

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 629.463.64:004.93

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202004.637-658

Оригинальная статья



Унификация расчетов производительности транспортных и транспортно-технологических средств

Н. А. Майстренко¹, В. П. Уваров¹, А. Г. Левшин¹,
Д. О. Хорт^{2*}, О. С. Воротникова¹

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
(г. Москва, Российская Федерация)

²ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр
ВИМ» (г. Москва, Российская Федерация)

*dmitriyhort@mail.ru

Введение. Транспортный процесс – это изменение места положения материалов. При этом, если перемещение груза между пунктами осуществляется напрямую, исключая технологические (полевые) операции, данный процесс можно рассматривать как чисто транспортный в виде частного случая транспортно-производственного процесса. В связи с этим предлагается этот процесс считать компонентом транспортно-технологического процесса, что в свою очередь требует корректирования применяемых методов нормирования работ. Целью исследования является разработка математической модели и алгоритма, позволяющих привести к единообразию расчет производительности разных видов, типов транспортных и транспортно-технологических средств на основании формулирования зависимости составляющих производительности от мощности средства как их основного классификатора.

Материалы и методы. Определение норм выработки осуществлялось методами экстраполяции, интерполяции или аппроксимации по их расчетной производительности. Наряду с этим для определения экстремумов использовался классический метод дифференцирования функций.

Результаты исследования. При длине транспортировки удобрений по прямоточной технологии $L_r = 9$ км и дозе внесения $U = 0,06$ кг/м² получены следующие значения производительности (выработки) технических средств: а) для транспортных средств при доставке удобрений в хранилище автомобилем Урал-432065 (кузов) $W = 9,1$ т/ч, $W = 6,3$ т/ч для трактора с прицепом МТЗ-82.1+2ПТС-6; б) для транспортно-технологических средств при транспортировании и распределении удобрений автомобилем Урал-432065 (разбрасыватель Amazone) $W = 5,5$ т/ч, $W = 3,9$ т/ч для трактора с разбрасывателем МТЗ-82.1+РУМ-6.

Обсуждение и заключение. На основании анализа методов обоснована необходимость унификации, расчета нормированных объемов работ, выбора состава, сравнения эффективности использования мобильных средств в случае их функционирования в качестве как транспортного, так и транспортно-технологического назначения. В основе

© Майстренко Н. А., Уваров В. П., Левшин А. Г., Хорт Д. О., Воротникова О. С., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

способа определения норм выработки лежит вывод зависимости вне- и внутрицикловых составляющих баланса времени смены от мощности двигателя мобильного средства. Иллюстрируется блок-схема алгоритма расчета эксплуатационных показателей мобильных средств. Реализация алгоритма приводится на примере использования специализированного автомобиля на транспортных и транспортно-технологических операциях.

Ключевые слова: единичный цикл работ, вне- и внутрицикловые элементы времени смены, производительность, норма выработки, унификация, математическая модель, алгоритм, блок-схема

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Унификация расчетов производительности транспортных и транспортно-технологических средств / Н. А. Майстренко, В. П. Уваров, А. Г. Левшин [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.637-658](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.637-658) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 637–658.

Original article

Unification of Calculating the Performance of Vehicles and Transport-Technological Facilities

N. A. Maistrenko^a, V. P. Uvarov^a, A. G. Levshin^a,
D. O. Khort^{b*}, O. S. Vorotnikova^a

^aRussian Timiryazev State Agrarian University
(Moscow, Russian Federation)

^bFederal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russian Federation)

*dmitriyhort@mail.ru

Introduction. In agricultural production during transportation of goods it is accepted to allocate transport and transport-technological processes with the corresponding methods of rationing works. The peculiarity of the processes is the sequential execution of cyclic operations, providing transportation of technological material to the destination directly or with preliminary collection (subsequent distribution) on the field. At the same time, if the goods are moved directly between points, excluding technological (field) operations, this process can be considered a purely transport one, a special case of the transport and technological process. In this regard, it is proposed to consider this process as a component of the transport and technological process, which in turn requires correcting the applied methods for setting performance standards. The aim of the study is to develop a mathematical model and algorithm for standardizing the calculation of the performance of different vehicles and transport and technological facilities through formulating the dependence of the performance components on the power of the said facilities as their main classifier.

Materials and Methods. The performance standards were identified by the extrapolation, interpolation or approximation methods based on their estimated performance. The classical method of differentiating functions was used to find the extrema.

Results. At length of fertilizer transportation by direct-flow technology $L_T = 9$ km and application dose $U = 0.06$ kg/m², the following values of transport and technological facilities performance have been obtained: a) for vehicles to deliver fertilizers to fertilizer storehouses by Ural-432065 truck (body) $W = 9.1$ t/h, $W = 6.3$ t/h for tractor with MTZ-82 trailer. 1+2PTS-6; b) for transport and technological facilities to transport and distribute fertilizers by Ural-432065 (Amazone spreader) $W = 5.5$ t/h, $W = 3.9$ t/h for tractor with MTZ-82.1+RUM-6 trailer.

Discussion and Conclusion. Based on the analysis of methods, the authors have made the case for the unification of calculating the standardized volumes of works, choice of composition, and comparison of the effectiveness of using vehicles, if they are used as transport and transport-technological facilities. A mathematical model and algorithm for

a uniform calculation of the performance of different transport and technological facilities are presented. The way to determine the approximate rate of generation of funds that do not have standard indicators of work. The explanation of the innovations is accompanied by a formula device, which is based on the conclusion of the dependencies of out- and in-cycle components of the shift time balance on the engine power of the mobile device. The block diagram of the algorithm to calculate performance standards for vehicles is illustrated. The implementation of the algorithm is given by the example of using a specialized vehicle for transport and transport-technological operations.

Keywords: single cycle of works, out- and in-cycle elements of shift time, performance, performance standards, unification, mathematical model, algorithm, block diagram

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

For citation: Maistrenko N.A., Uvarov V.P., Levshin A.G., et al. Unification of Calculating the Performance of Vehicles and Transport-Technological Facilities. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):637-658. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.637-658>

Введение

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.

Изначально исследованию предшествовал анализ источников по определению нормативной выработки и расхода топлива при выполнении механизированных работ в сельскохозяйственном производстве [1].

Повышение эффективности транспортно-технологических и транспортных процессов возможно достичь благодаря определению оптимальных параметров мобильных энергетических средств.

Транспортно-технологические операции являются неотъемлемой частью технологических карт для растениеводства, которые составляются на основе многолетних научных исследований и являются синтезом опыта, испытаний и наблюдений при выполнении производственных процессов.

В транспортно-производственных процессах перемещение технологи-

ческого материала между пунктами осуществляется напрямую с предварительным сбором (или последующим распределением) его на участке рабочего пути. В этом процессе сочетаются транспортные и технологические (полевые) операции.

Принятый в нормировании подход разделения перевозок грузов в сельскохозяйственном производстве на транспортные и транспортно-производственные уместно скорректировать, а именно, оба процесса следовало бы объединить и выделить частный случай транспортно-производственного процесса, в котором не предусмотрено выполнение технологической операции. Это даст возможность рассчитывать и сравнивать по единой методике состав и эффективность использования мобильных технических средств с равной или разной мощностями в транспортных и технологических операциях. Например, вывоз удобрений к хранилищам, агрегатам на поле или транспортирование удобрений с прямоточным распределением их по поверхности поля. Для выполнения этих работ используются в первом случае тракторы с прицепами и грузовые автомобили, а во втором случае – тракторы с разбрасывателем и специализированные автомобили. К последним относятся и перспективные средства на шасси УРАЛ-432065, агрегируемые сменными технологи-

скими адаптерами [2]. Для таких средств актуально нормирование объемов выработки и расхода топлива в случае их функционирования в качестве как транспортного (ТС) так, и транспортно-технологического (ТТС) средства.

Унификация расчетов эксплуатационной производительности ТС и ТТС при реализации «чистой» транспортной работы, а также собирательных и распределительных операций основана на классических методах математического моделирования и оптимизации подобных процессов.

Приведенные алгоритмы оптимизации реализованы в виде компьютерных программ, способствующих определению экстремумов целевых функций – критериев оптимизации.

Полученные значения потребительских свойств ТС и ТТС при выполнении сельскохозяйственных операций позволят производителям с достаточной точностью осуществлять оптимальное планирование механизированных работ, а также получить ориентир при выборе основных параметров перспективных мобильных энергетических средств на этапе их проектирования.

Цели исследования – разработка математической модели и алгоритма, позволяющих привести к единообразию расчет производительности разных видов, типов ТС и ТТС на основании формулирования зависимости составляющих производительности от мощности средства как их основного классификатора; определение ориентировочной нормы выработки мобильных средств, для которых не установлены нормативные показатели работы.

Обзор литературы

Для оптимального планирования механизированных работ, в том числе транспортных и транспортно-технологических, необходимы значения показателей, характеризующих производственные процессы, такие как эксплуатационная производительность, расход топлива, затраты труда и др.

Сегодняшнее состояние машинно-тракторного парка в агропромышленном комплексе отрицательно влияет на процесс повышения технологической организации отрасли. Из 0,350 млн ТС (грузовых автомобилей), используемых в сельскохозяйственных предприятиях, более 60 % превышают установленный срок эксплуатации, являются технически устаревшими и не выполняют задачи, поставленные перед автомобилями, работающими на сельскохозяйственных предприятиях [3–6]. Появление новых ТС и ТТС приведет к повышению требований к инженерно-технической службе и усложнит оптимальное использование мобильных энергетических средств.

Одним из нормообразующих факторов при планировании транспортных и транспортно-технологических работ являются следующие производственные условия: конфигурация и размер полей; длина транспортировки; доза внесения технологического материала и урожайность культур.

Учитывая сложившуюся ситуацию с отсутствием типовых норм выработки на современные ТС и ТТС, остается нерешенным вопрос о планировании механизированных работ, что затрудняет прогнозирование потребности в технике, живой силе, а также возможности повышения их резервов.

Анализ действующих нормативно-правовых актов показывает, что предприятия-изготовители освобождены от обязательного проведения испытаний.

Установленный Правительством Российской Федерации порядок определения критериев, функциональных характеристик (потребительских свойств), эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования подтверждает актуальность исследований в области оптимизации данных показателей и стимулируется поддержкой государства.

Важность определения оптимальных значений основных параметров машинно-тракторных агрегатов и их со-

отношения отражена в трудах В. П. Горячкина [7]. Инструментом для решения вопроса может послужить метод изучения динамических систем и процессов, происходящих в них [8].

Решение вопросов оперативного планирования, а также необходимости определения потребности в ТС невозможно без конкретных значений показателей потребительских свойств [9].

В работах автора В. А. Иванова оптимизированы параметры грузоподъемности в зависимости от мощности двигателя ТС и производственно-эксплуатационных условий.

Анализ зарубежных источников показал, что вопросы оптимизации в основном направлены на техническое и экономическое обеспечение с учетом размеров хозяйств [10]. Зачастую вопросы поиска оптимальных параметров технологических средств связаны с решением частных задач. Необходимость широкого спектра технических средств отражена в трудах Д. А. Загарина [11].

Изменение структуры товаропроизводителей, технологий, типажей энергетических средств актуализирует вопрос оптимальной организации транспортных и транспортно-технологических процессов. Данную задачу невозможно решить без определения эксплуатационных показателей с последующей их оптимизацией, что требует научного исследования в данной области.

Материалы и методы

При сравнении результатов теоретического расчета по формулам с данными из типовых норм выработки отмечено их расхождение в основном из-за допущенных упрощений и искажений закономерностей, собственных рассматриваемым процессам. Например, не соблюдается характерная для таких процессов корреляция между мощностью и производительностью мобильных средств. Нормативная сменная выработка приводится в объемах, не кратных грузоподъемности средства,

то есть количество ездов с грузом при заданном коэффициенте использования грузоподъемности не равно целому числу. Производительность ТТС установлена без учета возможного оптимального изменения ширины захвата в зависимости от производственных условий выполнения процесса [12].

Перечисленные и другие упущения в анализируемых методиках устранялись посредством их корректирования, что позволило унифицировать расчет производительности ТС и ТТС. Вначале выделялись из баланса времени смены вне- и внутрицикловые элементы, а затем устанавливалась их зависимость от мощности. Наряду с этим формулировались зависимости частных величин, входящих в формулу, от основной комплексной характеристики средств – мощности и нормообразующих показателей внешних условий производства: доз сбора (распределения) материала, расстояния перевозок. К частным величинам отнесены, например, скорости движения средств с грузом и без груза при поворотах на поле, продолжительность простоев, устранения неисправностей, отказов, длина холостого хода и др.

В действующих нормах выработки производительность обоих видов средств исчисляется в разных размерностях [1]. При унификации расчетов выбрана одинаковая для них размерность – тонн в час.

Математическая модель реальной системы является тем абстрактным формально описанным объектом, изучение которого возможно математическими методами, в том числе и с помощью математического моделирования. Формализации любого реального процесса предшествует изучение структуры составляющих его явлений. Содержательное описание – исходный материал для последующих этапов формализации: построения формализованной схемы процесса и математической модели для него [13].

Безусловно, оптимизация любого процесса немыслима без критерия или критериев оптимизации – целевой функции. В данной математической модели критерием оптимизации являлся эксплуатационный параметр – производительность. А значение целевой функции в нашем случае должно стремиться к максимуму.

В качестве основного массива значений и статистических данных, являющихся исходными при оптимизации, в соответствии с таблицей 1, и характеризующих транспортный, транспортно-технологический процессы, послужили результаты ранее проведенного научного исследования Н. А. Майс-

тренко и полевых приемочных испытаний сменного технологического адаптера для внесения твердых минеральных удобрений СТА-5ТМ на базе шасси грузового автомобиля сельскохозяйственного назначения Урал-432065.

Затем, используя предложенный алгоритм расчета, определены значения параметров, характеризующих процесс оптимизации в различных эксплуатационных вариациях, в соответствии с таблицей 2.

Ниже приводится аргументация поэлементного математического моделирования эксплуатационной производительности W – важного нормообразующего показателя, характеризующего

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Исходные данные для модели оптимизации
Input data for optimization model

Константы / Constants	Длина транспортировки L_r , км / Transport length L_r , km			
	3	9	27	54
U , кг/м ² / U , kg/m ²	0,06	0,06	0,06	0,06
Q , кг / Q , kg	5 500,00	5 500,00	5 500,00	5 500,00
M_3 , кг / M_3 , kg	7 500,00	7 500,00	7 500,00	7 500,00
ξ_r – коэф. исп. мощн. / ξ_r – capacity factor	0,90	0,90	0,90	0,90
g , Н/кг / g , N/kg	9,81	9,81	9,81	9,81
f_r – коэф. перекач. дор. / f_r – rolling resistance coefficient on the road	0,03	0,03	0,03	0,03
α , град / α , gon	1,00	1,00	1,00	1,00
η_m и η_σ – КПД транс. / η_m and η_σ – transport efficiency	0,95	0,95	0,95	0,95
$\eta_{\delta p}$ – КПД букс. дорога / $\eta_{\delta p}$ – road towing efficiency	0,95	0,95	0,95	0,95
$\eta_{\delta r}$ – КПД букс. поле / $\eta_{\delta r}$ – field towing efficiency	0,80	0,80	0,80	0,80
ω , кг/м ($Q = 6$ т; $B = 20$ м) / ω , kg/m ($Q = 6$ t; $B = 20$ m)	275,00	275,00	275,00	275,00
B , м / B , m	20,00	20,00	20,00	20,00
ω_{var} , кг/м / ω_{var} , kg/m	72,00	124,71	216,00	305,47
B_ω , м / B_ω , m	76,40	44,10	25,50	18,00
$v_{кр}$	1,05	1,05	1,05	1,05
E_{vx}	1,15	1,15	1,15	1,15

Параметры оптимизации
Optimization parameters

Параметры и их значения / Parameters and their values	Длина транспортировки L_r , км / Transport length L_r , km			
	3	9	27	54
c	0,760000000	0,760000000	0,760000000	0,7600000
μ	0,204200000	0,353800000	0,586800000	0,7319000
r , 1/кВт / r , 1/kW	0,000440000	0,000250000	0,000150000	0,0001200
e	1,105700000	1,257500000	1,493900000	1,6410000
κ , 1/кВт / κ , 1/kW	0,000166000	0,000255000	0,000338000	0,0003560
z	1,309090000	3,927270000	11,781820000	23,5636400
μ_ω	0,400000000	0,517700000	0,640000000	0,7117000
r_ω , 1/кВт / r_ω , 1/kW	0,000230000	0,000170000	0,000140000	0,0001300
e_ω	1,304300000	1,423700000	1,547800000	1,6205000
κ_ω , 1/кВт / κ_ω , 1/kW	0,000911000	0,000603000	0,000407000	0,0003360
z_ω	5,000000000	8,660250000	15,000000000	21,2132000
N_h , кВт / N_h , kW	154,800000000	176,040000000	209,140000000	229,7400000
H_d , кВт / H_d , kW	318,390000000	840,540000000	1946,510000000	2756,1800000
T_h	0,611449724	0,549195630	0,465252514	0,4247307
T_d	0,534886128	0,371163556	0,214435244	0,1605352
h	0,687000000	0,604000000	0,509000000	0,4630000

полноту реализации потребительских свойств и использования мощности мобильных средств. Рассчитывается этот показатель по формуле:

$$W = (Q / t_0) \cdot \tau,$$

где Q – грузоподъемность средства, кг; t_0 – основное («чистое») время перемещения груза (по дороге или по дороге и полю), с; τ – коэффициент использования времени (часа) смены.

С целью исключения в последующих формулах коэффициентов перевода одной размерности в другую значения величин в них приводятся в системе СИ.

Тогда выражения для расчета значений производительности W_{TC} и W_{TTC}

соответствующих средств могут быть представлены в виде: $W_{TC} = Q \cdot V_r \cdot \tau / L_r$ и $W_{TTC} = Q \cdot V_r \cdot \tau \cdot \mu / L_r$. Из сравнения зависимостей следует, что для средств, используемых раздельно в качестве как ТС, так и TTC, уместно равенство:

$$W_{TTC} = W_{TC} \cdot \mu,$$

где μ – коэффициент, корректирующий «чистую транспортную производительность» в связи с выполнением дополнительной «чистой работы на поле». При $\xi_v = V_r / V_p$ применяется формула $\mu = \left(1 + \frac{\xi_v \cdot \omega}{L_r \cdot U} \right)^{-1}$. Если $\mu = 1$ при $L_p = 0$, то TTC выполняет функции только ТС,

что дает основание вывести унифицированную формулу:

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

На изменения показателя W влияют параметры энергомашин (Q, V_{Γ}), характеристики производства (L_{Γ}, U, c) и организационно-технологические условия (τ). Первая и третья группы параметров зависят, а вторая не зависит от эксплуатационной мощности средства N . Доказано, что ω также не зависит от N [12].

Последующие пояснения раскрывают влияние на N величин Q, V_{Γ} и τ .

Установить раздельное влияние Q и V_{Γ} на N невозможно, так как они связаны между собой экспоненциально через баланс мощности. Предлагается выразить их произведение ($Q \cdot V_{\Gamma}$) из баланса мощности для условий движения трактора или автомобиля 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 ξ_N – коэффициент использования мощности; $g = 9,81$ – сила тяготения, Н/кг; f – коэффициент сопротивления перемещению (в том числе на подъеме); $\delta_e, \delta_n, \delta_q$ – отношение массы соответственно энергомашин 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 буксовании колес. В уравнение (2) вносятся следующие изменения. Так как ТТС не агрегатируют с дополнительными прицепами, то при расчете принимать $\delta_n = 0$ и $\delta_q = 0$. Это относится и к ТС, укомплектованным только основным кузовом (емкостью) на шасси автомобиля или полуприцепом к трактору. Для внутри- и межхозяйственных перевозок не-

редко агрегатируют трактор одним дополнительным к основному прицепом, а автомобиль буксирует один прицеп.

Знаменатель в выражении (2) характеризует удельные (на единицу грузоперемещений) энергозатраты P_N , которые приблизительно одинаковы для однотипных средств разной мощности:

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

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

$$W = \frac{N \cdot \mu}{P_N \cdot L_{\Gamma}} \cdot \tau. \quad (4)$$

Следующие рассуждения связаны с исследованием зависимости $\tau = f(N)$, что включает вывод собственно формулы и разработку алгоритма расчета численных значений, составляющих τ .

Определяется τ как индекс организационно-технологической эффективности использования за час смены классическим способом – делением основного «чистого» времени T_{oc} за смену на продолжительность смены T_{cm} , иначе $\tau = T_{oc} / T_{cm}$.

Влияние N на составляющие $T_{cm} = \sum T_i$ можно исследовать на основании прямолинейных зависимостей: $T_i = a_i \pm K_i \cdot N$, в том числе когда $a_i = 0$ или $N = 0$. Установлено, что такими уравнениями описывается изменение T_i (с отклонением до $\pm 0,5\%$) в диапазоне мощности от 50 до 200 кВт для тракторных ТС и ТТС [14; 15]. Для автомобильных ТС и ТТС эти границы меньше в два раза (от 60 до 180 кВт), что дает основание на применение для обоих видов средств этих формул и на получение результатов с достаточно явной корреляцией [14].

Начать исследование предлагается с выделения из баланса времени смены $T_{cm} = T_{nc} + T_{vc}$ двух групп элементов:

внутрицикловых $T_{\text{нц}}$ и внецикловых $T_{\text{вц}}$. Вторую группу составляют элементы, независимые $T_{\text{пс}}$ и зависящие $T_{\text{то}}$ от мощности, то есть $T_{\text{вц}} = T_{\text{пс}} + T_{\text{то}}$. Первую группу формирует сумма $\sum t_i$ каждого элемента времени, входящего в единичный цикл работ $t_{\text{ц}}$ и проявляющегося в каждом из всех циклов $n_{\text{ц}}$ за смену. Тогда $T_{\text{вц}} = \sum t_i \cdot n_{\text{ц}} = t_{\text{ц}} \cdot n_{\text{ц}}$.

Основной компонент $T_{\text{нц}}$ – это $T_{\text{то}}$, то есть затраты времени на ежесменное техническое обслуживание (ЕТО) энергомашины и технологического оборудования, а также проведение наладок и регулировок (настройки на заданную дозу внесения U и ширину B захвата). При этом снятие и установка рабочего оборудования на автомобиле или агрегатирование трактора с рабочими машинами проводятся вне смен, выделенных для транспортно-производственного процесса. ЕТО проводят тракторист (водитель) и слесарь. Время $T_{\text{то}}$ включает постоянную $t_{\text{тос}}$ и переменную $t_{\text{тоV}}$ части времени проведения технического обслуживания трактора или шасси автомобиля соответственно независимые ($t_{\text{тос}} = t_{\text{то}} \cdot v_{\text{то}}$) и зависящие ($t_{\text{тоV}} = S_{\text{то}} \cdot v_{\text{то}} \cdot N$) от мощности. С учетом коэффициента пропорциональности $S_{\text{тоV}}$, с/Вт, время $T_{\text{то}}$, в зависимости от N , определяется по формуле $T_{\text{то}} = (t_{\text{то}} + S_{\text{то}} \cdot N) \cdot v_{\text{то}}$. Величины $t_{\text{то}}$ и $S_{\text{то}}$ разные для тракторных и автомобильных как ТС, так и ТТС. Коэффициент $v_{\text{то}}$ характеризует превышения продолжительности технического обслуживания технологического оборудования и энергомашины.

Время $T_{\text{пс}}$ выделяется на следующие действия: получение наряда (задания на работу), разъяснение нюансов организации и контроля $t_{\text{сп}}$; движение от стоянки к месту погрузки груза, с поля на место стоянки или приема пищи и обратно; реализация контроля качества выполненных работ; отчет о выполнении наряда подготовка к межсменной стоянке $t_{\text{св}}$; отдых и гигиена $t_{\text{сл}}$. Тогда $T_{\text{пс}} = t_{\text{сп}} + t_{\text{св}} + t_{\text{сл}}$.

Данные элементы времени $T_{\text{пс}}$ принимаются постоянными независимо от типов и марок ТС и ТТС. Их значения регламентированы типовыми нормами выработки или договорными соглашениями на выполнение конкретного производственного процесса.

Итоговое выражение $T_{\text{нц}} = t_{\text{сп}} + t_{\text{св}} + t_{\text{сл}} + v_{\text{то}}(t_{\text{то}} + S_{\text{то}} \cdot N)$ позволяет без детализации по единичным циклам в целом определить время $T_{\text{вц}}$ за смену из уравнения $T_{\text{вц}} = T_{\text{см}} + T_{\text{нц}}$. Долю $T_{\text{вц}}$, затрачиваемого на выполнение каждого единичного цикла работ, можно установить из расчета времени $t_{\text{ц}}$ для разных видов и типов средств и из сопоставления частных зависимостей для каждого из слагаемых баланса времени $t_{\text{ц}}$ в функции мощности.

Время $t_{\text{ц}}$ включает зависящие от N следующие элементы: $t_{\text{зо}}$ – время технологического обслуживания с учетом ожидания погрузки и других вероятностно-возможных простоев; $t_{\text{ос}}$ – время основной («чистой») транспортно-полевой (для ТТС) или транспортной (для ТС) работ; $t_{\text{хг}}$ – время холостой (для ТТС и ТС) работы; $t_{\text{кр}}$ – время холостых ходов при выполнении полевой (для ТТС) работы или время выгрузки технологического материала из кузова (для ТС); $t_{\text{но}}$ – время устранения технологических неисправностей и технических отказов.

Время $t_{\text{зо}}$ – определяется по формуле $t_{\text{зо}} = 1,25 \cdot Q / W_n$, а с учетом зависимости $Q = \alpha_Q + K_Q \cdot N$ из уравнения:

$$t_{\text{зо}} = 1,25(\alpha_Q + K_Q \cdot N) / W_n,$$

где α_Q и K_Q – коэффициенты пропорциональности, кг и кг/Вт соответственно; W_n – производительность погрузчика, кг/с. Коэффициент 1,25 учитывает вероятность простоев за время $t_{\text{ц}}$. Для последующих расчетов выделяется из $t_{\text{зо}}$ постоянная $t_{\text{зос}}$ и переменная $t_{\text{зоV}}$ составляющие в виде $t_{\text{зос}} = 1,25 \cdot \alpha_Q / W_n$ и $t_{\text{зоV}} = 1,25 K_Q \cdot N / W_n$.

В большей мере на $t_{\text{зо}}$ влияет $t_{\text{зоV}}$. При упрощенных расчетах можно при-

нимать $\alpha_Q = 0$, а $K_Q = 0,042$ для автомобильных и $K_Q = 0,084$ для тракторных средств.

Время t_{OC} для ТТС рассчитывается из равенства $t_{OC} = L_{\Gamma} / V_{\Gamma} + L_P / V_P$. На основании зависимостей $V_{\Gamma} = 1 / (\alpha_V - K_V \cdot N)$, $V_P = V_{\Gamma} / \xi_V$, $L_P = \omega / U$ выражение t_{OC} в функции мощности примет вид:

$$t_{OC} = [L_{\Gamma} + (\omega \cdot \xi_V / U)] \cdot (\alpha_V - K_V \cdot N),$$

где α_V – постоянная составляющая уравнения, $1/(м/с)$; K_V – темп изменения обратной величины скорости движения от мощности, $1/[(м/с) \cdot (Вт)]$. Для ТС время t_{OC} определяется из уравнения $t_{OC} = L_P (\alpha_V - K_V \cdot N)$. Значение N ограничивается дорожными условиями, поэтому расчеты допустимо проводить при $K_V = 0$ и величинах $\alpha_V = 0,015$ $1/(км/ч)$ для автомобильных, $\alpha_V = 0,038$ $1/(км/ч)$ для тракторных средств.

Время $t_{ХГ}$ при нормировании подобных работ принимается на 10 % меньше t_{Γ} , тогда $t_{ХГ} = 0,9 \cdot L_{\Gamma} (\alpha_V - K_V \cdot N)$, для которого $t_{ХГ} = t_{ХГС} + t_{ХГВ}$. Его составляющие – независимые $t_{ХГС}$ и зависящие $t_{ХГВ}$ от мощности, которые могут быть представлены в виде $t_{ХГС} = 0,9 \cdot L_{\Gamma} (\alpha_V - 2K_V \cdot N_{CB})$, $t_{ХГВ} = 0,9 \cdot L_{\Gamma} K_V N$ при средневзвешенном значении N_{CB} для одного из трех вариационных уровней, которому соответствует мощность исследуемого мобильного средства. По результатам обработки статистических данных получены мощностные вариации, наиболее часто реализуемые в транспортно-производственных процессах со средними значениями мощности и их отклонениями 60 ± 10 , 90 ± 20 , 140 ± 30 кВт, которые принимаются при анализе частных величин t_{Π} .

Время $t_{ХР}$ зависит от K_X – количества поворотов для ТТС или заездов на погрузку для ТС; от v_X – удельного (на единицу мощности) времени поворота или разгрузки, с/Вт; а также от β – коэффициента, учитывающего сложность маневрирования средств.

Эти величины связаны математическим выражением: $t_{ХР} = K_X \cdot v_X \cdot \beta_X \cdot N$. Для ТС K_X , а для ТТС:

$$K_X = \omega / (U \cdot L),$$

где L – длина гона поля, м. Величина v_X определяется из равенств: а) для ТС $v_X = K_Q \cdot \gamma_B$ при константах $K_Q = Q / N$, кг/кВт, $\gamma_B = t_B / Q$ с/кг (приблизительно $\gamma_B = 0,01$ т/ч), где t_B – время выгрузки продукции из кузова, с; б) для ТТС $v_X = \gamma_{\Pi} \cdot V_{\Pi}$ при постоянном $\gamma_{\Pi} = l_{\Pi} / N$ м/Вт (приблизительно $\gamma_{\Pi} = 28 \cdot 10^{-4}$ км/кВт), где l_{Π} и V_{Π} длина, м, и скорость поворота, м/с. Примем $\beta_X = 1$ для автомобильных ТС и ТТС, а $\beta_X = 3$ и $\beta_X = 2$ для тракторных ТС и ТТС соответственно.

Время $t_{НО}$ определяется с учетом следующих особенностей. В основном неисправности возникают только в ТТС при выполнении полевых работ, а отказы проявляются в ТС при рабочих ходах на дороге, а в ТТС на дороге и в поле. Вероятные периодичности наступления отказов A_{OT} и неисправностей A_{HT} рассчитываются на основании среднего пробега (м) на отказ L_{OT} , на неисправность L_{HT} и массы (кг) перемещаемого груза Q как $A_{OT} = L_{OT} \cdot Q$ и $A_{HT} = L_{HT} \cdot Q$. С помощью средних продолжительностей устранения отказа t_{OT} и неисправности t_{HT} , а также числа отказов n_{OT} и неисправностей n_{HT} рассчитывается суммарная продолжительность восстановления работоспособного состояния техники из выражения $t_{НО} = n_{OT} \cdot t_{OT} + n_{HT} \cdot t_{HT}$. Так как силовое воздействие на узлы, механизмы, детали ТС и ТТС в большинстве случаев зависит от массы груза, то отказ однотипных средств следует относить к единичной массе ($q = 1$) груза. Тогда средство предлагается рассматривать как систему из Q / q одинаковых элементов, для каждого из которых наработка (м) на отказ и неисправность составляют соответственно l_{OT} и l_{HT} . Согласно теории надежности величина средней про-

должительности отказа и неисправности составляет $L_{OT} = 1 / [Q / (q \cdot l_{OT})]$ и $L_{HT} = 1 / [Q / (q \cdot l_{HT})]$. Значения n_{OT} вычисляются путем деления наработки за цикл $A_{OC} = Q \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega / U)$ на наработку между соответственно отказами A_{OT} и неисправностями A_{HT} , а именно $n_{OT} = \frac{Q \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega / U)}{q \cdot l_{OT}}$;

$$n_{HT} = \frac{Q \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega / U)}{q \cdot l_{HT}}$$

На основании развернутых выражений для определения n_{OT} , L_{OT} , n_{HT} , L_{HT} Q получена конечная формула:

$$t_{HO} = \frac{(\alpha_Q + K_Q \cdot N / (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega / U))}{q} \times \left(\frac{t_{OT}}{l_{OT}} + \frac{t_{HT}}{l_{HT}} \right).$$

Слагаемые этой формулы, которые не зависят от мощности $t_{HOС} = \frac{\alpha_Q \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega / U)}{q} \cdot \left(\frac{t_{OT}}{l_{OT}} + \frac{t_{HT}}{l_{HT}} \right)$,

в расчетах могут не применяться, так как приблизительно $\alpha_Q = 0$. Переменное слагаемое, зависящее от мощности, выражается в виде

$$t_{HOV} = \left[\frac{K_Q \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega / U)}{q} \cdot \left(\frac{t_{OT}}{l_{OT}} + \frac{t_{HT}}{l_{HT}} \right) \right] \cdot N.$$

Данные формулы верны для ТТС, а для ТС принимать $t_{HT} = 0$, $\omega / U = 0$.

После обобщения полученных закономерностей изменения элементов баланса времени смены единичного цикла работ для средств, входящих в один из трех вариационных мощностных уровней, получено выражение времени цикла в функции мощности:

$$t_{Ц} = a_1 + (b_1 - c_1) \cdot N,$$

где a_1 , b_1 , c_1 – частные коэффициенты.

$$a_1 = a_V \cdot (1,9 L_{\Gamma} + \omega \cdot \xi_V / U), \text{ с/Вт};$$

$$c_1 = K_V \cdot (1,9 \cdot L_{\Gamma} + \omega \cdot \xi_V / U), \text{ с/Вт};$$

$$b_1 = 1,25 \cdot (a_Q \cdot K_Q / N_{CB}) / W_{\Pi} + K_X \cdot B_X \cdot \beta_X + \\ + [(a_Q \cdot K_Q / N_{CB}) \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega \cdot U) / q] \times \\ \times (t_{OT} / l_{OT} + t_{HT} / l_{HT}), \text{ с/Вт}.$$

Определить количество циклов за смену можно из условия $n_{Ц} = T_{ВЦ} / t_{Ц} \rightarrow n_1$, округлив расчетное число $n_{Ц}$ до целого n_1 (до меньшего значения для ТТС, а до большего для ТС).

Суммарная продолжительность каждой составляющей баланса времени единичного цикла за смену вычисляется соответственно по следующим формулам: $T_{30} = t_{30} \cdot n_1$; $T_{OC} = t_{OC} \cdot n_1$; $T_{XГ} = t_{XГ} \cdot n_1$; $T_{XP} = t_{XP} \cdot n_1$; $T_{HO} = t_{HO} \cdot n_1$.

Общая продолжительность внутрицикловых элементов времени за смену составляет $T_{ВЦ1} = T_{30} + T_{OC} + T_{XГ} + T_{XP} + T_{HO}$.

По разнице между $T_{ВЦ}$ и $T_{ВЦ1}$ можно предопределить резервное время за смену на случай улучшения организации процесса $T_{PEЗ} = T_{ВЦ} - T_{ВЦ1} = T_{CM} - T_{HC} - T_{ВЦ1}$, м.

Если соотношение $T_{PEЗ} \cdot 100 / T_{ВЦ1}$ процент, составит более 10 %, то рекомендуется провести сравнительный расчет составляющих T_{CM} для средств с большей мощностью (другими Q и V_{Γ}) с целью выявления резервов уменьшения значения $T_{PEЗ}$.

Последующий этап исследования характеризуется определением и преобразованием развернутого выражения баланса времени смены. Подставив в формулу $T_{CM} = T_{ПС} + T_{ТО} + T_{30} + T_{OC} + T_{XГ} + T_{XP} + T_{HO}$ зависимости каждой из составляющих, поделив все равенство на T_{CM} и выполнив несложные преобразования с учетом $\tau = T_{OC} / T_{CM}$, получим

выражение коэффициента использования времени смены τ , функционально зависящего от обобщенного параметра N в виде ниспадающей прямой $\tau = h - dN$ [14]. Коэффициенты в формуле представлены следующими алгебраическими связями между числами и величинами:

$$h = 1 - (t_{СП} + t_{СВ} + t_{СЛ} + t_{ТОС} + (t_{ХГС} + t_{ЗОС} + t_{НОС}) \cdot n_1) \cdot \frac{1}{T_{СМ}};$$

$$d = \frac{S_{ТО} \cdot V_{ТО}}{T_{СМ}} + \left[\frac{1,25 \cdot K_Q}{W_{П}} + 0,9 \cdot L_{Г} \cdot K_V + K_X \cdot V_X \cdot \beta_X + \frac{K_Q \cdot (L_{Г} + 0,5 \cdot \omega/U)}{q} \times \left(\frac{t_{ОТ}}{l_{ОТ}} + \frac{t_{НТ}}{l_{НТ}} \right) \right] \cdot \frac{n_1}{T_{СМ}}.$$

Каждый из коэффициентов – параметр использования средств, характеризующий относительные средне-взвешенные потери времени смены: h – независящие от N и имеющие место при любой наработке; d – зависящие от мощности и основного объема работ. Параметры h и d имеют разные численные значения для тракторных и автомобильных ТС и ТТС.

Результаты исследования

Арифметические алгоритмы заложены в программу. Определяются коэффициенты использования времени смены (в автоматическом режиме), при помощи которых в дальнейшем будет установлено значение эксплуатационных параметров в соответствии с таблицей 3.

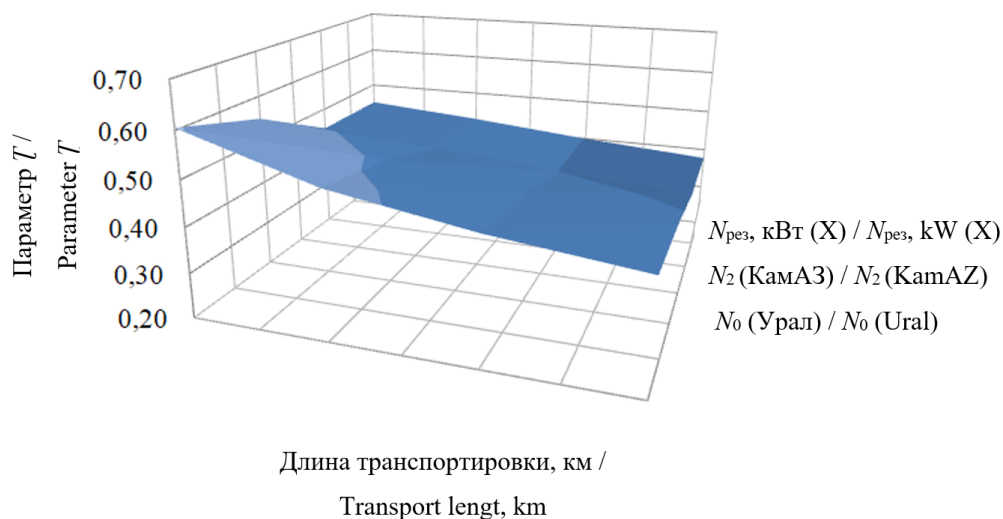
На основании табличных данных известна функциональная зависимость коэффициента использования времени смены от внешних производственных условий в соответствии с рисунком 1.

Завершается исследование по заявленной теме иллюстрацией алгоритма

Т а б л и ц а 3
T a b l e 3

**Результаты оптимизации
Optimization results**

N_{hp} , кВт / N_{h^*} , kW	170,990000000	202,610000000	224,050000000	241,420000000
N_{dp} , кВт / N_{d^*} , kW	325,290000000	793,100000000	1173,480000000	1508,060000000
T_h	0,512419676	0,445620828	0,409664378	0,386924600
T_d	0,414108818	0,248796635	0,189124890	0,160931500
h	0,636000000	0,537000000	0,486000000	0,451000000
d	0,000622000	0,000366000	0,000286000	0,000243000
$N_{h\omega}$, кВт / $N_{h\omega^*}$, kW	182,610000000	199,320000000	210,370000000	221,040000000
$N_{d\omega}$, кВт / $N_{d\omega^*}$, kW	481,370000000	738,700000000	925,990000000	1117,670000000
$T_{h\omega}$	0,476010000	0,453690000	0,437950000	0,423400000
$T_{d\omega}$	0,311900000	0,266700000	0,244100000	0,225100000
h_{ω}	0,595700000	0,545743813	0,517089991	0,492131500
d_{ω}	0,000495000	0,000382500	0,000332500	0,000295300



Р и с. 1. Значения коэффициентов использования времени смены
F i g. 1. Shift time utilization ratios

расчета эксплуатационных показателей рассматриваемых мобильных средств в соответствии с рисунком 2.

Результаты исследования приводятся в виде резюме. На примере данных о производственных условиях хозяйств агрозоны 1.1 Центрального Федерального округа и применяемых средств механизации процесса внесения минеральных удобрений при $L = 9$ км и $U = 0,06$ кг/м² [6].

Математические выкладки позволяют вывести формулу эксплуатационной производительности в функции характеристик внешних условий выполнения процесса и мощности технического средства. С учетом поправочного коэффициента $K_{об}$ на местные условия выражение целевой функции W запишется в виде:

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

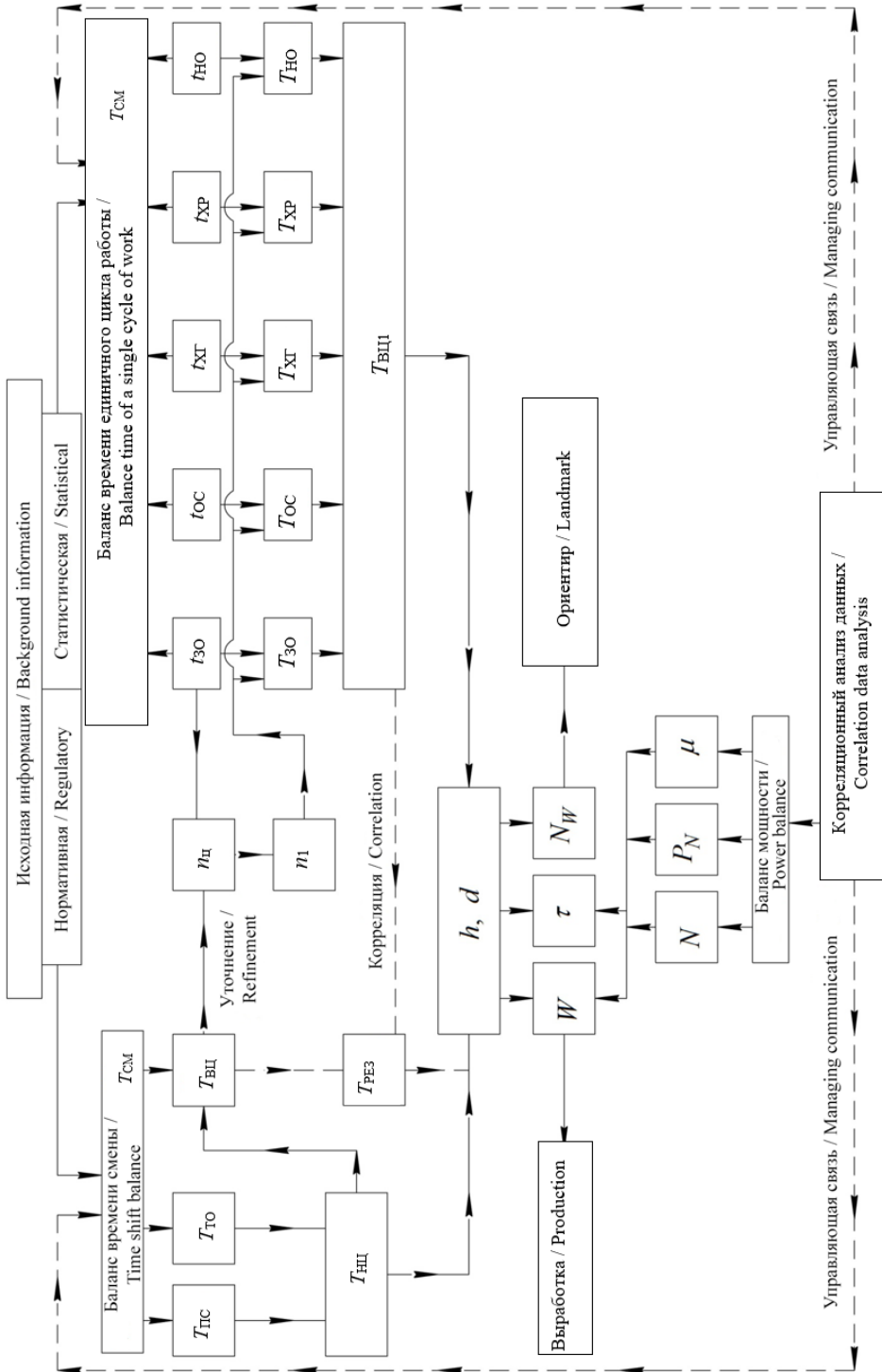
вая функция оптимизации. Для проверки ритмичности единичных циклов работы средств необходимо сравнить частное от $K_{об} \cdot N / W$ со значением $t_{ц}$

для конкретных ТС и ТТС и заданных условий работы. Разница между ними не должна отличаться более чем на 10 % относительно значения $t_{ц}$, что будет свидетельствовать о ритмичности единичных циклов.

Используя формулу производительности в качестве целевой функции (критерий $W \rightarrow \max$), можно классическим методом вывести выражение для определения оптимальной мощности N_w . Из дифференцирования полученного уравнения $W = f(N)$ по переменной N и решения равенства $\delta W / \delta N = 0$ следует $N_w = 0,5h / d$, Вт.

Для производителей значение N_w представляется в качестве ориентира, к которому можно приблизиться или за счет больших денежных вложений, или на основе компромисса между N_w и другими оптимальными значениями N_c , соответствующими экономическим (стоимостным) критериям, то есть умеренным эксплуатационным затратам (N_c).

В результате реализации алгоритма расчета и преобразования математического аппарата в более удобную форму



Р и с 2. Алгоритм расчета эксплуатационных показателей мобильных средств
 Fig. 2. Algorithm for calculating operational indicators of mobile devices

получены значения производительности (выработки) средств:

1. Для транспортных средств при доставке удобрений:

а) автомобилем УРАЛ-432065 (кузов):

$$h = 1 - \frac{T_{\text{ПС}} + t_{\text{ТО}} \cdot v_{\text{ТО}} + t_{\text{ХГС}} \cdot n_1}{T_{\text{СМ}}} =$$

$$= 1 - \frac{1,1 + 0,2 \cdot 1,17 + 0,11 \cdot 11}{7} = 0,63;$$

$$d = \frac{S_{\text{ТО}} \cdot v_{\text{ТО}}}{T_{\text{СМ}}} + \left[\frac{1,25 \cdot K_Q}{W_{\text{П}}} - \right.$$

$$\left. -0,9 \cdot L_{\Gamma} \cdot K_V + K_X \cdot v_X \cdot \beta_X + \right.$$

$$\left. + \frac{K_Q \cdot L_{\Gamma} \cdot t_{\text{ОТ}}}{q \cdot l_{\text{ОТ}}} \right] \cdot \frac{n_1}{T_{\text{СМ}}} =$$

$$= \frac{0,0007 \cdot 1,17}{7} + \left[\frac{1,25 \cdot 0,042}{40} - \right.$$

$$\left. -0,9 \cdot 9 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} + 1 \cdot 40 \cdot 10^{-5} \cdot 1 + \right.$$

$$\left. + \frac{0,042 \cdot 9 \cdot 0,32}{1 \cdot 800} \right] \cdot \frac{11}{7} = 0,0028.$$

Коэффициент использования времени смены в таком случае $\tau = h - dN$ $\tau = 0,63 - 0,0028 \cdot 140 = 0,24$. С учетом полученного значения τ определяем эксплуатационную производительность

$$W = \frac{3,6 \cdot 140 \cdot 1 \cdot 0,24 \cdot 0,9}{1,27 \cdot 9} = 9,1 \text{ т/ч};$$

б) трактором с прицепом (МТЗ-82.1+2ПТС-6):

$$h = 1 - \frac{T_{\text{ПС}} + t_{\text{ТО}} \cdot v_{\text{ТО}} + t_{\text{ХГС}} \cdot n_1}{T_{\text{СМ}}} =$$

$$= 1 - \frac{1,3 + 0,2 \cdot 1,49 + 0,31 \cdot 5}{7} = 0,54;$$

$$d = \frac{S_{\text{ТО}} \cdot v_{\text{ТО}}}{T_{\text{СМ}}} + \left[\frac{1,25 \cdot K_Q}{W_{\text{П}}} - \right.$$

$$\left. -0,9 \cdot L_{\Gamma} \cdot K_V + K_X \cdot v_X \cdot \beta_X + \right.$$

$$\left. + \frac{K_Q \cdot L_{\Gamma} \cdot t_{\text{ОТ}}}{q \cdot l_{\text{ОТ}}} \right] \cdot \frac{n_1}{T_{\text{СМ}}} =$$

$$= \frac{0,0027 \cdot 1,43}{7} + \left[\frac{1,25 \cdot 0,085}{40} - \right.$$

$$\left. -0,9 \cdot 9 \cdot 4,86 \cdot 10^{-5} + 1 \cdot 40 \cdot 10^{-5} \cdot 2 + \right.$$

$$\left. + \frac{0,085 \cdot 9 \cdot 0,24}{1 \cdot 800} \right] \cdot \frac{5}{7} = 0,0029.$$

Коэффициент использования времени смены в таком случае $\tau = h - dN$ $\tau = 0,54 - 0,0029 \cdot 57 = 0,37$. С учетом полученного значения τ определяем эксплуатационную производительность

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

2. Для транспортно-технологических средств при транспортировке и распределении удобрений:

а) автомобилем УРАЛ-432065 (разбрасыватель Amazone):

$$h = 1 - \frac{T_{\text{ПС}} + t_{\text{ТО}} \cdot v_{\text{ТО}} + t_{\text{ХГС}} \cdot n_1}{T_{\text{СМ}}} =$$

$$= 1 - \frac{1,1 + 0,2 \cdot 1,83 + 0,11 \cdot 5}{7} = 0,71;$$

$$d = \frac{S_{\text{ТО}} \cdot v_{\text{ТО}}}{T_{\text{СМ}}} + \left[\frac{1,25 \cdot K_Q}{W_{\text{П}}} - \right.$$

$$\left. -0,9 \cdot L_{\Gamma} \cdot K_V + K_X \cdot v_X \cdot \beta_X + \right.$$

$$\left. + \frac{K_Q \cdot (L_{\Gamma} + 0,5 \cdot \omega/U)}{q} \right] \times$$

$$\begin{aligned} & \times \left(\frac{t_{OT}}{l_{OT}} + \frac{t_{HT}}{l_{HT}} \right) \cdot \frac{n_1}{T_{CM}} = \\ & = \frac{0,0007 \cdot 1,83}{7} + \left[\frac{1,25 \cdot 0,042}{40} - \right. \\ & - 0,9 \cdot 9 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5} + 6 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot 1 + \\ & + \frac{0,042 \cdot (9 + 0,5 \cdot 300/600)}{1} \times \\ & \left. \times \left(\frac{0,32}{800} + \frac{0,12}{400} \right) \right] \cdot \frac{5}{7} = 0,0014. \end{aligned}$$

Коэффициент использования времени смены в таком случае $\tau = h - dN\tau = 0,71 - 0,0014 \cdot 140 = 0,52$. С учетом полученного значения τ определяем эксплуатационную производительность $W = \frac{3,6 \cdot 140 \cdot 0,256 \cdot 0,52 \cdot 0,9}{1,27 \cdot 9} = 5,5$ т/ч;

б) трактором с разбрасывателем (МТЗ-82.1+РУМ-6):

$$\begin{aligned} h &= 1 - \frac{T_{ПС} + t_{ТО} \cdot V_0 + t_{ХГС} \cdot n_1}{T_{СМ}} = \\ &= 1 - \frac{1,3 + 0,2 \cdot 1,71 + 0,30 \cdot 3}{7} = 0,62; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d &= \frac{S_{ТО} \cdot V_{ТО}}{T_{СМ}} + \left[\frac{1,25 \cdot K_Q}{W_{П}} - \right. \\ & - 0,9 \cdot L_{Г} \cdot K_V + K_X \cdot V_X \cdot \beta_X + \\ & + \frac{K_Q \cdot (L_{Г} + 0,5 \cdot \omega/U)}{q} \times \\ & \left. \times \left(\frac{t_{OT}}{l_{OT}} + \frac{t_{HT}}{l_{HT}} \right) \right] \cdot \frac{n_1}{T_{СМ}} = \\ & = \frac{0,0027 \cdot 1,71}{7} + \left[\frac{1,25 \cdot 0,085}{40} - \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - 0,9 \cdot 9 \cdot 4,86 \cdot 10^{-5} + 6 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot 2 + \\ & + \frac{0,085 \cdot (9 + 0,5 \cdot 300/600)}{1} \times \\ & \left. \times \left(\frac{0,24}{600} + \frac{0,12}{400} \right) \right] \cdot \frac{3}{7} = 0,0022. \end{aligned}$$

Коэффициент использования времени смены в таком случае $\tau = h - dN\tau = 0,62 - 0,0022 \cdot 57 = 0,49$. С учетом полученного значения τ определяем эксплуатационную производительность $W = \frac{3,6 \cdot 57 \cdot 0,418 \cdot 0,49 \cdot 0,9}{1,33 \cdot 9} = 3,9$ т/ч.

Обсуждение и заключение

Доказана приемлемость формулы, описывающей линейную зависимость эксплуатационной производительности технических средств от их мощности.

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

Достаточную достоверность подтверждает соответствие при сопоставлении полученных расчетных значений эксплуатационных показателей со справочными данными. В результате сравнения определено, что при выполнении тракторно-транспортных работ, а именно доставки минеральных удобрений (I класс грузов) к хранилищам, эксплуатационная производительность составляет 5,84 т/ч, полученное теоретическое значение 6,3 т/ч. В таком случае их расхождение составит 4,2 %, что приемлемо для инженерных расчетов.

При выполнении транспортно-технологических процессов, внесении твердых минеральных удобрений по прямой технологии, производительность

за час основного времени Π составляет 7,88 т/ч. С учетом полученного в результате математического моделирования коэффициента использования времени смены τ определяем эксплуатационную производительность $W = \Pi \cdot \tau = 7,88 \cdot 0,49 = 3,86$ т/ч. Данное значение соответствует расчетному.

Теоретическим путем определено, что при эксплуатации ТТС Урал-432065 с разбрасывателем Amazone в определенных производственных и агроландшафтных условиях коэффициент использования времени смены составит $\tau = 0,52$ и будет отличаться на 3,7% от значения $\tau = 0,54$, полученного при эксплуатационно-технологической оценке, в соответствии с протоколом испытаний [15–19]. Тем самым подтверждается достоверность результатов исследований. Таким образом,

разработанный алгоритм расчета выработки мобильных средств сомнений не вызывает [20–24].

Наряду с этим следует отметить, что оригинальностью статьи является разработанная математическая модель, позволяющая привести к единообразию расчет эксплуатационной производительности различных видов, типов ТС и ТТС [25; 26]. Это представляет практический интерес при планировании механизированных работ в различных природно-производственных и агроландшафтных условиях с использованием агрегатов, не имеющих эксплуатационно-технологической оценки, например, значений производительности.

Также оригинальность отражена в подходе прогнозирования потребности в технике, живой силе и возможности повышения их резервов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шкель, А. С. Технология внесения твердых минеральных удобрений транспортно-технологическим агрегатом СТА-5ТМ в составе специализированного автомобильного шасси УРАЛ-432065 / А. С. Шкель, М. А. Козловская, Т. Д. Дзоценидзе // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 9. – С. 44–48. – URL: <https://rucont.ru/efd/458413> (дата обращения: 12.11.2020).
2. Предложения по созданию многоцелевых грузовых автомобилей нового поколения / Д. А. Загарин, М. А. Козловская, Т. Д. Дзоценидзе, А. С. Шкель // Журнал автомобильных инженеров. – 2016. – № 2 (97). – С. 18–25. – URL: <http://www.aac-press.ru/f/97/18.pdf> (дата обращения: 12.11.2020).
3. Расчетные исследования опытных образцов из новой линейки грузовых автомобилей сельскохозяйственного назначения / В. В. Московкин, Т. Д. Дзоценидзе, А. Г. Левшин [и др.] // Технология колесных и гусеничных машин. – 2012. – № 2. – С. 31–35. – Рез. англ.
4. Дзоценидзе, Т. Д. Комплексные исследования новых транспортных средств сельскохозяйственного назначения / Т. Д. Дзоценидзе // Вестник КрасГАУ. – 2009. – № 3 (30). – С. 152–161. – URL: <https://clck.ru/RtbgM> (дата обращения: 12.11.2020). – Рез. англ.
5. Инновационный подход в развитии транспортной инфраструктуры агропромышленного комплекса / А. Ю. Измайлов, Т. Д. Дзоценидзе, Н. Е. Евтюшенков [и др.] // Технология колесных и гусеничных машин. – 2012. – № 1. – С. 23–28. – Рез. англ.
6. Создание современной компонентной базы – основы развития транспортной инфраструктуры страны / А. А. Эйдинов, Т. Д. Дзоценидзе, Д. А. Загарин, П. А. Кабанин // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 11. – С. 3–5. – URL: <http://www.mashin.ru/files/avb08.pdf> (дата обращения: 12.11.2020).
7. Агротехнические и технологические параметры автомобилей сельскохозяйственного назначения / С. Н. Галкин, Т. Д. Дзоценидзе, А. Г. Левшин [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 5. – С. 3–6. – URL: <https://rucont.ru/efd/356705> (дата обращения: 12.11.2020).
8. Загарин, Д. А. Моделирование параметров колесной транспортно-тяговой машины с учетом эксплуатации в условиях КФХ и ЛПХ / Д. А. Загарин, Т. Д. Дзоценидзе // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 10. – С. 33–38. – URL: <https://rucont.ru/efd/356698> (дата обращения: 12.11.2020).

9. Расчет производительности и потребности технических средств уборочно-транспортного комплекса / А. Ю. Измайлов, А. А. Артюшин, Н. Е. Евтюшенков [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. – № 2. – С. 5–10. – URL: <https://www.vimsmmit.com/jour/article/view/121> (дата обращения: 12.11.2020). – Рез. англ.

10. Хайт, Д. Экономическое обоснование выбора с/х машин / Д. Хайт // Сельскохозяйственная техника. – 1963. – № 2. – С. 10–14.

11. Некоторые аспекты создания специализированного транспорта сельскохозяйственного назначения / Д. А. Загарин, А. С. Шкель, М. А. Козловская, Т. Д. Дзоенидзе // Технология колесных и гусеничных машин. – 2015. – № 6 (22). – С. 6–12.

12. Уваров, В. П. Оптимальное соотношение основных механизированных работ при прямом внесении удобрений / В. П. Уваров, А. Г. Левшин, Н. А. Майстренко // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. – № 4. – С. 38–43. – URL: <https://www.vimsmmit.com/jour/article/view/144> (дата обращения: 12.11.2020). – Рез. англ.

13. Измайлов, А. Ю. Разработка математического аппарата для моделирования технологий по транспортированию селекционного урожая / А. Ю. Измайлов, Н. Е. Евтюшенков, В. Ф. Рожин // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2015. – № 6. – С. 14–16. – URL: http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=126353 (дата обращения: 12.11.2020).

14. Майстренко, Н. А. Потребительские ориентиры эффективного использования перспективных транспортно-технологических средств / Н. А. Майстренко, В. П. Уваров // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2016. – № 1. – С. 44–50. – URL: <https://clck.ru/Rtcjj> (дата обращения: 12.11.2020). – Рез. англ.

15. Yeung, D. W. K. Subgame Consistent Cooperative Solutions in Stochastic Differential Games / D. W. K. Yeung, L. A. Petrosyan. – DOI 10.1023/B:JOTA.0000025714.04164.e4 // Journal of Optimization Theory and Applications. – 2004. – Vol. 120. – Pp. 651–666. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1023/B:JOTA.0000025714.04164.e4#citeas> (дата обращения: 12.11.2020).

16. MacKinnon, R. D. Optimization Models of Transportation Network Improvement / R. D. MacKinnon, G. M. Barber. – DOI 10.1177/030913257700100303 // Progress in Human Geography. – 1977. – Vol. 1, Issue 3. – Pp. 387–412. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/030913257700100303> (дата обращения: 12.11.2020).

17. Khodakarami, M. Modeling Maintenance Project Selection on a Multimodal Transportation Network / M. Khodakarami, K. N. Mitchell, X. B. Wang. – DOI 10.3141/2409-01 // Journal of the Transportation Research Board. – 2014. – Vol. 2409, Issue 1. – Pp. 1–8. – URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2409-01> (дата обращения: 12.11.2020).

18. Malladi, K. T. Optimization of Operational Level Transportation Planning in Forestry: A Review / K. T. Malladi, T. Sowlati. – DOI 10.1080/14942119.2017.1362825 // International Journal of Forest Engineering. – 2017. – Vol. 28, Issue 3. – Pp. 198–210. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/14942119.2017.1362825?scroll=top&needAccess=true> (дата обращения: 12.11.2020).

19. Smart Farming Techniques for Climate Change Adaptation in Cyprus / G. Adamides, N. Kalatzis, A. Stylianou [et al.]. – DOI 10.3390/atmos11060557 // Atmosphere. – 2020. – Vol. 11, Issue 6. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/6/557> (дата обращения: 12.11.2020).

20. Zavorotin, E. Method of Introducing Innovation to Land Use in Agriculture / E. Zavorotin, A. Gordoplova, N. Tiurina. – DOI 10.30525/2256-0742/2018-4-3-74-79 // Baltic Journal of Economic Studies. – 2018. – Vol. 4, Issue 3. – Pp. 74–79. – URL: <http://www.baltijapublishing.lv/index.php/issue/article/view/426/pdf> (дата обращения: 12.11.2020).

21. Maurel, V. B. Putting Agricultural Equipment and Digital Technologies at the Cutting Edge of Agroecology / V. B. Maurel, Ch. Huyghe. – DOI 10.1051/occl/2017028 // OCL – Oilseeds and Fats, Crops and Lipids. – 2017. – Vol. 24, Issue 3. – URL: <https://www.occl-journal.org/articles/occl/abs/2017/03/occl170028s/occl170028s.html> (дата обращения: 12.11.2020).

22. Zhu, M. Research Progresses in Technological Innovation and Integration of Agricultural Engineering / M. Zhu, X. Q. Zhou, Z. F. Zhai. – DOI 10.3965/j.ijabe.20160906.2440 // International Journal

of Agricultural and Biological Engineering. – 2016. – Vol. 9, Issue 6. – Pp. 1–9. – URL: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/2440> (дата обращения: 12.11.2020).

23. Linking Models for Assessing Agricultural Land Use Change / S. Janssen, I. N. Athanasiadis, I. Bezlepina [et al.]. – DOI 10.1016/j.compag.2010.10.011 // Computers and Electronics in Agriculture. – 2011. – Vol. 76, Issue 2. – Pp. 148–160. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169910002218?via%3Dihub> (дата обращения: 12.11.2020).

24. A Component-Based Framework for Simulating Agricultural Production and Externalities / M. Donatelli, G. Russell, A. E. Rizzoli [et al.]. – DOI 10.1007/978-90-481-3619-3_4 // Brouwer F., Ittersum M. (eds). Environmental and Agricultural Modelling. – Dordrecht : Springer, 2010. – Pp. 63–108. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-90-481-3619-3_4 (дата обращения: 12.11.2020).

25. Harris, G. Integrated Assessment and Modelling: An Essential Way of Doing Science / G. Harris. – DOI 10.1016/S1364-8152(01)00058-5 // Environmental Modelling & Software. – 2002. – Vol. 17, Issue 3. – Pp. 201–207. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815201000585?via%3Dihub> (дата обращения: 12.11.2020).

26. Gerdstri, N. Applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) to Build a Strategic Framework for Technology Roadmapping / N. Gerdstri, D. F. Kocaoglu. – DOI 10.1016/j.mcm.2007.03.015 // Mathematical and Computer Modelling. – 2007. – Vol. 46, Issue 7. – Pp. 1071–1080. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717707001069?via%3Dihub> (дата обращения: 12.11.2020).

Поступила 12.06.2020; принята к публикации 10.07.2020; опубликована онлайн 30.12.2020

Об авторах:

Майстренко Николай Александрович, доцент кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1268-713X>, nmaystr@mail.ru

Уваров Виктор Петрович, доцент кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8208-222X>, ros1500@mail.ru

Левшин Александр Григорьевич, заведующий кафедрой эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>, alev200151@rambler.ru

Хорт Дмитрий Олегович, заведующий отделом технологий и машин для садоводства, виноградарства и питомниководства ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат сельскохозяйственных наук, Researcher ID: Q-2695-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6503-0065>, vim_sad@mail.ru

Воротникова Олеся Сергеевна, аспирант кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» (127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3535-8112>, vorotnikova003@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. А. Майстренко – разработка математической модели, расчет производительности разных видов и типов транспортных и транспортно-технологических средств; В. П. Уваров – разработка унифицированного алгоритма, расчет производительности разных видов и типов транспортных и транспортно-технологических средств; А. Г. Левшин – введение, обзор литературных источ-

ников, постановка цели и проблематики исследования, формулировка результатов исследования; Д. О. Хорт – определение ориентировочной нормы выработки мобильных средств, для которых не установлены нормативные показатели работы, многовариантное имитационное моделирование на ЭВМ; О. С. Воротникова – обработка статистической информации, расчет примера в соответствии с предложенным алгоритмом.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Shkel A.S., Kozlovskaya M.A., Dzotsenidze T.D. [Technology of Application of Solid Mineral Fertilizers by STA-5TM Transport and Technological Unit as a Part of Ural-432065 Specialized Automobile Chassis]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2016; (9):44-48. Available at: <https://rucont.ru/efd/458413> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
2. Zagarin D.A., Kozlovskaya M.A., Dzotsenidze T.D., et al. [Proposals for Multi-Purpose Trucks of the New Generation]. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov* = Automotive Engineers' Journal. 2016; (2):18-25. Available at: <http://www.aae-press.ru/f/97/18.pdf> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
3. Moskovkin V.V., Dzotsenidze T.D., Levshin A.G., et al. Test Studies of New-Line Agricultural-Purpose Truck Prototypes. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin* = Technology of Wheeled and Tracked Machines. 2012; (2):31-35. (In Russ.)
4. Dzotsenidze T.D. Complex Research of the New Means of Transport in Agriculture. *Vestnik KrasGAU* = Bulletin of KrasGAU. 2009; (3):152-161. Available at: <https://clck.ru/RtbgM> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
5. Izmaylov A.Yu., Dzotsenidze T.D., Yevtyushenkov N.Ye., et al. Innovative Approach in Development of Agricultural Transport Infrastructure. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin* = Technology of Wheeled and Tracked Machines. 2012; (1):23-28. (In Russ.)
6. Eydinov A.A., Dzotsenidze T.D., Zagarin D.A., et al. [Creation of a Modern Component Base as the Basis of the Country's Transport Infrastructure Development]. *Avtomobilnaya promyshlennost* = Automotive Industry. 2008; (11):3-5. Available at: <http://www.mashin.ru/files/avb08.pdf> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
7. Galkin S.N., Dzotsenidze T.D., Levshin A.G., et al. [Agrotechnical and Technological Parameters of Agricultural Vehicles]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2011; (5):3-6. Available at: <https://rucont.ru/efd/356705> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
8. Zagarin D.A., Dzotsenidze T.D. [Modeling of Wheeled Transport and Traction Machine Parameters Taking Into Account Operation in Conditions of Peasant Farms and Personal Subsidiary Farms]. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2010; (10):33-38. Available at: <https://rucont.ru/efd/356698> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
9. Izmaylov A.Yu., Artyushin A.A., Evt'yushenkov N.E., et al. Analysis of General Plow Body Tractive Resistance. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2016; (2):5-10. Available at: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/121> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
10. Khayt D. [Economic Justification for Choosing Agricultural Machines]. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika* = Agricultural Machinery. 1963; (2):10-14. (In Russ.)
11. Zagarin D.A., Shkel A.S., Kozlovskaya M.A., et al. [Some Aspects of Creating Specialized Agricultural Transport]. *Tekhnologiya kolesnykh i gusenichnykh mashin* = Technology of Wheeled and Tracked Machines. 2015; (6):6-12. (In Russ.)
12. Uvarov V.P., Levshin A.G., Maystrenko N.A. Optimum Ratio of Main Mechanized Operations for Direct-Flow Fertilizers Introduction. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2016; (4):38-43. Available at: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/144> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)

13. Izmaylov A.Yu., Yevtyushenkov N.Ye., Rozhin V.F. [Development of the Mathematical Apparatus for Modeling the Technologies for Transportation of the Breeding Crop]. *Vestnik Rossiyskoy selskokhozyaystvennoy nauki* = Bulletin of the Russian Agricultural Sciences. 2015; (6):14-16. Available at: http://www.cnshb.ru/jour/j_as.asp?id=126353 (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
14. Maystrenko N.A., Uvarov V.P. Consumer Targets of Efficient Use of Advanced Transport-And-Technological Vehicles. *Vestnik FGOU VPO "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina"* = Moscow Goryachkin Agroengineering University Bulletin. 2016; (1):44–50. Available at: <https://clck.ru/Rtcjj> (accessed 12.11.2020). (In Russ.)
15. Yeung D.W.K., Petrosyan L.A. Subgame Consistent Cooperative Solutions in Stochastic Differential Games. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 2004; 120:651-666. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JOTA.0000025714.04164.e4>
16. MacKinnon R.D., Barber G.M. Optimization Models of Transportation Network Improvement. *Progress in Human Geography*. 1977; 1(3):387-412. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/030913257700100303>
17. Khodakarami M., Mitchell K.N., Wang X.B. Modeling Maintenance Project Selection on a Multimodal Transportation Network. *Journal of the Transportation Research Board*. 2014; 2409(1):1-8. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3141/2409-01>
18. Malladi K.T., Sowlati T. Optimization of Operational Level Transportation Planning in Forestry: A Review. *International Journal of Forest Engineering*. 2017; 28(3):198-210. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2017.1362825>
19. Adamides G., Kalatzis N., Stylianou A., et al. Smart Farming Techniques for Climate Change Adaptation in Cyprus. *Atmosphere*. 2020; 11(6). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11060557>
20. Zavorotin E., Gordopolova A., Tiurina N. Method of Introducing Innovation to Land Use in Agriculture. *Baltic Journal of Economic Studies*. 2018; 4(3):74-79. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2018-4-3-74-79>
21. Maurel V.B., Huyghe Ch. Putting Agricultural Equipment and Digital Technologies at the Cutting Edge of Agroecology. *OCL – Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*. 2017; 24(3). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/ocl/2017028>
22. Zhu M., Zhou X.Q., Zhai Z.F. Research Progresses in Technological Innovation and Integration of Agricultural Engineering. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2016; 9(6):1-9. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160906.2440>
23. Janssen S., Athanasiadis I.N., Bezlepina I., et al. Linking Models for Assessing Agricultural Land Use Change. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2011; 76(2):148-160. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.10.011>
24. Donatelli M., Russell G., Rizzoli A.E., et al. A Component-Based Framework for Simulating Agricultural Production and Externalities. In: F. Brouwer, M. Ittersum (eds). *Environmental and Agricultural Modelling*. Dordrecht: Springer; 2010. Pp. 63-108. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-3619-3_4
25. Harris G. Integrated Assessment and Modelling: An Essential Way of Doing Science. *Environmental Modelling & Software*. 2002; 17(3):201-207. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00058-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00058-5)
26. Gerd Sri N., Kocaoglu D.F. Applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) to Build a Strategic Framework for Technology Roadmapping. *Mathematical and Computer Modelling*. 2007; 46(7):1071-1080. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.03.015>

Received 12.06.2020; revised 10.07.2020; published online 30.12.2020

About the authors:

Nikolay A. Maistrenko, Associate Professor of the Chair of Machine and Tractor Operation and High Technologies in Plant Production, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1268-713X>, nmaystr@mail.ru

Viktor P. Uvarov, Associate Professor of the Chair of Machine and Tractor Operation and High Technologies in Plant Production, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8208-222X>, ros1500@mail.ru

Aleksandr G. Levshin, Head of the Chair of Machine and Tractor Operation and High Technologies in Plant Production, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8010-4448>, alev200151@rambler.ru

Dmitriy O. Khort, Head of Department of Technology and Machinery for Horticulture, Viticulture and Nursery, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Cand.Sc. (Agriculture), Researcher ID: Q-2695-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6503-0065>, vim_sad@mail.ru

Olesya S. Vorotnikova, Postgraduate Student of the Chair of Machine and Tractor Operation and High Technologies in Plant Production, Russian Timiryazev State Agrarian University (49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3535-8112>, vorotnikova003@mail.ru

Contribution of the authors:

N. A. Maistrenko – development of mathematical model, calculation of performance of different transport and transport technological facilities; V. P. Uvarov – development of a unified algorithm, calculation of performance of different transport and transport technological facilities; A. G. Levshin – introduction, review of literature sources, setting the research goal and issues, formulation of research results; D. O. Khort – determination of the approximate standards of performance of vehicles, for which normative indices of work are not established, multidirectional simulation on the computer; O. S. Vorotnikova – processing of statistical information, calculation of an example according to the proposed algorithm.

All authors have read and approved the final manuscript.