

Унифицированная модель расчетов производительности технических средств при реализации транспортных и транспортно-технологических операций

Олеся Сергеевна Воротникова¹,
аспирант, e-mail: vorotnikova003@mail.ru;
Николай Александрович Майстренко¹,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: nmaustr@mail.ru;

Александр Григорьевич Левшин²,
доктор технических наук,
профессор,
e-mail: alev200151@rambler.ru

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация;

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Производительность – один из важных эксплуатационных показателей транспортных и транспортно-технологических средств. Подтвердили необходимость унифицировать расчеты этого показателя на фоне обширной номенклатуры сельскохозяйственных грузов и большого количества работ по их перемещению. (*Цель исследования*) Разработать универсальные взаимосвязанные этапы определения эксплуатационной производительности транспортных и транспортно-технологических средств при реализации механизированных работ в растениеводстве. (*Материалы и методы*) Определили значения эксплуатационной производительности посредством анализа нормообразующих факторов и статистической обработки. Использовали системный подход к определению отдельных элементов цикла транспортировки грузов. Изучили каждый из методических подходов и применяемые математические аппараты для определения производительности технических средств различных типов. (*Результаты и обсуждение*) После поэтапного моделирования реализации транспортных и транспортно-технологических процессов получили унифицированную формулу целевой функции (критерия оптимальности). В результате реализации более удобного алгоритма расчета и преобразования математического аппарата вычислили значения норм выработки для транспортных средств при транспортировке минеральных удобрений к месту их внесения. (*Выводы*) Провели детальное математическое описание этапов реализации транспортного и транспортно-технологического процесса. Определили функциональные зависимости между эксплуатационными параметрами и производственными и агроландшафтными условиями. Разработали универсальный алгоритм, для расчета значения эксплуатационной производительности транспортных и транспортно-технологических средств. Определили значения коэффициента, позволяющего унифицировать и сопоставить алгоритм вычисления норм выработки на транспортные и транспортно-технологические работы. Выявили, что с увеличением длины транспортировки от 3 до 54 километров этот коэффициент повышается 3,8 раза. Данное варьирование объяснили ростом чисто транспортной фазы выполнения процесса. **Ключевые слова:** транспортно-технологический процесс, единичный цикл работ, производительность сельхозтехники, норма выработки, унификация расчета эксплуатационной производительности, математическая модель, алгоритм.

Для цитирования: Воротникова О.С., Майстренко Н.А., Левшин А.Г. Унифицированная модель расчетов производительности технических средств при реализации транспортных и транспортно-технологических операций // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №2. С. 75-80. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-2-75-80.

Unified Model for Calculating Technical Facilities Productivity for Transportation and Transportation-Technological Operations

Olesya S. Vorotnikova¹,
graduate student, e-mail: vorotnikova003@mail.ru;
Nikolay A. Maystrenko¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: nmaustr@mail.ru;

Aleksandr G. Levshin²,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: alev200151@rambler.ru

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation;

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Productivity is one of the important performance indicators of transport and transport-technological vehicles. The authors confirmed the necessity to unify this indicator calculations for an extensive range of agricultural goods and extensive works on their movement. (*Research purpose*) To develop universal interconnected stages of detecting the operational productivity of transport and transport-technological vehicles when performing mechanized work in crop production. (*Materials and methods*) The values of operational performance were determined based on the analysis of norm-forming factors and statistical processing. A systematic approach was used to identifying individual elements of the cargo transportation cycle. The authors studied each of the methodological approaches and the mathematical tools used to calculate the performance indicators of various technical devices. (*Results and discussion*) After a step-by-step modeling of transport and transport-technological processes, a unified formula of the target function (optimality criterion) was obtained. Having implemented a more convenient calculation algorithm and having transformed the mathematical apparatus, the authors obtained the vehicle production rates for the transportation of mineral fertilizers to the place of their application. (*Conclusions*) The authors implemented a detailed mathematical description of the transport and transport-technological process stages. They identified the functional relationships between operational parameters and production and agrolandscape conditions. A universal algorithm was developed making it possible to determine the values of the operational performance for transport and transport-technological vehicles. The authors determined the values of the coefficient enabling the unification and comparison of the algorithm for identifying the production rates for transport and transport-technological work. It was found out that with an increase in the length of transportation from 3 to 54 kilometers, this coefficient increases 3.8 times. This variation was explained by an increase in the purely transport phase of the process.

Keywords: transport and technological process, unit cycle of work, agricultural machinery productivity, production rate, unification of operational productivity calculation, mathematical model, algorithm.

For citation: Vorotnikova O.S., Maystrenko N.A., Levshin A.G. Unifitsirovannaya model' raschetov proizvoditel'nosti tekhnicheskikh sredstv pri realizatsii transportnykh i transportno-tekhnologicheskikh operatsiy [Unified model for calculating technical facilities productivity for transportation and transportation-technological operations]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N2. 75-80 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-2-75-80.

В сельскохозяйственном производстве при перевозке грузов принято выделять транспортные и транспортно-технологические процессы с соответствующими методами нормирования работ. Особенность процессов заключается в последовательном выполнении цикловых операций, обеспечивающих перевозку технологического материала к пункту назначения – напрямую или с предварительным сбором (последующим распределением) его на поле [1].

Реализация технологического процесса возделывания сельскохозяйственных культур требует использование современных, перспективных технических средств механизации отдельных этапов производственного цикла [2].

На сегодняшний день наблюдаются модернизация сельскохозяйственных машин, а также формирование концепций к новым видам техники для агропромышленного комплекса страны, и, как следствие, конструирование с последующими элементами выпуска в производство [3-5].

Наряду с этим ведутся исследования в области изменения источников энергии, силовых установок, например по созданию трактора с электродвигателем [6].

Для эксплуатации технических средств, при реализации механизированных работ, связанных с производством продукции растениеводства, отвечающей критериям оптимальности, требуется математическое моделирование производственных процессов с учетом системного подхода. Для этой цели необходи-

мы точные численные значения эксплуатационных параметров транспортных и транспортно-технологических агрегатов, для их определения и проводят эксплуатационно-технологическую оценку, что несет дополнительные временные и материальные затраты.

Цель исследования – разработать универсальные взаимосвязанные этапы определения эксплуатационной производительности транспортных (ТС) и транспортно-технологических средств (ТТС) при реализации механизированных работ в растениеводстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Использовали системный подход к методике оптимизации [7-9]. В соответствии с принципом унификации расчетов путем исключения переводных коэффициентов разных размерностей выражения для определения производительности энергетических средств уместно представить в виде:

$$W_{ТС} = Q \cdot V_{Г} \cdot \tau / L_{Г};$$

$$W_{ТТС} = Q \cdot V_{Г} \cdot \tau \cdot \mu / L_{Г},$$

где $W_{ТС}$ – производительность транспортного средства, т/ч;

$W_{ТТС}$ – производительность транспортно-технологического средства, т/ч;

Q – грузоподъемность, т;

$V_{Г}$ – скорость движения по дороге с грузом, км/ч;

τ – коэффициент использования рабочего времени смены;



L_{Γ} – расстояние транспортировки груза или технологического материала, км;

μ – коэффициент, позволяющий скорректировать «чистую транспортную» производительность с учетом дополнительной фазы работы – «чистой работы на поле»:

$$\mu = \left(1 + \frac{\xi_v \cdot \omega}{L_{\Gamma} \cdot U} \right)^{-1},$$

где ξ_v – отношение скоростей движения с грузом и без груза;

ω – обобщающий технологический показатель, кг/м;

U – доза внесения удобрений, кг/м².

Взаимосвязь производительности транспортно-технологического процесса с чисто транспортным, выраженной через корректирующий коэффициент, выглядит следующим образом:

$$W_{\text{ТТС}} = W_{\text{ТС}} \cdot \mu.$$

При отсутствии полевой фазы в работе транспортно-технологического средства $\mu = 1$. Следовательно, технологическое средство выполняет функционал только транспортного средства, что дает основу для определения унифицированной (для данных видов энергетических средств) формулы:

$$W = Q \cdot V_{\Gamma} \cdot \tau \cdot \mu / L_{\Gamma}. \quad (1)$$

В ходе изучения оптимизации выполнения механизированных работ в качестве критерия обычно выбирают обобщенный параметр – мощность двигателя энергетического средства [7-9]. При этом определяют оптимальные значения этого показателя, которые соответствуют конкретным сочетаниям производственных и агроландшафтных условий. Однако транспортный и транспортно-технологический процесс всегда обусловлен сочетанием величин Q и V_{Γ} , от которых зависит энергетическая характеристика транспорта, а именно мощность силовой установки. Априори эти величины влияют на этапы проектирования транспортных средств. В то же время совокупное сочетание производственных и агроландшафтных условий имеет широкий спектр, поэтому оптимальных ТС и ТТС в различных условиях не существует [10, 11].

Для определения оптимальной мощности и параметров мобильного энергетического средства необходимо установить характер влияния величин Q и V_{Γ} . Причем невозможно определить влияние каждой из них, так как они взаимосвязаны как элементы мощностного баланса. Мы предлагаем выразить их произведение из баланса мощности, с учетом движения автомобиля или трактора по дороге в виде:

$$Q \cdot V_{\Gamma} = \frac{N \cdot \xi_N}{g \cdot f \cdot (1 + \delta_e + \delta_n + \delta_q) / (\eta_m \cdot \eta_{\sigma})}, \quad (2)$$

где N – мощность двигателя энергетического средства, кВт;

ξ_N – коэффициент использования мощности;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

f – коэффициент сопротивления перемещению (в том числе на подъем);

$\delta_e, \delta_n, \delta_q$ – отношение массы, соответственно, энергомашины M_e , прицепа M_n и груза в дополнительном прицепе Q_n к номинальной грузоподъемности Q основной емкости (кузова);

η_m и η_{σ} – коэффициенты, учитывающие потери мощности в трансмиссии и на буксование колес.

В уравнение (2) мы внесли изменения. Так как ТТС не агрегируют с дополнительными прицепами, то при расчете приняли:

$$\delta_n = 0; \delta_q = 0.$$

Это относится и к ТС с установленным на шасси автомобиля кузовом или к тракторному полуприцепу при реализации внутри- и межхозяйственных грузоперевозок, когда тракторный и автомобильный транспорт формируют с несколькими прицепами [12].

Знаменатель в формуле (2) характеризует удельные, на единицу грузоперемещений, энергозатраты. Для однотипных средств разной мощности получим:

$$P_N = g \cdot f \cdot (1 + \delta_e + \delta_n + \delta_q) / \eta_m \cdot \eta_{\sigma} \cdot \xi_N, \quad (3)$$

где P_N – удельные на единицу грузоперемещений энергозатраты, Н/кг.

С учетом (2) и (3) формула (1) преобразована в виде:

$$W = \frac{N \cdot \mu}{P_N \cdot L_{\Gamma}} \cdot \tau.$$

Это выражение позволяет определить производительность как транспортных, так и транспортно-технологических агрегатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Проиллюстрируем расчетные этапы определения численных показателей эксплуатационной производительности по унифицированному алгоритму для ТС и ТТС при реализации механизированных работ, связанных с транспортировкой сельскохозяйственных грузов, технологического материала, а также на собирательных и распределительных процессах (рисунки).

Для реализации предложенного алгоритма расчета эксплуатационной производительности необходимы исходные данные, характеризующие производственный процесс. С этой целью мы обратились к примеру товаропроизводителей сельскохозяйственной продукции агрозоны 1.1 Центрального федерального округа [13]. Изучили используемые средства механизации внесения минеральных удобрений при $L_{\Gamma} = 9$ км и $U = 0,06$ кг/м².

Указанные аспекты математической модели позволяют определить формулу эксплуатационной производительности в функции характеристик внешних условий выполнения процесса и мощности технического средства. С учетом поправочного коэффициента

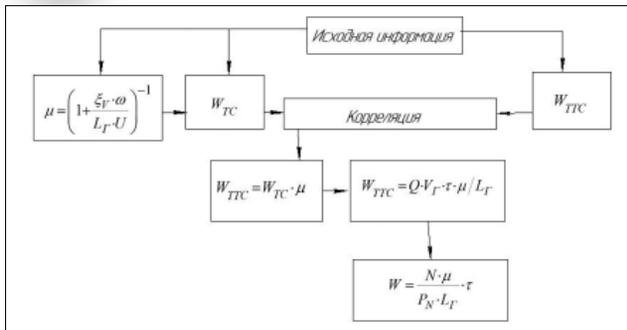


Рис. Унифицированный алгоритм определения производительностей

Fig. The unified algorithm for measuring performance indicators

$K_{Об}$ на местные условия получим:

$$W = \frac{N \cdot \mu}{P_N \cdot L_T} (h - dN) \cdot K_{Об}$$

где $K_{Об}$ – поправочный коэффициент;

h – коэффициент, характеризующий потери времени смены, зависящий от мощности двигателя;

d – коэффициент, характеризующий потери времени смены, не зависящий от мощности двигателя.

Следует отметить перспективность данной методики. Используя формулу производительности в качестве целевой функции (критерия $W \rightarrow max$), методом дифференцирования можно вывести выражение для определения оптимальной мощности N_w .

В результате реализации более удобного алгоритма расчета и преобразования математического аппарата получили значения норм выработки для транспортных средств при транспортировке минеральных удобрений к месту их внесения.

Автомобиль Урал-432065 с самосвальной установкой. Коэффициент использования времени смены:

$$\tau = h - dN;$$

$$\tau = 0,63 - 0,0028 \cdot 140 = 0,24.$$

С учетом значения τ рассчитываем эксплуатационную производительность:

$$W = (3,6 \cdot 140 \cdot 1 \cdot 0,24 \cdot 0,9) / (1,21 \cdot 9) = 9,1 \text{ т/ч.}$$

Трактор МТЗ-82.1 с прицепом 2ПТС-6. Коэффициент использования времени смены:

$$\tau = 0,54 - 0,0029 \cdot 57 = 0,37.$$

Эксплуатационная производительность равна:

$$W = (3,6 \cdot 57 \cdot 1 \cdot 0,37 \cdot 0,9) / (1,21 \cdot 9) = 6,3 \text{ т/ч.}$$

Определим эксплуатационную производительность для транспортно-технологических средств при внесении минеральных удобрений по прямоточной

технологии.

Автомобиль Урал-432065 с разбрасывателем Amazone. Коэффициент использования времени составляет:

$$\tau = 0,71 - 0,0014 \cdot 140 = 0,52.$$

С учетом полученного значения определим эксплуатационную производительность:

$$W = (3,6 \cdot 140 \cdot 0,256 \cdot 0,52 \cdot 0,9) / (1,27 \cdot 9) = 5,5 \text{ т/ч.}$$

Трактор МТЗ-82.1 с разбрасывателем РУМ-6. Вычислим коэффициент использования времени смены:

$$\tau = 0,62 - 0,0022 \cdot 57 = 0,49,$$

а затем эксплуатационную производительность:

$$W = (3,6 \cdot 57 \cdot 0,418 \cdot 0,49 \cdot 0,9) / (1,33 \cdot 9) = 3,9 \text{ т/ч.}$$

Для новых или проектируемых средств, при отсутствии их эксплуатационно-технологической оценки, норму выработки можно с достаточной достоверностью определять методами экстра- и интерполяции или аппроксимации по их расчетной производительности [14].

Достаточную достоверность подтверждает сопоставление расчетных значений эксплуатационных показателей со справочными данными (нормативными материалами машинно-технологических станций, протоколами испытаний машиноиспытательных станций). Например, согласно нормативам, при выполнении тракторно-транспортных работ, а именно доставки минеральных удобрений (I класс грузов) к хранилищам, эксплуатационная производительность составляет 5,84 т/ч, а полученное теоретическое значение равно 6,3 т/ч. Расхождение 4,2% приемлемо для инженерных расчетов [15-18].

Выводы. Провели детальное математическое описание этапов реализации транспортного и транспортно-технологического процесса. Определили функциональные зависимости между эксплуатационными параметрами и производственными и агроландшафтными условиями. Разработали универсальный алгоритм, для расчета значения эксплуатационной производительности транспортных и транспортно-технологических средств. Определили значения коэффициента, позволяющего унифицировать и сопоставить алгоритм вычисления норм выработки на транспортные и транспортно-технологические работы. С увеличением длины транспортировки от 3 км до 54 км этот коэффициент повышается 3,8 раза. Данное варьирование объясняется ростом чисто транспортной фазы выполнения процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Майстренко Н.А., Уваров В.П., Левшин А.Г., Хорт Д.О., Воротникова О.С. Унификация расчетов производительности транспортных и транспортно-технологических средств // *Инженерные технологии и системы.* 2020. №1. С. 637-658.
2. Шкель А.С., Козловская М.А., Дзоценидзе Т.Д. Эксплуатационные требования к сменной технологической надстройке для транспортировки и внутрипочвенного внесения жидких органических удобрений СТА-5ЖО на базе



шасси грузового автомобиля Урал-432065 // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. №6. С. 12-16.

3. Шкель А.С., Козловская М.А., Дзюцендизе Т.Д. Исследование технологии внесения жидких органических удобрений транспортно-технологическим агрегатом сельскохозяйственного назначения // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. №7. С. 47-51.

4. Шкель А.С., Козловская М.А., Дзюцендизе Т.Д. Технология внесения твердых минеральных удобрений транспортно-технологическим агрегатом СТА-5ТМ в составе специализированного автомобильного шасси Урал-432065 // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. №9. С. 44-48.

5. Прядкин В.И., Шапиро В.Я., Годжаев З.А., Гончаренко С.В. Транспортно-технологические средства на шинах сверхнизкого давления: Монография. Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова. 2019. 492 с.

6. Бижаев А.В. Исследование параметров трактора с электроприводным силовым агрегатом // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №4. С. 33-42.

7. Майстренко Н.А., Уваров В.П. Потребительские ориентиры эффективного использования перспективных транспортно-технологических средств // *Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2016. №1. С. 44-50.

8. Левшин А.Г., Уваров В.П., Майстренко Н.А. Транспортно-технологический агрегат с использованием шасси грузового автомобиля Урал-432065 и модель оптимизации его параметров // *Технология колесных и гусеничных машин*. 2014. №1. С. 25-34.

9. Уваров В.П., Левшин А.Г., Майстренко Н.А. Оптимальное соотношение основных механизированных работ при прямом внесении удобрений // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. Т. 10. №4. С. 38 с.

10. Загарин Д.А., Козловская М.А., Дзюцендизе Т.Д., Шкель А.С. Предложения по созданию многоцелевых гру-

зовых автомобилей нового поколения // *Журнал автомобильных инженеров*. 2016. №2(97). С. 18-25.

11. Драй А.А., Майстренко Н.А., Балабанов В.И. Результаты оптимизации уборочно-транспортного комплекса по уборке хлопка в условиях Сирийской Арабской Республики // *Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2018. №1(83). С. 48-51.

12. Дзюцендизе Т.Д., Галкин С.Н., Левшин А.Г. и др. Специализированный автомобильный транспорт сельскохозяйственного назначения: Монография. М.: Ника, Металлургия. 2013. 368 с.

13. Лачуга Ю.Ф., Горбачев И.В., Ежевский А.А. и др. Система машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства на период до 2020 года. Т. I. Растениеводство. М.: ВИМ. 2012. 457 с.

14. Левшин А.Г., Ерохин М.Н. Научно-методические основы формирования нормированной шкалы твердости почвы // *Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2017. №6(82). С. 28-34.

15. Yeung D.W.K., Petrosyan L.A. Subgame consistent cooperative solutions in stochastic differential games. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2004. Vol. 120. Iss. 3. 651-666.

16. Khodakarami M., Mitchell K.N., Wang X.B. Modeling Maintenance Project Selection on a Multimodal Transportation Network. *Journal of the Transportation Research Record Board*. 2014. Vol. 2409. Issue 1. 1-8.

17. Malladi K.T., Sowlati T. Optimization of operational level transportation planning in forestry: a review. *International Journal of Forest Engineering*. 2017. Vol. 28. Iss. 3. 198-210.

18. MacKinnon R.D., Barber G.M. Optimization Models of Transportation Network Improvement. *Progress in Human Geography*. 1977. Vol. 1. Iss. 3. 387-412.

REFERENCES

1. Maystrenko N.A. Uvarov V.P., Levshin A.G., Khort D.O., Vorotnikova O.S. Unifikatsiya raschetov proizvoditel'nosti transportnykh i transportno-tekhnologicheskikh sredstv [Unification of calculating the performance of vehicles and transport-technological facilities]. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy*. 2020. №1. 637-658 (In Russian).

2. Shkel' A.S., Kozlovskaya M.A., Dzotsenidze T.D. Eksploatatsionnye trebovaniya k smennoy tekhnologicheskoy nadstroyke dlya transportirovki i vnutripochvennogo vneseniya zhidkikh organicheskikh udobreniy STA-5ZHO na baze shassi грузового avtomobilya Ural-432065 [Operational requirements to STA-5ZHO replaceable technological superstructure for transportation and subsoil application of liquid organic fertilizers based on Ural-432065 vehicle chassis]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. №6. 12-16 (In Russian).

3. Shkel' A.S., Kozlovskaya M.A., Dzotsenidze T.D. Issledovanie tekhnologii vneseniya zhidkikh organicheskikh udobreniy

transportno-tekhnologicheskim agregatom sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Study of technology of liquid organic fertilizers application of by a transport-technological unit for agricultural purposes]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. №7. 47-51 (In Russian).

4. Shkel' A.S., Kozlovskaya M.A., Dzotsenidze T.D. Tekhnologiya vneseniya tverdykh mineral'nykh udobreniy transportno-tekhnologicheskim agregatom STA-5ТМ v sostave spetsializirovannogo avtomobil'nogo shassi Ural-432065 [Technology of solid mineral fertilizers application by means of STA-5ТМ transport-technological unit as part of specialized Ural-432065 vehicle chassis]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. №9. 44-48 (In Russian).

5. Pryadkin V.I., Shapiro V.Ya., Godzhaev Z.A., Goncharenko S.V. Transportno-tekhnologicheskie sredstva na shinakh sverkhznizkogo davleniya: Monografiya [Transport and technological vehicles on ultra-low pressure tires: Monograph]. Vo-

ronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskiy universitet im. G.F. Morozova. 2019. 492 (In Russian).

6. Bizhaev A.V. Issledovanie parametrov traktora s elektropivodnym silovym agregatom [Research of tractor power unit with electric drive parameters]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N4. 33-42 (In Russian).

7. Maystrenko N.A., Uvarov V.P. Potrebitel'skie orientiry effektivnogo ispol'zovaniya perspektivnykh transportno-tekhnologicheskikh sredstv [Consumer targets of efficient use of advanced transport-and-technological vehicles]. *Vestnik FGOU VPO «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina»*. 2016. N1. 44-50 (In Russian).

8. Levshin A.G., Uvarov V.P., Maystrenko N.A. Transportno-tekhnologicheskyy agregat s ispol'zovaniem shassi gruzovogo avtomobilya Ural-432065 i model' optimizatsii ego parametrov [Transportation technological device with an application of chassis of truck ural-432065, and a model of its parameter optimization]. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin*. 2014. N1. 25-34 (In Russian).

9. Uvarov V.P., Levshin A.G., Maystrenko N.A. Optimal'noe sootnoshenie osnovnykh mekhanizirovannykh rabot pri pryamotokhnom vnesenii udobreniy [Optimum ratio of main mechanized operations for direct-flow fertilizers introduction]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2016. Vol. 10. N4. 38 (In Russian).

10. Zagarin D.A., Kozlovskaya M.A., Dzotsenidze T.D., Shkel' A.S. Predlozheniya po sozdaniyu mnogotselevykh gruzovykh avtomobiley novogo pokoleniya [Proposals for development of new generation multipurpose vehicles]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*. 2016. N2(97). 18-25 (In Russian).

11. Dray A.A., Maystrenko N.A., Balabanov V.I. Rezul'taty optimizatsii uborochno-transportnogo kompleksa po uborke khlopka v usloviyakh Siriyskoy Arabskoy Respubliki [Optimization results for a cotton harvesting and transport system designed for us in the Syrian Arab Republic]. *Vestnik FGOU VPO*

«Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina». 2018. N1(83). 48-51 (In Russian).

12. Dzotsenidze T.D., Galkin S.N., Levshin A.G. et al. Specializirovanny avtomobil'nyy transport sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Specialized agricultural vehicles]. Monografiya. Moscow: Nika. Metallurgizdat. 2013. 368 (In Russian).

13. Lachuga Yu.F., Gorbachev I.V., Ezhevskiy A.A. et al. Sistema mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii i avtomatizatsii sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na period do 2020 goda [System of machines and technologies for complex mechanization and automation of agricultural production for the period until 2020]. Vol. I. Rasteniyevodstvo. Moscow: VIM. 2012. 457 (In Russian).

14. Levshin A.G., Erokhin M.N. Nauchno-metodicheskie osnovy formirovaniya normirovannoy shkaly tverdosti pochvy [Scientific and methodical grounds to make normalized scale of soil hardness]. *Vestnik FGOU VPO «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina»*. 2017. N6(82). 28-34 (In Russian).

15. Yeung D.W.K., Petrosyan L.A. Subgame consistent cooperative solutions in stochastic differential games. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2004. Vol. 120. Iss. 3. 651-666 (In English).

16. Khodakarami M., Mitchell K.N., Wang X.B. Modeling Maintenance Project Selection on a Multimodal Transportation Network. *Journal of the Transportation Research Record Board*. 2014. Vol. 2409. Iss. 1. 1-8 (In English).

17. Malladi K.T., Sowlati T. Optimization of operational level transportation planning in forestry: a review. *International Journal of Forest Engineering*. 2017. Vol. 28. Iss. 3. 198-210 (In English).

18. MacKinnon R.D., Barber G.M. Optimization Models of Transportation Network Improvement. *Progress in Human Geography*. 1977. Vol. 1. Iss. 3. 387-412 (In English).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 09.12.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 09.12.2020

Статья принята к публикации 09.03.2021
The paper was accepted
for publication on 09.03.2021