

Научная статья
УДК 631.3(470.64)
doi: 10.55196/2411-3492-2025-1-47-48-56

Оперативное обоснование зональных рекомендаций по эффективному использованию машинно-тракторных агрегатов (МТА) в условиях КБР

Руслан Асланбиевич Балкаров^{✉1}, Вячеслав Барасбиевич Дзуганов²

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030

^{✉1}rus.balkarov.52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8946-7867>

²dzuganovv55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4286-1733>

Аннотация. В статье предлагается достаточно простой метод решения задач агрегатирования с использованием только типовой нормативной и справочной информации. На основании этого метода можно оперативно разрабатывать соответствующие рекомендации еще до начала широкой производственной эксплуатации новых тракторов. На первом этапе проводится исследование на примере тяговых агрегатов, наиболее распространенных и сложных с точки зрения их комплектования. Упрощение предлагаемой методики достигается путем последовательного исследования МТА на двух математических моделях. Первая модель характеризует функционирование агрегата в конкретных естественно-производственных условиях. Для этой модели составляется математическое выражение критерия оптимальности и определяется соответствующая мощность трактора, которая может быть реализована с наибольшей эффективностью. С учетом особенностей выполнения технологического процесса в заданных условиях выбирается тип и конкретная марка трактора. Вторая модель характеризуется взаимодействием движителя трактора с почвой и рабочих органов орудия с обрабатываемой средой при рабочем ходе агрегата. Данная модель с учетом агротехнических требований позволяет определять значения ширины захвата и скорости, при которых удельная чистая производительность (в расчете на единицу мощности) будет наибольшей, а энергозатраты – наименьшими. Апробация методики проводилась на примере обоснования пахотного агрегата для условий Кабардино-Балкарской Республики. Предлагаемая методика позволяет в наглядной и доступной форме разрабатывать рекомендации по эффективному использованию агрегатов в конкретных условиях работы.

Ключевые слова: оперативная разработка, зональные рекомендации, эффективность использования МТА, методика оптимизации, эксплуатационные параметры МТА

Для цитирования. Балкаров Р. А., Дзуганов В. Б. Оперативное обоснование зональных рекомендаций по эффективному использованию машинно-тракторных агрегатов (МТА) в условиях КБР // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2025. № 1(47). С. 48–56. doi: 10.55196/2411-3492-2025-1-47-48-56

Original article

Operational substantiation of zonal recommendations for the efficient use of machine-tractor units (MTU) in the conditions of the KBR

Ruslan A. Balkarov^{✉1}, Vyacheslav B. Dzukanov²

Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik,
Russia, 360030

^{✉1}rus.balkarov.52@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8946-7867>

²dzuganovv55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4286-1733>

Abstract. The article proposes a fairly simple method for solving aggregation problems using only typical regulatory and reference information. Based on this method, it is possible to quickly develop relevant recommendations even before the start of wide industrial operation of new tractors. At the first stage, a study is carried out using the example of traction units, the most common and complex in terms of their assembly. The proposed methodology is simplified by sequentially studying the MTA on two mathematical models. The first model characterizes the functioning of the unit in these natural production conditions. For this model, a mathematical expression of the optimality criterion is compiled and the corresponding tractor power is determined, which can be realized with the greatest efficiency. Taking into account the features of the technological process in the specified conditions, the type and specific brand of the tractor are selected. The second model is characterized by the interaction of the tractor mover with the soil and the working bodies of the implement with the processed environment during the working stroke of the unit. This model, taking into account agrotechnical requirements, allows determining the values of capture width and speed, at which the specific net productivity (per unit of power) will be the highest or energy costs will be the lowest. The methodology was tested using the example of substantiating a plowing unit for the conditions of the Kabardino-Balkarian Republic. The proposed methodology allows developing recommendations for the effective use of units in specific working conditions in a visual and accessible form.

Keywords: operational development, zonal recommendations, efficiency of using MTA, optimization methodology, operational parameters of MTA

For citation. Balkarov R.A., Dzuganov V.B. Operational substantiation of zonal recommendations for the efficient use of machine-tractor units (MTU) in the conditions of the KBR. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2025;1(47):48–56. (In Russ.).
doi: 10.55196/2411-3492-2025-1-47-48-56

Введение. Одним из важнейших условий получения эффекта от применения новых тракторов с первых дней эксплуатации является оперативная разработка рекомендаций по их рациональному агрегатированию с учетом конкретных зональных условий работы. Основным препятствием на пути решения такой задачи остается отсутствие доступных для инженера методов оптимизации эксплуатационных параметров МТА. Известные в этой области методики [1–3] основаны на проведении большого объема специальных экспериментальных исследований и применении сложной вычислительной техники.

В статье предлагается достаточно простой метод решения задач агрегатирования с использованием только типовой нормативной и справочной информации. На основании этого метода можно оперативно разрабатывать соответствующие рекомендации еще до начала широкой производственной эксплуатации новых тракторов. На первом этапе исследование проводится на примере тяговых агрегатов, наиболее распространенных и сложных с точки зрения их комплектования.

Упрощение предлагаемой методики достигнуто путем последовательного исследования МТА на двух математических моделях.

Цель исследования – разработка методики оперативного обоснования рекомендаций по повышению эффективности использования машинно-тракторных агрегатов с учетом конкретных зональных условий работы.

Материалы, методы и объекты исследования. Работа проводилась с использованием методов исследования операций, поиска экстремума, теории вероятностей, динамики машинных агрегатов, включая МТА, также типовой нормативной и справочной информации. Объекты исследования – основные типы машинно-тракторных агрегатов для основной обработки почвы.

Результаты исследования. Первая модель характеризует функционирование агрегата в конкретных естественно-производственных условиях. Для этой модели составляем математическое выражение критерия оптимальности и определяем соответствующую мощность трактора, которая может быть реализована с наибольшей эффективностью. Далее, с учетом особенностей выполнения технологического процесса в заданных условиях, выбираем тип и конкретную марку трактора.

Вторая модель характеризует взаимодействие двигателя трактора с почвой и рабо-

чих органов орудия с обрабатываемой средой при рабочем ходе агрегата. Из этой модели с учетом агротехнических требований определяем такие значения ширины захвата и скорости, при которых удельная чистая производительность (в расчете на единицу мощности) будет наибольшей или энергозатраты – наименьшими. Апробацию методики проведем на примере обоснования пахотного агрегата для условий Кабардино-Балкарской Республики.

Одним из возможных критериев оптимальности в пределах первой модели служит максимум производительности агрегата [4–6], т. е:

$$W = \Pi\tau = \frac{h\Pi - a_{\Pi}\Pi^2}{1+k_c\Pi} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где

W и $\Pi = Vv$ – эксплуатационная и чистая производительность, м²/с;

τ – коэффициент использования времени смены;

B – ширина захвата агрегата, м;

v – скорость движения, м/с;

h, a_{Π}, k_c – коэффициенты, характеризующие конструктивные особенности и естественно-производственные условия работы агрегата [5, 7] (для пахотных агрегатов при длине гона 400–600 м, характерной для Кабардино-Балкарской Республики: $h = 0,98$; $a_{\Pi} = 0,007546$; $k_c = 0,03433$).

Согласно [7], производительность W_{ϕ} агрегата для местных условий равна произведению производительности W в типовых условиях на постоянный обобщенный поправочный коэффициент, т. е. $W_{\phi} = Wm_0$, поэтому вышеприведенные значения h, a_{Π}, k_c будут справедливы для любых условий вспашки при данной длине гона. Следовательно, в этом случае для условий $W \rightarrow \max$ или $W_{\phi} \rightarrow \max$ будет одно и то же оптимальное значение параметра Π , не зависящее от m_0 :

$$\Pi_{opt} = \frac{1}{k_c} \left(\sqrt{1 + \frac{hk_c}{a_{\Pi}}} - 1 \right). \quad (2)$$

Рассматриваемым условиям вспашки соответствует $\Pi_{opt} = 38,926$ м²/с. Аналогичным образом решается задача при любой другой длине гона. Потребную эффективную мощ-

ность двигателя для реализации Π_{opt} определяем из равенства:

$$N_{ow} = k_a \frac{\Pi_{opt}}{\eta_T}, \quad (3)$$

где

N_{ow} – потребная эффективная мощность двигателя, Вт;

k_a – удельное тяговое сопротивление агрегата, Н/м;

η_T – тяговый КПД трактора.

Точность исходной информации в пределах первой модели такова, что при расчетах для k_a и η_T принимаем постоянными средние их значения на каждой операции в заданных условиях. Например, для условий Кабардино-Балкарской Республики при среднем угле склона полей $\alpha = 2,005^\circ$, удельном сопротивлении плугов $k_o = 52$ кПа и глубине вспашки 0,22 м получим $k_a = 11,62$ кН/м. Среднее значение $\eta_T = 0,70$ для возможных типов тракторов приняли на основании справочных данных [8–10]. Указанным условиям из (3) соответствует потребная оптимальная мощность $N_{ow} = 646,171$ кВт. Если принять коэффициент использования мощности двигателя $k_N = 0,9$, то потребная номинальная мощность $N_{hw} = \frac{N_{ow}}{k_N} = 717,968$ кВт.

Для окончательного обоснования мощности и выбора конкретного трактора необходимо рассмотреть в качестве критерия также приведенные затраты $C_{\Pi} \rightarrow \min$. Это связано с тем, что, как будет показано в дальнейшем, агрегат, составленный только на основании $W \rightarrow \max$, отличается повышенным C_{Π} .

Один из элементов приведенных затрат – расход топлива на единицу наработки, определяемый из известного равенства:

$$\theta = \frac{G_p T_p}{T_{cm}} \left(1 + \frac{G_{xa} T_{xa} + G_{xd} T_{xd}}{G_p T_p} \right),$$

которое для удобства последующих расчетов представим в виде:

$$\frac{\theta W}{G_p} = \tau \left(1 + \frac{G_{xa} T_{xa} + G_{xd} T_{xd}}{G_p T_p} \right), \quad (4)$$

где

θ – расход топлива на единицу наработки, кг/м²;

G_p, G_{xa}, G_{xd} – соответственно расход топлива при рабочем и холостом ходе агрегата и холостом ходе двигателя, кг/с;

T_p, T_{xa}, T_{xd} – продолжительность работы на указанных режимах, с.

Поскольку с увеличением Π значение τ в соответствии с (1) уменьшается, а сумма в правой части (4) возрастает, то можно предположить, что соотношение (4) в пределах выбранной длины гона будет почти неизменным. Тогда:

$$\frac{\theta W_{cm}}{G_p T_{cm}} = \frac{\theta W}{G_p} = v_\theta \approx const. \quad (5)$$

Проверка по [7] показала, что отклонение от среднего значения не превышает 10% в пределах любой длины гона. Для рассматриваемого примера пахотных агрегатов $v_\theta = 0,82$. При известном v_θ , учитывая $G_p = N g_e$ (1) и (3), величину θ можно выразить в функции Π , т. е.:

$$\theta = G_p v_\theta / W = (\Pi k_a g_e v_\theta) / \eta_T W, \quad (6)$$

где

g_e – удельный расход топлива двигателем, кг/Дж.

Денежные затраты на топливо и смазочные материалы C_θ определяем, используя комплексную цену Π_{tc} топлива ($\Pi_{tc} = 61,341$ руб. за 1 кг), из равенства:

$$C_\theta = \theta \Pi_{tc} = \frac{\Pi k_a g_e v_\theta}{\eta_T W} \Pi_{tc}. \quad (7)$$

Балансовые цены трактора Π_T и машин Π_M при расчете приведенных затрат определяем из статистических зависимостей:

$$\Pi_T = \beta_T (p_T N_H + c_T), \quad (8)$$

$$\Pi_M = \beta_M (p_M \Pi_H + c_M), \quad (9)$$

где

Π_H – номинальное значение Π по технической характеристике машины, M^2/c ;

β_T, β_M – коэффициенты, учитывающие дополнительные затраты, связанные с доставкой и досборкой машин;

p_T, p_M, c_T, c_M – статистические коэффициенты.

Соотношение между Π_H и Π характеризуется коэффициентом использования номинальной чистой производительности $k_\Pi = \Pi / \Pi_H$. При наличии в агрегате сцепки ее балансовую цену Π_c целесообразно выразить в долях балансовой цены агрегируемых с ней машин $\Pi_c = e_c \cdot \Pi_M$. Значение e_c для различных типов агрегатов определя-

ем на основании статистических данных. Для современных тракторов и плугов имеем: $p_T = 0,0676$; $c_T = -394,540$; $p_M = 64$; $c_M = -12$; $k_\Pi = 0,90$; $e_c = 0$. Принимаем $\beta_T = \beta_M = 1,1$. Расходы на зарплату определяем с учетом числа n_T трактористов-машинистов и n_B вспомогательных рабочих на агрегате из равенства:

$$C_3 = \frac{(n_T e_T \mu_T + n_B e_B)}{W}, \quad (10)$$

где

e_T, e_B – тарифные ставки тракториста и вспомогательного рабочего, руб./с;

μ_T – коэффициент, учитывающий надбавку за классность и стаж работы.

Другие возможные надбавки к зарплате не поддаются предварительному учету и в каждом конкретном случае могут быть рассмотрены отдельно. Тарифный разряд работы зависит от класса трактора и соответствующей номинальной мощности N_H , поэтому приближенно можно принять $e_T = e_0 + \varepsilon_T N_H$, а n_B в общем случае определяем в виде линейной $n_B = a_B + d_B \Pi_H$. Тогда равенство (10) примет вид:

$$C_3 = \left[n_T \mu_T \left(e_0 + \varepsilon_T \frac{\Pi k_a}{k_N \eta_T} \right) + e_0 \left(a_B + d_B \frac{\Pi}{k_\Pi} \right) \right] W^{-1}. \quad (11)$$

Для рассматриваемого случая пахотных агрегатов получено: $n_T=1$; $n_B=0$; $\mu_T=1,18$; $e_0 = 0,213 \cdot 10^{-3}$; $\varepsilon_T = 0,329 \cdot 10^{-9}$.

В результате с учетом (1), (3), (7), (8), (9), (11) приведенные затраты как критерий оптимальности выражаем в функции параметра Π , т. е.:

$$C_\Pi = \frac{(A_c \Pi + B_c)}{W} \rightarrow \min, \quad (12)$$

где

$$A_c = \frac{\beta_T p_T k_a (a_T + E)}{k_N \eta_T T_T} + \frac{\beta_M p_M (a_M + E)}{k_\Pi T_M} + \frac{e_c \beta_M p_M (a_c + E)}{k_\Pi T_c} + \frac{n_T \varepsilon_T k_a \mu_T}{\eta_T k_N} + \frac{e_B d_B}{k_\Pi} + \frac{k_a g_e v_\theta \Pi_{tc}}{\eta_T};$$

$$B_c = \frac{\beta_T c_T k_a (a_T + E)}{T_T} + \frac{\beta_M c_M (a_M + E)}{T_M} + \frac{e_c \beta_M p_M (a_c + E)}{T_c} + n_T e_0 k_a \mu_T + e_B a_B,$$

a_T, a_M, a_C, a_B – суммарные нормы годовых отчислений на реновацию, ремонт, техническое обслуживание и хранение;

E – коэффициент эффективности капиталовложений ($E = 0,15$);

T_T, T_M, T_C – годовая нагрузка соответственно трактора, машин и сцепки, с.

Оптимальное значение параметра Π определяем из равенства:

$$\Pi_{оп} = \frac{1}{k_c \beta} \left(\sqrt{1 + \frac{h k_c}{a_{\Pi}} \beta} - 1 \right), \quad (13)$$

$$\beta = 1 + \frac{A_c}{B_c} \left(\frac{1}{k_c} + \frac{h}{a_{\Pi}} \right).$$

Полученная форма решения – общая и для других возможных технико-экономических критериев [5], а равенство (2) – частный случай при $\beta = 1$. Так как $C_{пф} = C_{\Pi} / m_0$,

то по аналогии с (2) также не зависит от m_0 . На основании ранее приведенных данных для пахотных агрегатов имеем: $A_c = 0,266 \cdot 10^{-3}$; $B_c = 0,198 \cdot 10^{-3}$, которым соответствует $\Pi_{оп} = 4,065 \text{ м}^2/\text{с}$ (при $N_{оп} = 67,479 \text{ кВт}$ и $N_{пп} = 74,976 \text{ кВт}$). Значения $\Pi_{оп}$ и $N_{оп}$ по минимуму прямых эксплуатационных затрат при необходимости можно получить в виде частного случая, если при вычислении A_c и B_c принять $E = 0$. Найденные по двум важнейшим в условиях сельскохозяйственного производства критериям $W \rightarrow \max$ и $C_{\Pi} \rightarrow \min$ оптимальные мощности N_w и $N_{пп}$ имеют почти десятикратное расхождение. Имеют различие и полученные при этом производительность и приведенные затраты. Так, для вспашки по критерию $W \rightarrow \max$ имеем: $W_{max} = 4,116 \text{ га/ч}$, $C_{пw} = 1478 \text{ руб. на 1 га}$, а при $C_{\Pi} \rightarrow \min$ соответственно $W_{\Pi} = 1,219 \text{ га/ч}$ и $C_{\Pi min} = 605,52 \text{ руб. на 1 га}$.

Специфические особенности сельскохозяйственного производства, особенно в условиях Кабардино-Балкарской Республики и всей Северо-Кавказской зоны, диктуют необходимость применения высокопроизводительных агрегатов, но затраты при этом не должны выходить за допустимые пределы. Результаты по обоим критериям не удовлетворяют указанному основному требованию, так как при $W \rightarrow \max$ слишком велики затраты, а при $C_{\Pi} \rightarrow \min$ получаем сравнительно малопродуктивные агрегаты. Эти отрицательные стороны оптимизации по од-

ному критерию можно существенно сгладить применением различных компромиссных решений, рассматриваемых в [11, 12].

Наиболее приемлемо следующее. Задаем производительностью $W_{\kappa} = v_w W_{max}$, которая меньше W_{max} на допустимую в данных условиях величину ($v_w < 1$). Затем определяем соответствующие значения $\Pi_{\kappa w}$ из (2) и $N_{\kappa w}$ из (3), при которых приведенные затраты $C_{п\kappa w}$ будут значительно меньше по сравнению с $C_{пw}$ при W_{max} . Аналогично можно задаться значением $C_{п\kappa} = v_{\Pi} C_{\Pi min}$, большим $C_{\Pi min}$, ($v_w < 1$), после чего и определить величины $\Pi_{\kappa \Pi}$ и $N_{\kappa \Pi}$ из (12) и (3), при которых производительность $W_{\kappa \Pi}$ будет намного выше W_{Π} . Так как (1) и (12) в области экстремума имеют пологий характер [5], то ценой сравнительно небольших отступлений от W_{max} и $C_{\Pi min}$, можно добиться значительных результатов. Например, для вспашки при $v_w = 0,95$ имеем: $\Pi_{\kappa w} = 26,861 \text{ м}^2/\text{с}$; $N_{\kappa w} = 445,892 \text{ кВт}$; $C_{п\kappa w} = 1084,32 \text{ руб. на 1 га}$. Следовательно, в результате компромиссного решения получим агрегат, у которого производительность всего на 5% меньше, чем W_{max} , а приведенные затраты при этом сократились на 26,67% по сравнению с $C_{пw} = 1478 \text{ руб. на 1 га}$. Если задаться пятипроцентным увеличением $C_{\Pi min}$ ($v_{\Pi} = 1,05$), то получим агрегат с параметрами $\Pi_{\kappa \Pi} = 7,333 \text{ м}^2/\text{с}$, $N_{\kappa \Pi} = 121,727 \text{ кВт}$ и производительностью $W_{\kappa \Pi} = 1,950 \text{ га/ч}$. Таким образом можно добиться повышения производительности у нового агрегата по сравнению с $W_{\Pi} = 1,219 \text{ га/ч}$ при $C_{\Pi min}$ на 59,95%.

Приведенные данные показывают, что на основании компромиссного решения удастся обосновать выбор более рациональных с производственной точки зрения агрегатов, обладающих высокой производительностью при приемлемом контролируемом уровне затрат. Значения v_w и v_{Π} при этом следует подбирать с учетом конкретных условий работы в каждой зоне. Аналогичные решения при необходимости могут быть выполнены на базе других возможных критериев оптимальности, рассмотренных в [5, 6]. Если в рассматриваемом примере выбор пахотных агрегатов осуществить по компромиссному решению при условии $1 \leq v_{\Pi} \leq 1,05$, то учитывая $N_{\kappa \Pi} = 121,727 \text{ кВт}$, для вспашки в Кабардино-

Балкарской Республике нужно рекомендовать трактор Т-150К с $N_H = 121,320$ кВт.

Во второй модели, как указывалось ранее, с учетом агротехнических требований определяем оптимальную ширину захвата и скорость движения агрегата, составленного на базе выбранного трактора по критерию:

$$W_N = \frac{\Pi}{N} = \frac{\Pi}{N_H k_N} \rightarrow \max, \quad (14)$$

где

W_N – удельная чистая производительность агрегата, $m^2/(с \cdot Вт)$.

На основании формул (3) и (14) можно написать:

$$W_N = \frac{\eta_T}{k_{av}} \rightarrow \max, \quad (15)$$

где

k_{av} – удельное сопротивление агрегата, учитывающее влияние скорости, Н/м.

Критерии (14) или (15) равносильны минимуму энергозатрат при рабочем ходе, т. е.

$$E_{\Pi} = \frac{N}{\Pi} = \frac{k_{av}}{\eta_T} \rightarrow \min.$$

В пределах точности рассматриваемого исследования для кг можно ограничиться линейной зависимостью $k_{av} = k + k_1 v$. Тогда (15) примет вид:

$$W_N = \frac{\eta_T}{k + k_1(1 - \delta)v_T} \rightarrow \max. \quad (16)$$

Максимум тягового КПД ($\eta_T \rightarrow \max$), как следует из (16), представляет собой частный случай критерия $W_N \rightarrow \max$ при $k_1 = 0$ и $k_a = \text{const}$. Буксование δ и η_T на основании [4] определяем из равенств:

$$\delta = \frac{a\varphi}{b\varphi_m - \varphi} = \frac{a(\Pi_T k_N \eta_T - \psi)}{\lambda b\varphi_m + \psi - \Pi_T k_N \eta_T}; \quad (17)$$

$$\eta_T = \eta_M(1 - \delta) \left(\frac{\psi}{\Pi_T k_N \eta_M} \right). \quad (18)$$

где

a, b – эмпирические коэффициенты;

$\varphi = P_{кр} f G \lambda$;

φ_m – коэффициент использования сцепного веса трактора и его максимальное значение;

$P_{кр}, G$ – тяговое усилие и эксплуатационный вес трактора, Н;

λ – доля G , воспринимаемая ведущими колесами;

η_M, f – КПД трансмиссии и коэффициент сопротивления качению;

$$\psi = f \cos \alpha \pm \sin \alpha, \Pi_T = \frac{N_H}{G v_T};$$

v_T – теоретическая скорость, м/с.

Подставив значения δ и η_T в (16), определим:

$$v_{T \text{ opt}} = c + \sqrt{c^2 - d}, \quad (19)$$

где

$$c = \frac{\psi + \Theta_{\varepsilon_K} (1+a) k_N \eta_M}{\varepsilon_K [\lambda b \varphi_m + \psi (1+a)] + \frac{\psi (\lambda b \varphi_m + \psi)}{\Theta k_N \eta_M}};$$

$$d = \left(2 + \frac{1}{a} \right) \psi - \lambda b \varphi_m - \psi + \Theta \varepsilon_K a k_N \eta_M \left(1 + \frac{1}{a} \right)^2 \times$$

$$\times \left\{ \frac{\varepsilon_K [\lambda b \varphi_m + \psi (1+a)]^2}{\Theta \varepsilon_K a k_N \eta_M} + \frac{\psi (\lambda b \varphi_m + \psi) [\lambda b \varphi_m + \psi (1+a)]}{\Theta^2 a k_N^2 \eta_M^2} \right\}^{-1}$$

$$\Theta = \frac{N_H}{G}; \quad \varepsilon_K = \frac{k_1}{k}.$$

По $v_{T \text{ opt}}$ определяем $\Pi_{T \text{ opt}} = \frac{N_H}{G v_{T \text{ opt}}}$, соответствующее буксование δ_0 из (17) и оптимальную рабочую скорость агрегата $v_{opt} = v_{T \text{ opt}} (1 - \delta_0)$. При исследованиях по критерию (16) с учетом (19) могут быть рассчитаны оптимальные сочетания скорости и энергонасыщенности ($\Theta_M = \frac{N_H}{M}$) в расчете на единицу массы M трактора. Оптимальную ширину захвата агрегата определяем по известным $v_{opt} = v_{T \text{ opt}}$ из равенства:

$$B_{opt} = \frac{(N_H k_N \eta_M) - G \psi}{k + k_1 v_{opt}}. \quad (20)$$

Если при v_{opt} , $v_{T \text{ opt}}$ и B_{opt} буксование δ_0 превышает агротехнические пределы, то необходимо, задаваясь допустимым значением $\delta = \delta_0$, определить из (17) допустимую скорость:

$$v_{Td} = \frac{\Theta \eta_M k_N (\delta_d + a)}{\delta_d (\lambda b \varphi_m + \psi) + a \psi}. \quad (21)$$

После этого при $v_d = v_{Td} (1 - \delta_d)$ рассчитываем соответствующую ширину захвата по формуле (20). Покажем численное решение второй модели на примере ранее рассмот-

ренного пахотного агрегата с трактором Т-150К. В соответствии с условиями работы определены: $\lambda = 0,99$; $\psi = 0,12$; $k = 9057,87$; $k_1 = 1830,40$; $\Theta = 1,59$; $\eta_m = 0,88$. Коэффициенты $a = 0,134$, $b = 1,265$, $\varphi_m = 0,67$ для тракторов с колесной формулой 4Х4 на стерне рассчитаны с помощью обобщенных кривых буксования [13] по (17). Критерию $W_N \rightarrow \max$ из (19) соответствует оптимальная теоретическая скорость $v_{t\ opt} = 2,04$ м/с и буксование $\delta_0 = 0,186$. Полученное δ_0 превышает допустимый предел $\delta_d = 0,15$, поэтому оптимальный режим работы агрегата при $v_{t\ opt}$ не может быть реализован. В связи с этим определяем рациональный режим работы, при котором имеем наибольшее возможное значение функции (16) при ограничениях $\delta = \delta_d$.

Из формулы (21) при $\delta = \delta_d = 0,15$ определяем $v_{dt} = 2,20$ м/с и выбираем ближайшую передачу трактора Т-150К при условии $v_{tr} \geq v_{dt}$. Этому условию соответствует первая передача при $v_{tr} = 2,36$ м/с. Подста-

вив v_{tr} в формулу (17), определим $\delta = 0,123$, а затем $v = (1 - \delta) v_{tr} = 2,07$ м/с. Рациональную ширину захвата ($B_p = 2,40$ м) определяем из (20) с учетом v_{tr} и v . Этой ширине захвата соответствует плуг ПЛП-6-35.

Фактический коэффициент использования номинальной мощности двигателя $k_N = 0,80$ определяем из формулы (21). Следовательно, при рассмотренных условиях компромиссного решения наиболее эффективным пахотным агрегатом для Кабардино-Балкарской Республики будет Т-150К + ПЛП-6-35, работающий на первой передаче со скоростью 2,07 м/с. При этом приведенные затраты не превышают минимальные более чем на 5%.

Вывод. На основе проведенного исследования можно утверждать, что предлагаемая методика позволяет в наглядной и доступной форме разрабатывать рекомендации по эффективному использованию агрегатов в конкретных условиях работы.

Список литературы

1. Методические указания о порядке разработки, согласования и утверждения исходных требований на сельскохозяйственную технику. Москва: ВИМ, 1988. 160 с. EDN: VJBMQZ
2. Скороходов А. Н., Дидманидзе Р. Н. Методы повышения надежности и эффективности работы технологических комплексов: учеб. пособие для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Агроинженерия». Москва: УМЦ «Триада», 2015. 126 с. ISBN 978-5-9546-0104-6
3. Моделирование и оптимизация технологических процессов в растениеводстве: практикум. Ч. 2 / А. Н. Скороходов, А. Г. Левшин, В. П. Уваров [и др.]. Москва: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2013. 145 с. EDN: CRXEFB
4. Зангиев А. А. К вопросу оптимизации параметров МТА по производительности // Тр. МИИСП, 1975. Т. 12. Ч. 1. Вып. 2. С. 112–118.
5. Зангиев А. А., Лышко Г. П., Скороходов А. Н. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка. Москва: Колос, 1996. 320 с. ISBN 5-10-002861-0
6. Скороходов А. Н., Левшин А. Г. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка. Москва: БИБИКОМ; ТРАНСЛОГ, 2017. 478 с. ISBN 978-5-905563-66-9. EDN: WWONWA
7. Типовые нормы выработки и расхода топлива на сельскохозяйственные механизированные работы от 01.01.2006. Ч. I и II [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/420270203?section=text> (дата обращения 05.02.2024)
8. Иофинов С. А., Бабенко Э. Л., Зуев Ю. А. Справочник по эксплуатации машинно-тракторного парка. Москва: Агропромиздат, 1985. 272 с.
9. Сергеева З. В., Химченко Г. Т. Справочник нормировщика. Москва: Россельхозиздат, 1983. 367 с.
10. Справочник по скоростной сельскохозяйственной технике / А. Я. Поляк, А. Д. Щупак, Н. М. Антышев [и др.]. Москва: Колос, 1983. 287 с.
11. Завалишин Ф. С. Основы расчета механизированных процессов в растениеводстве. Москва: Колос, 1973. 319 с.
12. Нормы и нормативы для планирования механизации и электрификации в отраслях АПК / Под ред. А. И. Иевлева. Москва: Агропромиздат, 1988. 590 с.
13. Колобов Г. Г., Парфенов А. П. Тяговые характеристики тракторов. Москва: Машиностроение, 1972. 153 с.

References

1. *Metodicheskie ukazaniya o porjadke razrabotki, soglasovaniya i utverzhdeniya ishodnyh trebovanij na sel'skhozajstvennuju tehniku* [Guidelines on the procedure for developing, coordinating and approving initial requirements for agricultural machinery]. Moscow: VIM, 1988. 160 p. (In Russ.). EDN: VJBMQZ
2. Skorokhodov A.N., Didmanidze R.N. *Metody povysheniya nadezhnosti i jeffektivnosti raboty tehnologicheskikh kompleksov: ucheb. posobie dlja bakalavrov i magistrów, obuchajushhihsja po napravleniju "Agroinzhenerija"* [Methods of increasing the reliability and efficiency of technological complexes: a textbook for bachelors and masters studying in the field of "Agroengineering"]. Moscow: UMC "Triada", 2015. 126 p. ISBN 978-5-9546-0104-6. (In Russ.)
3. Skorokhodov A.N., Levshin A.G., Uvarov V.P. [et al.]. *Modelirovanie i optimizacija tehnologicheskikh processov v rastenievodstve: praktikum. Chast' 2* [Modeling and optimization of technological processes in crop production: workshop. Pt 2.]. Moscow: RGAU-MSHA im. K.A. Timirjazeva, 2013. 145 p. (In Russ.). EDN: CRXEFB
4. Zangiev A.A. K voprosu optimizacii parametrov mashinno-traktornyh agregatov. *Tr. MIISP*. 1975; 12(2, Pt 1):112–118. (In Russ.)
5. Zangiev A.A., Lyshko G.P., Skorokhodov A.N. *Proizvodstvennaja jekspluatacija mashinno-traktornogo parka* [Industrial operation of the machine and tractor fleet]. Moscow: Kolos, 1996. 320 p. ISBN 5-10-002861-0. (In Russ.)
6. Skorokhodov A.N., Levshin A.G. *Proizvodstvennaja jekspluatacija mashinno-traktornogo parka* [Industrial operation of the machine and tractor fleet]. Moscow: BIBIKOM; TRANSLOG, 2017. 478 p. ISBN 978-5-905563-66-9. (In Russ.). EDN: WWONWA
7. *Tipovye normy vyrabotki i rashoda topliva na sel'skhozajstvennye mehanizirovannye raboty ot 01.01.2006. Ch. I i II* [Standard standards for production and fuel consumption for agricultural mechanized work from 01.01.2006. Pt I and II] [Electronic resource] URL: <https://docs.cntd.ru/document/420270203?section=text> (date of access 05.02.2024). (In Russ.)
8. Iofinov S.A., Babenko E.L., Zuev Yu.A. *Spravochnik po jekspluatacii mashinno-traktornogo parka* [Handbook of operation of machinery and tractor fleet]. Moscow: Agropromizdat, 1985. 272 p. (In Russ.)
9. Sergeeva Z.V., Khimchenko G.T. *Spravochnik normirovshhika* [Standard Setter's Handbook]. Moscow: Rossel'hozizdat, 1983. 367 p. (In Russ.)
10. Polyak A.Ya., Shchupak A.D., Antyshev N.M. [et al.]. *Spravochnik po skorostnoj sel'skhozajstvennoj tehnike* [Handbook of high-speed agricultural machinery]. Moscow: Kolos, 1983. 287 p. (In Russ.)
11. Zavalishin F.S. *Osnovy rascheta mehanizirovannyh processov v rastenievodstve* [Fundamentals of Calculating Mechanized Processes in Plant Growing]. Moscow: Kolos, 1973. 319 p. (In Russ.)
12. *Normy i normativy dlja planirovaniya mehanizacii i jelektrifikacii v otrasljah APK. Pod red. A.I. Ievleva* [Norms and standards for planning mechanization and electrification in the agro-industrial complex sectors. Ed. A.I. Ievlev]. Moscow: Agropromizdat, 1988. 590 p. (In Russ.)
13. Kolobov G.G., Parfenov A.P. *Tjagovye harakteristiki traktorov* [Traction characteristics of tractors]. Moscow: Mashinostroenie, 1972. 153 p. (In Russ.)

Сведения об авторах

Балкаров Руслан Асланбиевич – доктор технических наук, профессор кафедры агроинженерии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 1074-2232, Scopus ID: 6505576211, Researcher ID: AAB-3748-2020

Дзуганов Вячеслав Барасбиевич – доктор технических наук, профессор кафедры агроинженерии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 3358-4604, Scopus ID: 57219486929

Information about the authors

Ruslan A. Balkarov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agricultural Engineering, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 1074-2232, Scopus ID: 6505576211, Researcher ID: AAB-3748-2020

Vyacheslav B. Dzuganov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agricultural Engineering, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 3358-4604, Scopus ID: 57219486929

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 07.02.2025;
одобрена после рецензирования 24.02.2025;
принята к публикации 04.03.2025.*

*The article was submitted 07.02.2025;
approved after reviewing 24.02.2025;
accepted for publication 04.03.2025.*