

Научная статья

УДК 631.3.02

doi: 10.55196/2411-3492-2024-4-46-105-112

Системный подход к решению проблемы ресурсосберегающего использования машинно-тракторных агрегатов (МТА)

Руслан Асланбиевич Балкаргов^{✉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 рассматривается общая научная концепция комплексного решения проблемы ресурсосберегающего использования МТА с позиций системного подхода. Поставленные задачи решаются на целом ряде взаимосвязанных уровней ресурсосбережения (оптимизации) от выбора технологии возделывания сельскохозяйственных культур до частных режимов функционирования отдельных агрегатов, обеспечивающих максимальную экономию всех ресурсов, включая топливно-энергетические. Проблема в целом заключается в наиболее полном использовании потенциальных возможностей каждого агрегата с учетом условий его функционирования. Необходимо, чтобы состав каждого агрегата (энергомашина, число рабочих машин с учетом вместимости технологических емкостей) и режимы его работы (рабочий и холостой ходы, разгон и торможение) были оптимальными и обеспечивали минимальный расход всех используемых ресурсов. Такое комплексное решение проблемы повышения эффективности использования МТА возможно лишь на базе многоуровневого системного подхода, как при создании агрегатов, так и при их производственной эксплуатации. Задачи ресурсосбережения на каждом уровне формулируются таким образом, чтобы выходные результаты предшествующих уровней служили входной информацией нижних уровней иерархической лестницы. При этом происходит сложение эффектов ресурсосбережения всех уровней. Наибольший эффект будет получен при реализации всех взаимосвязанных уровней оптимизации. Однако с учетом различных производственных ситуаций можно решать частные задачи ресурсосбережения на ограниченном числе уровней. С учетом агротехнических и других ограничений предусмотрена также возможность корректировки на любом нижнем уровне результатов оптимизации, полученных на верхних уровнях. Практическое применение предлагаемого комплексного подхода позволяет повысить показатели ресурсосбережения сельскохозяйственных агрегатов, как на стадии разработки, так и в производственной эксплуатации.

Ключевые слова: системный подход, ресурсосбережение (оптимизация), критерия оптимальности, эффективность использования МТА, типы агрегатов

Для цитирования. Балкаргов Р. А., Дзуганов В. Б. Системный подход к решению проблемы ресурсосберегающего использования машинно-тракторных агрегатов (МТА) // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2024. № 4(46). С. 105–112.

doi: 10.55196/2411-3492-2024-4-46-105-112

Original article

Systemic Approach to Solving the Problem of Resource-saving Use of Machine and Tractor Unit (MTU)

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 considers the general scientific concept of a comprehensive solution to the problem of resource-saving use of MTU from the standpoint of a systems approach. The tasks set are solved at a number of interconnected levels of resource saving (optimization) from the choice of crop cultivation technology to private modes of operation of individual units that ensure maximum savings of all resources, including fuel and energy. The problem as a whole is the most complete use of the potential of each unit, taking into account the conditions of its operation. It is necessary that the composition of each unit (power machine, number of working machines taking into account the capacity of process tanks) and its operating modes, working and idle runs, acceleration and braking were optimal and ensured the minimum consumption of all used resources. Such a comprehensive solution to the problem of increasing the efficiency of MTU use is possible only on the basis of a multi-level systems approach, both in the creation of units and in their industrial operation. Resource-saving tasks at each level are formulated in such a way that the output results of the preceding levels serve as input information for the lower levels of the hierarchical ladder. In this case, the resource-saving effects of all levels are added up. The greatest effect will be obtained by implementing all interconnected optimization levels. However, given various production situations, it is possible to solve specific resource-saving tasks at a limited number of levels. Given agrotechnical and other limitations, it is also possible to adjust the optimization results obtained at the upper levels at any lower level. The practical application of the proposed integrated approach allows for increasing the resource-saving indicators of agricultural units, both at the development stage and in production operation.

Keywords: system approach, resource saving (optimization), optimality criteria, efficiency of MTU use, types of units

For citation. Balkarov R.A., Dzuganov V.B. Systemic Approach to Solving the Problem of Resource-saving Use of Machine and Tractor Unit (MTU). *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2024;4(46):105–112. (In Russ.). doi: 10.55196/2411-3492-2024-4-46-105-112

Введение. Проблема в целом заключается в наиболее полном использовании потенциальных возможностей каждого агрегата с учетом условий его функционирования. Необходимо, чтобы состав каждого агрегата (энергомашин, число рабочих машин с учетом вместимости технологических емкостей) и режимы его работы (рабочий и холостой ходы, разгон и торможение) были оптимальными и обеспечивали минимальный расход всех используемых ресурсов [1].

Такое комплексное решение проблемы повышения эффективности использования МТА возможно лишь на базе многоуровневого системного подхода, как при создании агрегатов, так и при их производственной эксплуатации [2].

Значительная часть различных видов ресурсов (материальных, финансовых, трудовых, топливно-энергетических и др.), используемых в сельском хозяйстве, расходуется при работе МТА. В связи с этим разработка общих концепций ресурсосберегающего использования МТА имеет актуальное значение.

Задачи ресурсосбережения на каждом уровне формулируются таким образом, чтобы

выходные результаты предшествующих уровней служили входной информацией нижних уровней иерархической лестницы (схема передачи информации показана стрелками между уровнями). При этом происходит сложение эффектов ресурсосбережения всех уровней. Наибольший эффект будет получен при реализации всех взаимосвязанных уровней оптимизации. Однако с учетом различных производственных ситуаций можно решать частные задачи ресурсосбережения на ограниченном числе уровней. С учетом агротехнических и других ограничений предусмотрена также возможность корректировки на любом нижнем уровне результатов оптимизации, полученных на верхних уровнях.

Цель исследования – повышение эффективности использования машинно-тракторных агрегатов на базе многоуровневого системного подхода по взаимосвязанным критериям ресурсосбережения.

Материалы, методы и объекты исследования. Работа проводилась с использованием методов исследования операций, поиска экстремума, теории вероятностей, динамики машинных агрегатов, включая МТА.

Объекты исследования – основные типы машинно-тракторных агрегатов для основной и предпосевной обработки почвы, посева и уборки зерновых культур.

Результаты исследования. *Первый уровень* соответствует выбору ресурсоэкономных технологий возделывания основных сельскохозяйственных культур с учетом зональных условий (для краткости исследование проводится на примере одной культуры). На данном этапе оптимизации при неизвестных составах агрегатов могут быть выбраны лишь ресурсосберегающие принципы воздействия на обрабатываемые материалы.

Возможным для реализации критерием ресурсосбережения при этом будет минимум суммы удельных (в расчете на единицу планируемого урожая) технологических энергозатрат по возделыванию данной культуры:

$$\sum_{i=1}^{n_0} E_{Ti} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где:

E_{Ti} – удельные технологические энергозатраты на i -й операции, Дж/кг;

n_0 – число операций по данному варианту технологии.

Максимум урожайности u как критерий оптимальности не всегда отвечает требованиям ресурсосбережения, и поэтому рассматривается в качестве вспомогательного.

Удельные технологические энергозатраты для тягово-приводных агрегатов при ширине захвата B_i и рабочей скорости $v_i = S_{pi} / t_{pi}$ (S_{pi} – рабочий ход; t_{pi} – время) определяют так:

$$E_{Ti} = \frac{B_i k_{Mi} S_{pi}}{B_i S_{pi} u} + a_{Ni} \frac{B_i v_i u t_{pi}}{B_i S_{pi} u} = \frac{1}{u} (k_{Mi} + a_{Ni} u t_{pi}), \quad (2)$$

где:

k_{mi} – удельное тяговое сопротивление рабочих органов, Н/м;

u – планируемая урожайность данной культуры, кг/м²;

a_{Ni} – удельная мощность на ВОМ, Вт/(кг/с);

u_T – норма сбора (распределения) соответствующего технологического материала, кг/м².

После выбора энергосберегающей технологии по критерию (1) на следующих ниж-

них уровнях решаются задачи экономии ресурсов по каждой отдельной операции путем оптимизации состава и основных режимов работы соответствующих агрегатов.

Второй уровень предусматривает обоснование по экономическим критериям обобщенного параметра для каждого отдельного агрегата, выполняющего соответствующую технологическую операцию. В зависимости от зональных условий в качестве экономического критерия может быть выбран минимум приведенных затрат, прямых эксплуатационных, интегральных, трудовых и других затрат в расчете на единицу урожая или объема работы.

Выбранный критерий ресурсосбережения в общем случае примет вид:

$$C_{oi} \rightarrow \min \quad (3)$$

Установлено, что затраты C_{oi} для любого типа агрегата являются функцией одного обобщенного параметра, представляющего собой требуемую мощность N_{ni} для реализации данного технологического процесса [1–4]. Затраты (3) в связи с этим целесообразно представить как функцию мощности:

$$C_{oi} = f_{ci}(N_{ni}) \rightarrow \min. \quad (4)$$

При необходимости критерий (4) может быть выражен также в функции соответствующей пропускной способности (проектной производительности) Π_{ni} (кг/с или м²/с и т. д.), т. е.

$$C_{oi} = f'_{ci}(\Pi_{ni}) \rightarrow \min. \quad (5)$$

Соотношение между равноценными обобщенными параметрами N_{ni} и Π_{ni} устанавливается из баланса мощности:

$$N_{ni} = p_{Ni} \Pi_{ni}, \quad (6)$$

где:

p_{Ni} – удельная мощность, Вт/(кг/с) или Вт/(м²/с).

Входящая в состав C_{oi} эксплуатационная производительность агрегата также является функцией обобщенного параметра N_{ni} или Π_{ni} , т. е.

$$W_i = f_{\omega i}(N_{ni}), \quad W_i = f'_{\omega i}(\Pi_{ni}), \quad (7)$$

Максимум производительности агрегата W_i как критерий оптимальности не отвечает требованиям ресурсосбережения, поскольку при этом затраты C_{oi} слишком велики. По-

этому W_i рассматривается в качестве вспомогательного. Более эффективным с практической точки зрения может оказаться компромиссное решение выражений (4)–(7), когда за счет небольшой уступки по затратам можно получить существенный прирост производительности [3].

Третий уровень предусматривает обоснование ресурсосберегающего типоразмерного ряда мощностей энергомашин $N_{н1\ opt}, N_{н2\ opt}, \dots, N_{нr\ opt}$ на этапе их разработки. Для зерноуборочных комбайнов может определяться типоразмерный ряд пропускных способностей. Комплексным критерием ресурсосбережения при этом может служить минимум суммы всех затрат, связанных с разработкой, испытаниями, постановкой на производство и эксплуатацией всех типоразмеров энергомашин:

$$C_{\Sigma oi} \rightarrow \min. \quad (8)$$

Ввиду большой сложности общего решения задачи практические расчеты чаще сводятся к обоснованию оптимальных мощностей энергомашин для отдельных групп операций по минимуму суммы каких-либо затрат, т. е. $C_{\Sigma i} \rightarrow \min$.

Последующие уровни ресурсосбережения связаны с конкретизацией состава и режимов работы каждого агрегата на базе выбранной мощности N_{ni} энергомашины по соответствующим частным критериям оптимальности.

Четвертый уровень предусматривает обоснование энерго-сберегающего режима рабочего хода агрегата. Основным критерий при этом соответствует минимуму удельных энергозатрат при рабочем ходе агрегата (Дж/м или Дж/кг):

$$E_{ni} \rightarrow \min. \quad (9)$$

Для мобильных агрегатов E_{ni} соответствует минимуму расхода топлива на единицу выполненной работы при рабочем ходе (кг/м², кг/кг) и выражается в функции ширины захвата B_i и рабочей скорости v_i с учетом допустимой степени ε_{Ni} использования мощности N_{ni} в заданных условиях, т. е.

$$E_{ni} = N_{ni} \varepsilon_{Ni} / (B_i v_i) \rightarrow \min, \quad (10)$$

где:

$$B_i = f_i(N_{ni}, m_{\varepsilon i}, v_i);$$

$m_{\varepsilon i}$ – масса энергомашины.

В качестве вспомогательного критерия ресурсосбережения на данном уровне целе-

сообразно использовать также минимум удельного материалоперемещения (кг·м/м²) при рабочем ходе МТА на пути S_{pi} :

$$\begin{aligned} p_{ni} &= \left[\frac{S_{pi}}{B_i v_i} \right] (m_{\varepsilon i} + m_{Ci} + m_{M\Sigma i}) = \\ &= \left(\frac{1}{B_i} \right) (m_{\varepsilon i} + m_{Ci} + m_{M\Sigma i}) \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (11)$$

где:

$m_{Ci}, m_{M\Sigma i}$ – масса i -й сцепки и i -х рабочих машин, кг.

Критерий (11) в обобщенном виде учитывает уплотняющее воздействие МТА на почву, а также материалоемкость операции. На основании выражений (10) и (11) в общем случае можно обосновать оптимальные значения $m_{\varepsilon i\ opt}, \varepsilon_{i\ opt} = N_{ni} / m_{\varepsilon i\ opt}$, а также $B_{i\ opt}, v_{i\ opt}$ с учетом влияния скорости на силы сопротивления и нелинейного характера изменения m_{Ci} и $m_{M\Sigma i}$ в функции B_i . Для транспортных агрегатов в уравнениях (9)–(11) вместо B_i и $m_{M\Sigma i}$ следует подставлять массу перевозимого груза Q_{ri} и массу прицепов; для транспортно-технологических агрегатов в этих уравнениях следует учитывать взаимосвязанные значения B_i и Q_{ri} [3]; для стационарных агрегатов в выражение (10) вместо $B_i v_i$ следует подставлять секундную подачу обрабатываемого материала в функции соответствующих параметров рабочих органов.

Пятый уровень связан с оптимизацией вместимости технологических емкостей мобильных агрегатов по минимуму удельных энергозатрат (Дж/м²) за время $T_{ци}$ полного технологического цикла на пути L_{Ti} :

$$E_{ци} = \frac{N_{ni} \varepsilon_{Nци} T_{ци}}{B_i L_{Ti}} \rightarrow \min, \quad (12)$$

где:

$\varepsilon_{Nци}$ – средневзвешенное значение степени использования мощности.

Более удобным критерием является максимум цикловой производительности (м²/с):

$$W_{ци} = B_i L_{Ti} / T_{ци} \rightarrow \max.$$

Выразив $B_i, L_{Ti}, T_{ци}$ в функции удельной вместимости технологической емкости q_i в расчете на 1 м ширины захвата (м³/м), определим соответствующее оптимальное значение $q_{i\ opt}$, а также полную вместимость $Q_{i\ opt} = B_i q_{i\ opt}$. Если на агрегате расположено несколько емкостей (для семян, удобре-

ний), то $q_{i\ opt}$ и $Q_{i\ opt}$ относятся к емкости, условно принятой за основную, а вместимости других рассчитываются через пропорциональные соотношения между нормами сбора (распределения) технологических материалов [3].

Шестой уровень предусматривает оптимизацию режима холостого хода мобильных агрегатов по минимуму расхода топлива (кг/га):

$$\theta_{xi} \rightarrow \min. \quad (13)$$

Под θ_{xi} подразумевается также расход топлива при остановке агрегата с работающим двигателем. В качестве вспомогательного критерия можно принять минимум соответствующих потерь времени смены T_{xi} . Для уборочных агрегатов возможна минимизация потерь урожая или его фракций на прокосах [4, 5]. Минимум холостого пути S_{xi} не учитывает указанных выше особенностей и в меньшей мере отвечает требованиям ресурсосбережения.

Последующие уровни оптимизации связаны с улучшением показателей ресурсосбережения агрегатов с учетом их динамических свойств.

Седьмой уровень связан с оптимизацией режимов разгона агрегата из состояния покоя до скорости $v_{i\ opt}$. Для агрегата, составленного на базе энергомашины с фрикционной муфтой сцепления, в начальный период разгона критерий ресурсосбережения соответствует минимуму работы сил трения за время t_m буксования муфты сцепления [4]:

$$E_{pi} = \int_0^{t_m} M_{Ti}(\omega_i + \omega_{Bi})dt \rightarrow \min, \quad (14)$$

где:

ω_i, ω_{Bi} – частота вращения ведущего и ведомого валов, c^{-1} .

Основным результатом оптимизации будут законы изменения момента сил трения $M_{Ti\ opt(t)}$ и передаточного числа трансмиссии $i_{T\ opt(t)}$. На участке разгона при $t \times t_m$ оптимизируется закон изменения передаточного отношения трансмиссии по минимуму соответствующего расхода топлива G_{pi} .

В качестве вспомогательного критерия может быть использован минимум времени разгона. Задачи рассматриваемого типа успешно решаются на основе принципа максимума [6, 7].

Восьмой уровень предусматривает оптимизацию режима загрузки двигателя при ра-

бочем ходе агрегата с учетом его динамических свойств и изменчивости внешних факторов. Основным критерий ресурсосбережения на этом уровне – минимум удельного расхода топлива на единицу выполненной работы (кг/м², кг/кг):

$$\theta_{di} \rightarrow \min. \quad (15)$$

Наибольший эффект ресурсосбережения достигается при автоматическом регулировании скоростного $v_{i\ opt(t)}$ и $P_{ni\ opt(t)}$ нагрузочного режимов работы агрегата. В качестве вспомогательного критерия может быть выбран максимум производительности при рабочем ходе агрегата (м²/с, кг/с) W_{di} , что соответствует максимальному быстрдействию агрегата как динамической системы. Основными выходными результатами оптимизации являются $P_{ni\ opt(t)}$, $v_{i\ opt(t)}$, $\varepsilon_{Ni\ opt(t)}$. Кроме того, могут быть оптимизированы приведенные массы и моменты инерции, а также другие динамические параметры агрегата и отдельных звеньев [8, 9].

Девятый уровень связан с оптимизацией режима торможения агрегатов по минимуму работы тормозной силы P_{Ti} за время t_T торможения:

$$\Sigma E_{pi} = \int_0^{t_T} P_{Ti}v_i dt \rightarrow \min. \quad (16)$$

Вспомогательными критериями могут быть $t_T \rightarrow \min$ и минимум тормозного пути с учетом соответствующих ограничений. На выходе получаем оптимальные законы управления тормозной силой $P_{Ti\ opt(t)}$ и скоростью $v_{Ti\ opt(t)}$ [4].

Сопряженные задачи данного уровня связаны с устойчивостью и управляемостью в период t_T , автоматизацией режима торможения, уточнением ранее полученных результатов, улучшением условий безопасности и др.

Десятый уровень заключается в оптимизации динамического режима поворота агрегатов по минимуму расхода топлива за время $t_{\pi i}$:

$$\theta_{\pi i} \rightarrow \min. \quad (17)$$

Вспомогательные критерии соответствуют минимуму времени $t_{\pi i}$ и пути $l_{\pi i}$ поворота с учетом ограничений. Результаты решения соответствуют оптимальному управлению

рулевым механизмом $V_{pi\ opt(t)}$ и оптимальной траекторией $S_{ai\ opt(t)}$ центра агрегата.

Одиннадцатый уровень предусматривает определение основных показателей работы составленных выше ресурсосберегающих агрегатов с учетом условий работы Φ_{ω_i} , Φ_{c_i} , Φ_{θ_i} производительности $W_{c_i} = f_i(\Phi_{\omega_i})$; соответствующих затрат $C_{0\Sigma i\ min} = f_i''(\Phi_{\theta_i})$; расхода топлива (энергии) на всех режимах работы $\theta_{\Sigma i\ min} = f_i''(\Phi_{\theta_i})$ и др.

Двенадцатый уровень предусматривает оптимизацию количественных соотношений между разнотипными агрегатами в составе технологических комплексов при выполнении сложных сельскохозяйственных работ (уборочных). Основным критерием ресурсосбережения при этом целесообразно выбрать минимум суммы потерь от простоев всех участвующих в процессе агрегатов из-за взаимного ожидания при техническом обслуживании (ТО) (руб.):

$$C_{np\Sigma i} \rightarrow \min. \quad (18)$$

Возможным вспомогательным критерием является минимум потерь времени $T_{np i}$ из-за ожидания всеми агрегатами или какой-то основной группы. На выходе получим оптимальное число $n_{ai\ opt}$ агрегатов каждого типа.

Последующие задачи ресурсосбережения связаны с оптимизацией состава МТА и системы его ТО, которые имеют самостоятельное значение и в данном случае могут быть намечены только схематически для комплексности подхода,

Тринадцатый уровень включает в обобщенной форме оптимизацию состава МТП по минимуму каких-либо затрат, например, приведенных для выполнения всего комплекса работ:

$$C_{n\Sigma} \rightarrow \min. \quad (19)$$

Возможным вспомогательным критерием является минимум энергомашин каждого типа n_z , выбранных на верхних уровнях. На выходе получим оптимальное число энергомашин каждого типа $n_{z1\ opt}$, $n_{z2\ opt}$, ..., $n_{zm\ opt}$ с соответствующим шлейфом сельскохозяйственных машин.

Выводы. 1. Предложен многоуровневый системный подход к оптимизации состава и режимов работы машинно-тракторных агрегатов, при котором обеспечивается комплексное решение проблемы минимизации расхода всех основных видов ресурсов, необходимых для их эффективного функционирования.

2. На базе такого подхода для всех основных типов агрегатов (полевых, тракторных, транспортных, транспортно-технологических) на пяти взаимосвязанных по соответствующим критериям ресурсосбережения получены общие методы оптимизации: обобщенного параметра; состава и скоростного режима; вместимости технологических ёмкостей; режимов разгона и торможения; показателей холостого хода.

3. Установлено, что все типы агрегатов на первом этапе их выбора по экономическим критериям (в целом без конкретизации состава и скоростного режима) характеризуются одним обобщенным параметром, представляющим собой секундную чистую производительность (м/с, кг/с, кг·м/с) или потребную для её реализации пропускную способность, или соответствующую мощность. При этом оптимальное значение обобщенного параметра по всем экономическим критериям (минимум приведенных затрат, минимум прямых эксплуатационных затрат, минимум трудозатрат, минимум металлоёмкости) определяется аналитическим решением по одной общей формуле.

4. Предложено также обобщенное решение для получения компромиссного обобщенного параметра, обеспечивающего желаемое сочетание высокой производительности и соответствующих затрат. При прочих равных условиях оптимальные и компромиссные значения обобщенного параметра увеличиваются с возрастанием длины гона.

5. Разработан общий метод оптимизации обобщенного параметра по экономическим критериям для взаимосвязанных агрегатов, входящих в состав технологических комплексов. Выявлено, что при поточной работе различных агрегатов обобщенным параметром всей технологической линии служит её производительность, по оптимальному значению которой определяются частные обобщенные

параметры для отдельных агрегатов в виде мощности или пропускной способности.

6. Оптимальную рабочую скорость и состав агрегата, комплектуемого на базе выбранной энергомашины, предложено опре-

делять по минимуму удельных энергозатрат ($\text{Дж}/\text{м}^2$, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{м}$) при рабочем ходе МТА с учетом влияния скорости на тяговое сопротивление рабочих машин.

Список литературы

1. Апажев А. К., Шекихачев Ю. А. Оптимизация функционирования сельскохозяйственных производственных систем // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2022. № 1(35). С. 81–89. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-1-35-81-89. EDN: AMXFOK
2. Батыров В. И., Дзуганов В. Б., Апхудов Т. М. Совершенствование методики классификационной характеристики эксплуатационных условий автомобилей // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2022. № 3(37). С. 112–121. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-3-37-112-121. EDN: BOJKWC
3. Зангиев А. А. Оперативное обоснование зональных рекомендаций по эффективному использованию МТА // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1980. № 11. С. 10–14.
4. Зангиев А. А. Выбор оптимальных масс и скоростей МТА с учетом уплотняющего воздействия на почву // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1999. № 5. С. 11–13.
5. Зангиев А. А. Повышение производительности зерноуборочных комбайнов // Техника в сельском хозяйстве. 2003. № 5. С. 13–17.
6. Зангиев А. А. Оптимизация массы и скорости машинно-тракторных агрегатов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1998. № 5. С. 8–10.
7. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. Москва: Физматгиз, 1961. 391 с.
8. Лурье А. Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. Москва: Колос, 1981. 382 с.
9. Вентцель Е. С. Исследование операций. Москва: Советское радио, 1972. 552 с.

References

1. Apazhev A.K., Shekikhachev Y.A. Optimization of the functioning of agricultural production systems. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2022;1(35):81–89. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2022-1-35-81-89. EDN: AMXFOK
2. Batyrov V.I., Dzukanov V.B., Apkhudov T.M. Improvement of the methodology for the classification characteristics of the operating conditions of vehicles. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2022;3(37):112–121. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2022-3-37-112-121. EDN: BOJKWC
3. Zangiev A.A. Operational justification of zonal recommendations for the efficient use of MTA. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva.* 1980;(11):10–14. (In Russ.)
4. Zangiev A.A. Selection of optimal masses and speeds of MTA taking into account the compaction effect on the soil. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva.* 1999;(5):11–13. (In Russ.)
5. Zangiev A.A. Increasing the productivity of grain harvesting combines. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve.* 2003;(5):13–17. (In Russ.)
6. Zangiev A.A. Optimization of mass and speed of machine-tractor units. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva.* 1998;(5):8–10. (In Russ.)
7. Pontryagin L.S., Boltyanskij V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow: Fizmatgiz, 1961. 391 p. (In Russ.)
8. Lurye A.B. *Statisticheskaya dinamika sel'skokhozyaystvennykh agregatov* [Statistical dynamics of agricultural units]. Moscow: Kolos, 1981. 382 p. (In Russ.)
9. Ventzel E.S. *Issledovaniye operatsiy* [Operations Research]. Moscow: Sovetskoye radio, 1972. 552 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. Dzukanov – 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 19.11.2024;
одобрена после рецензирования 05.12.2024;
принята к публикации 12.12.2024.*

*The article was submitted 19.11.2024;
approved after reviewing 05.12.2024;
accepted for publication 12.12.2024.*