlando, FL: Academic Press Inc, 1985. – Vol. 176. – 296 p.

6. Зерноуборочные комбайны «ГОМСЕЛЬМАШ». – [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.gomselmash.by/produktiiva/zernouborochnye-kombainy/> – Дата доступа: 15.08.2019.

7. Комбайны «ПАЛЕССЕ» в России. – [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://tiu.ru/Kombajn-palesse-1.html>. – Дата доступа: 15.08.2019.

8. Двигатели марки ЯМЗ [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: https://dvigateli-yamz.ru/katalog/yamz-850/yamz-856_10/yamz-e856_10/. – Дата доступа: 15.08.2019.

9. Коэффициенты пересчета зерна и семян в побочную продукцию и содержание основных элементов питания в побочной продукции сельскохозяйственных культур в Республике Беларусь / Е.Н. Богатырева [и др.] // Почвоведение и агрохимия. – 2016. – № 2 (57). – С. 81.

10. Себер, Дж. Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер. – М.: Мир, 1980. – 456 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 21.11.2019