

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321774>

Оригинальное исследование



# Потенциальные возможности повышения технологического уровня колесных тракторов высокой мощности

Н.И. Селиванов<sup>1</sup>, А.В. Кузнецов<sup>1,2</sup>, Н.В. Кузьмин<sup>1</sup>, В.Г. Шрам<sup>2</sup>, Ю.Ф. Кайзер<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Российская Федерация;<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Решение проблемы эффективного использования энергонасыщенных колесных 4к4б тракторов высокой мощности (235–350 кВт) российского производства, представляющих основу формирования инновационного парка мобильных энергетических средств регионов Сибирского федерального округа, в зональных технологиях почвообработки с ограниченными по требованиям агротехники и ресурсосбережения скоростными диапазонами, является актуальной задачей.

**Цель работы** — определение условий рациональной комплектации колесных 4к4б тракторов для операционных технологий почвообработки.

**Материалы и методы.** В основу решения поставленных задач для достижения заявленной цели положены условия и методы многоуровневой системы технологической адаптации колесных тракторов.

**Результаты.** По результатам моделирования и эксперимента определено, что наиболее рациональным по минимуму трудозатрат и уровню реализации потенциальных возможностей методом адаптации тракторов к технологиям почвообработки является формирование эксплуатационной массы базовой комплектации в номинальном режиме, соответствующей оптимальным значениям удельной массы при  $\phi_{КРН}^* = 0,40$  и  $V_{H2} = 2,90$  м/с на одинарных  $m_{удн1}^* = 58,0$  кг/кВт и сдвоенных  $m_{удн2}^* = 62,4$  кг/кВт колесах, с регулируемым распределением по осям. Научная новизна исследования заключается в построении модели, позволяющую установить рациональный тяговый диапазон трактора разной комплектации для операционных технологий почвообработки с интервалом номинальных рабочих скоростей 2,5–3,3 м/с, ограниченный по условиям ресурсосбережения режимами максимального тягового КПД и допустимого буксования.

**Заключение.** Практическая ценность исследования заключается в возможности использования разработанных рекомендаций по рациональной комплектации тракторов на операциях почвообработки.

**Ключевые слова:** колесные тракторы; технологии почвообработки; методы адаптации; удельная масса.

## Как цитировать:

Селиванов Н.И., Кузнецов А.В., Кузьмин Н.В., Шрам В.Г., Кайзер Ю.Ф. Потенциальные возможности повышения технологического уровня колесных тракторов высокой мощности // Тракторы и сельхозмашины. 2023. Т. 90, № 4. С. 351–359. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321774>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321774>

Original Study Article

# Capabilities for increasing the technological level of high-power wheeled tractors

Nikolay I. Selivanov<sup>1</sup>, Alexander V. Kuznetsov<sup>1,2</sup>, Nikolay V. Kuzmin<sup>1</sup>,  
Vyacheslav G. Shram<sup>2</sup>, Yuriy F. Kaiser<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russian Federation;

<sup>2</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Solving the problem of efficient use of the Russian-produced energy-saturated 4K4b wheeled tractors of high (235–350 kW) power, which are the basis for the formation of an innovative fleet of mobile energy facilities in the regions of the Siberian Federal District, in zonal tillage technologies with velocity ranges limited by the requirements of agricultural technology and resource saving, is a relevant task.

**AIMS:** Determination the conditions for the reasonable configuration of the 4K4b wheeled tractors for operational tillage technologies.

**METHODS:** The basis for solving the problems to achieve the aim is the conditions and methods of a multi-level system of technological adaptation of wheeled tractors.

**RESULTS:** Based on the results of simulation and experiment, it was determined that the most reasonable method for adapting tractors to tillage technologies in terms of minimum labor costs and the level of capabilities implementation is the formation of the operating mass of the basic configuration at the nominal mode, corresponding to the optimal values of the specific mass at  $\phi_{KPH}^* = 0.40$  and  $V_{H2} = 2.90$  m/s which are  $m_{y\partial H1}^* = 58.0$  kg/kW for single wheels and  $m_{y\partial H2}^* = 62.4$  kg/kW for dual wheels, with adjustable axle distribution. The scientific novelty of the study lies in building the model that helps to establish a reasonable traction range of a tractor of various configurations for operational tillage technologies with an interval of nominal operating velocities of 2.5–3.3 m/s, limited by the conditions of resource saving by the modes of maximum traction efficiency and acceptable slipping.

**CONCLUSIONS:** The practical value of the study lies in the possibility of using the developed recommendations for the reasonable configuration of tractors in tillage operations.

**Keywords:** wheeled tractors; tillage technologies; adaptation methods; specific mass.

## To cite this article:

Selivanov NI, Kuznetsov AV, Kuzmin NV, Shram VG, Kaiser YuF. Capabilities for increasing the technological level of high-power wheeled tractors. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(4):351–359. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-321774>

Received: 21.03.2023

Accepted: 01.06.2023

Published online: 15.09.2023

## ВВЕДЕНИЕ

Формирование инновационного тракторного парка в сельском хозяйстве основных товаропроизводителей продукции растениеводства страны предусматривает переход на новые и модернизированные существующие модели энергонасыщенных колесных тракторов, адаптированные к природно-производственным условиям регионов. С учетом природных и производственно-экономических факторов [1] основу переоснащения тракторного парка в Красноярском крае и других регионах Сибирского федерального округа (СФО) для зональных технологий возделывания зерновых представляют модельные ряды колесных 4к4б тракторов высокой (235–350 кВт) мощности российского производства К7–Кировец ЗАО «ПТЗ» и РСМ ООО «Ростсельмаш» с мехатронными системами управления и навигации [2, 3].

Определяющим параметром трактора тяговой концепции является номинальное тяговое усилие  $P_{кр\ n}$  в соответствии с которым формируется набор рабочих машин и состав агрегатов для операционных технологий почвообработки разных по энергоемкости групп. Стабильность этого показателя, не зависимо от уровня энергонасыщенности и комплектации, является основополагающей в существующей и перспективной системах построения типажа и агрегатирования тракторов. С ростом энергонасыщенности трактора тяговой концепции условие реализации  $P_{кр\ n}$  и эксплуатационной мощности  $N_{вэ}$  смещается в зону более высоких скоростей с одновременным возрастанием скоростного диапазона при неполном использовании мощности двигателя, в котором тяговые показатели ограничены по сцеплению.

Проблема эффективного использования энергонасыщенных тракторов разной базовой комплектации на одинарных (1к) и сдвоенных (2к) колесах в технологиях почвообработки с ограниченными по требованиям агротехники и ресурсосбережения скоростными диапазонами, приобрела в настоящее время особую актуальность и требует решения с учетом возможности реализации разработанных изготовителями рекомендаций в условиях производственной эксплуатации.

## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы — определение условий рациональной комплектации колесных 4к4б тракторов для операционных технологий почвообработки.

Объект исследования — процесс формирования параметров-адаптеров колесных тракторов к операционным технологиям почвообработки.

Достижение поставленной цели предусматривает решение следующих задач:

1. установить условия реализации потенциальных возможностей тракторов в технологиях почвообработки;

2. дать сравнительную оценку эффективности используемых методов адаптации тракторов к операционным технологиям почвообработки;
3. разработать рекомендации по рациональной комплектации тракторов на операциях почвообработки.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основу решения задач для достижения поставленной цели положены условия и методы [4–6] многоуровневой системы технологической адаптации колесных тракторов:

1. Рациональный по агротребованиям и ресурсосбережению скоростной диапазон современных и перспективных почвообрабатывающих агрегатов находится в пределах  $(V_{\min} - V_{\max})^* = 2,0 - 3,9$  м/с (7–14 км/ч) при номинальных значениях рабочей скорости для установленных групп операций:  $V_{H1}^* = 2,50$  м/с (9,0 км/ч);  $V_{H2}^* = 2,90$  м/с (10,5 км/ч);  $V_{H3}^* = 3,33$  м/с (12,0 км/ч).
2. Зона максимального тягового КПД на потенциальной тяговой характеристике колесного 4к4 трактора в стандартных условиях, не зависимо от комплектации и уровня энергонасыщенности, ограничена режимом  $\bar{\varphi}_{кр\ min}^* = 0,36$  максимального значения  $\bar{\eta}_{т\ max}^* = 0,665$  (1к)–0,715 (2к) при  $P_{кр\ min}^* = m_3 \cdot g \cdot \bar{\varphi}_{кр\ min}^*$  и предельно-допустимым буксование  $\delta_{пр} = 0,16$ , соответствующим режиму  $\bar{\varphi}_{кр} = 0,47$  (1к)–0,49 (2к) и  $P_{кр\ \delta} = m_3 \cdot g \cdot \bar{\varphi}_{кр\ \delta}^*$  по условиям сцепления движителя.
3. Номинальный тяговый режим трактора  $\varphi_{кр\ n}^* = 0,40$  при  $\eta_{тн}^* \rightarrow \eta_{тн\ max}^*$  определяет значение основного классификационного показателя  $P_{кр\ n}^* = 3,92 \cdot m_3 \cdot 10^{-3}$  (кН) и является базовым для оптимизации главного параметра-адаптера к операционным технологиям —

удельной массы  $m_3 = \frac{m_3}{N_{вэ}}$  (кг/кВт) в рациональном

тяговом диапазоне, ограниченном  $\varphi_{кр\ min}^*$  и  $\varphi_{кр\ max}^* = 0,45$  при  $\delta_{max} \leq \delta_{пр}$  и  $\eta_{тд} \leq \eta_{тн}$ .

Условием полной реализации мощности  $N_{вэ}$  трактора любой комплектации в рациональном тяговом диапазоне  $(P_{кр\ max} - P_{кр\ min})^*$  и интервале номинальных значений  $(V_{H\ min} - V_{H\ max})^*$  является равенство соотношений [7]:

$$N_{вэ} = \frac{P_{кр\ max}^* \cdot V_{H\ min}}{\eta_{тд}} = \frac{P_{кр\ min}^* \cdot V_{H\ max}}{\eta_{тн\ max}} = \frac{P_{кр\ n}^* \cdot V_H^*}{\eta_{тн}} = \frac{P_{кр\ 1\ max} \cdot V_{\min}}{\eta_{т\ \delta}} = \frac{P_{кр\ \delta} \cdot V_{\delta}}{\eta_{т\ \delta}}, \quad (1)$$

где  $P_{кр\ \delta}$ ,  $V_{\delta} = 2,0$  м/с,  $\eta_{т\ \delta}$  — показатели при  $\delta_{пр}$ ;  $V_{\min} = 2,20$  — минимальная рабочая скорость на операциях первой группы при  $\delta_{пр}$  и  $P_{кр\ 1\ max} = P_{кр\ \delta} \cdot \frac{V_{\delta}}{V_{\min}}$ .

Применительно к единичной мощности  $N_{вэ} = 1,0$  кВт и  $P_{уд} = m_{уд} \cdot g \cdot \varphi_{кр} \cdot 10^{-3}$  выражение (1) примет вид:

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{(m_{уд} \cdot \varphi_{кр})_{\max}^* \cdot V_{H \min}^*}{\eta_{тд}} = \\ \frac{(m_{уд} \cdot \varphi_{кр})_{\min}^* \cdot V_{H \max}^*}{\eta_{т \max}} = \\ \frac{(m_{уд} \cdot \varphi_{кр})_H^* \cdot V_H^*}{\eta_{тi}^*} = \\ \frac{(m_{уд} \cdot \varphi_{кр})_{\delta}^* \cdot V_{\min}}{\eta_{т\delta}} = \\ \frac{(m_{уд} \cdot \varphi_{кр})_{\delta}^* \cdot V_{\delta}}{\eta_{т\delta}} = \end{array} \right] \cdot g \cdot 10^{-3} = 1,0. \quad (2)$$

При установленных значениях  $V_{Hi}$  и зависимостях  $\eta_{тi} = f(\varphi_{кр})$  оптимальные уровни удельных параметров-адаптеров  $m_{уд}^*$  (кг/кВт) и  $P_{уд}^*$  (кН/кВт) для каждой группы операций:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{удi}^* = \frac{\eta_{тi}}{g \cdot \varphi_{крi}^* \cdot V_{Hi}^* \cdot 10^{-3}}; \\ P_{удi}^* = m_{удi}^* \cdot g \cdot \varphi_{крi}^* \cdot 10^{-3} = \frac{\eta_{тi}}{V_{Hi}^*}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Приняв номинальный тяговый режим  $\varphi_{крн}^* = 0,40$  с  $m_{уд \max}^* = m_{удн}^* = \frac{\eta_{тн}}{g \cdot \varphi_{крн}^* \cdot V_{H1}^* \cdot 10^{-3}}$  на операциях пер-

вой группы за базовый, оптимальные соотношения удельных параметров для разных групп операций и комплекций соответственно примут вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda m_{удi}^* = m_{удi}^* m_{удн}^* = \left( \frac{\lambda \eta_{тн}}{\lambda \varphi_{крн}^* \cdot \lambda V_{H1}^*} \right)_i \leq 1,0; \\ \lambda P_{удi}^* = \frac{P_{удi}^*}{P_{удн}^*} = \left( \frac{\lambda \eta_{тн}}{\lambda V_{H1}^*} \right)_i \leq 1,0; \\ \lambda m_{удк}^* = m_{уд2к}^* m_{уд1к}^* = (\lambda \eta_{тн} \cdot \lambda \varphi_{крн}^*)_k > 1,0. \end{array} \right. \quad (4)$$

Превышение фактического значения удельной массы  $m_{удi}^{\phi}$  оптимального  $m_{удi}^*$  приводит к смещению тягового режима  $\varphi_{крi}^*$ , соответствующего  $V_{Hi}^*$ , в зону  $\varphi_{крi}^{\phi} < \varphi_{крi}^*$  и наоборот, при  $m_{удi}^{\phi} < m_{удi}^* \cdot \varphi_{крi}^* > \varphi_{крi}^*$ .

Степень реализации потенциальных возможностей трактора любой комплекции в технологиях почвообработки при установленных значениях  $m_{удн}^*$ ,  $m_{удi}^*$  и  $m_{удi}^{\phi}$  характеризует комплексный показатель  $K_{\mathcal{E}}$  [5], представляющий произведение частных критериев эффективности по производительности  $K_W = \lambda \cdot \eta_{тд}$ ,

эксплуатационной массе  $K_m = (2 - \lambda \cdot m_{уд})$  и расходу топлива  $K_E = \left( 2 - \frac{1}{\lambda \eta_{т}^2} \right)$ :

$$K_{\mathcal{E}} = K_W \cdot K_m \cdot K_E \geq K_{\mathcal{E} \min}^*. \quad (5)$$

Из условия, что  $K_{\mathcal{E} \max} = 1,0$ , при  $\lambda \eta_{т} > 1,0$  и  $\lambda m_{уд} \leq 1,0$  приняты ограничения  $K_W = K_m = K_E = 1,0$ .

Для сравнительной оценки технологического уровня трактора на сдвоенных и одинарных колесах выражение (5) имеет вид

$$\lambda K_{\mathcal{E}K} = \frac{K_{\mathcal{E}2K}}{K_{\mathcal{E}1K}} = (\lambda K_W \cdot \lambda K_m \cdot \lambda K_E)_K. \quad (6)$$

Базовая комплекция колёсных 4к4б тракторов характеризуется оснащением одинарными (1к) или сдвоенными (2к) колесами. Установка сдвоенных колес является достаточно простым и эффективным способом решения задачи реализации мощности энергонасыщенных тракторов путем существенного повышения и регулирования эксплуатационной массы с одновременным увеличением навесоспособности и снижением удельного давления на почву. Применительно к модельным рядам тракторов «Кировец» и РСМ [2–5] повышение  $m_{\mathcal{E} \max}$  за счёт комплекта шин 800/65R32 и 710/70R38 массой  $m_{2к} = 2200$  кг достигает 13–14% при одновременном снижении удельного давления на 43% и потерь на перекачивание до 27% с незначительным (1,5–2,0%) уменьшением абсциссы центра масс.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам моделирования, с использованием уравнений (4) и экспериментальных зависимостей  $\eta_{т} = f(\varphi_{кр})$  указанных тракторов разной комплекции (табл. 1) [5], установлены номинальные для каждой группы операций значения удельных параметров  $m_{удн}^*$  и  $P_{удн}^*$  при  $\varphi_{крн}^* = 0,40$  и допустимые интервалы их изменения в пределах рационального тягового диапазона  $\varphi_{кр \min}^* < \varphi_{крн}^* < \varphi_{кр \max}^*$ .

Полученные зависимости позволили дать сравнительную оценку эффективности и целесообразности наиболее применяемых способов реализации потенциальных возможностей указанных тракторов (табл. 2) в операционных технологиях почвообработки.

Первый вариант характеризует трактор с постоянной удельной массой для одинарных 67,3\* кг/кВт и сдвоенных 72,4\* кг/кВт колес при  $\varphi_{крн}^* = 0,40$  и номинальной скорости  $V_{H1}^* = 2,50$  м/с на операциях первой группы, соответствующей  $m_{\mathcal{E}}^* = 255 \cdot P_{крн}^*$  (кН) и  $A_{ц}^* = 0,57$  (1к)/0,56 (2к). Указанная комплекция обеспечивает функционирование трактора в тяговом диапазоне ( $\varphi_{кр \delta}^* - \varphi_{кр \min}^*$ ) с интервалом рабочих

**Таблица 1.** Удельные параметры-адаптеры колёсных 4к4б тракторов разной комплектации к технологиям почвообработки

**Table 1.** Specific parameters-adapters of the 4K4b wheeled tractors of various configurations to tillage technologies

Тяговый режим (усилие)	Комплектация	$\bar{\varphi}_{кр}$	$\bar{\eta}_т$	$\bar{m}_{уд}^*$ , кг/кВт				
				$V_{H1}=2,50$ м/с	$V_{H2}=2,90$ м/с	$V_{H3}=3,33$ м/с	$V_{min}=2,20$ м/с	$V_{\delta}=2,0$ м/с
$\varphi_{кр min}^*$	1 к	0,360	0,665	75,3	64,9	56,5	85,5	94,1
	2 к	0,360	0,715	81,0	69,8	60,8	92,1	101,3
$\varphi_{кр n}^*$	1 к	0,400	0,660	67,3	58,0	50,5	76,5	84,1
	2 к	0,400	0,710	72,4	62,4	54,3	82,3	90,5
$\varphi_{кр max}^*$	1 к	0,450	0,640	58,0	50,2	43,5	66,4	73,1
	2 к	0,450	0,690	62,3	53,7	46,8	71,4	78,5
$\varphi_{кр \delta}$	1 к	0,470	0,633	54,9	47,3	41,2	62,4	68,6
	2 к	0,490	0,683	56,8	49,0	42,7	64,3	70,7

**Таблица 2.** Показатели технологического уровня колёсных 4к4б тракторов разной комплектации

**Table 2.** Indicators of the technological level of the 4K4b wheeled tractors of various configurations

Комплектация (эксплуатационная масса)	Параметры	Значения параметров (1к/2к)				
		$V_{H1}=2,50$ м/с	$V_{H2}=2,90$ м/с	$V_{H3}=3,33$ м/с	$V_{min}=2,20$ м/с	$V_{\delta}=2,0$ м/с
Постоянная $m_{Э max}^* = m_{Э H1}^* = 255P_{кр n}$ , кг	$m_{уд n}^*$ , кг/кВт	<u>67,3</u>	<u>67,3</u>	<u>67,3</u>	<u>67,3</u>	<u>67,3</u>
		72,4	72,4	72,4	72,4	72,4
	$\bar{\varphi}_{кр n}$	0,400	0,347	0,296	0,444	<u>0,470</u> 0,485
		<u>0,660</u> 0,710	<u>0,665</u> 0,715	<u>0,650</u> 0,700	<u>0,645</u> 0,693	<u>0,633</u> 0,684
	$P_{уд}$ , кН/кВт	<u>0,265</u> 0,284	<u>0,229</u> 0,245	<u>0,195</u> 0,210	<u>0,293</u> 0,315	<u>0,310</u> 0,344
		$A_{ц}^*$	0,59/0,58	0,59/0,58	0,59/0,58	0,59/0,58
	$\bar{K}_W$	1,0	1,0	0,985	0,977	0,960
	$\bar{K}_E$	1,0	1,0	0,970	0,953	0,920
	$\bar{K}_m$	1,0	0,840	0,667	1,0	1,0
	$\bar{K}_{\ominus}$	1,0	0,840	0,637	0,931	0,887
$\lambda \bar{K}_{ЭК}$	1,128	1,128	1,130	1,127	1,109	
Регулируемая съёмным балластом $m_{Э max}^* = m_{Э H1}^*$ $m_{Э H1}^* = \frac{m_{Э H1}^*}{\lambda V_{H1}} = 255P_{кр ni}$	$m_{уд}^*$ , кг/кВт	<u>67,3</u>	<u>58,0</u>	<u>50,5</u>	<u>67,3</u>	<u>67,3</u>
		72,4	62,4	54,3	72,4	72,3
	$\bar{\varphi}_{кр n}$	0,40	0,40	0,40	0,444	<u>0,470</u> 0,485
		<u>0,660</u> 0,710	<u>0,660</u> 0,710	<u>0,660</u> 0,710	<u>0,645</u> 0,693	<u>0,633</u> 0,684
	$P_{уд}$ , кН/кВт	<u>0,265</u> 0,284	<u>0,228</u> 0,245	<u>0,198</u> 0,213	<u>0,293</u> 0,315	<u>0,310</u> 0,344
		$m_{Буд}^*$	<u>16,8</u> 18,1	<u>7,5</u> 8,1	<u>0</u> 0	<u>16,8</u> 18,1
	$A_{ц}^*$	<u>0,61</u> 0,60	<u>0,57</u> 0,56	<u>0,57</u> 0,56	<u>0,61</u> 0,60	<u>0,61</u> 0,60
		$\bar{K}_{\ominus}$	1,0	1,0	1,0	0,931
	$\lambda \bar{K}_{ЭК}$	1,128	1,128	1,130	1,127	1,110

Таблица 2. Окончание

Table 2. Ending

Комплектация (эксплуатационная масса)	Параметры	Значения параметров (1к/2к)				
		$V_{H1}=2,50$ м/с	$V_{H2}=2,90$ м/с	$V_{H3}=3,33$ м/с	$V_{min}=2,20$ м/с	$V_{\delta}=2,0$ м/с
Постоянная с регулируемым распределением по осям съемным балластом	$m_{удн}^*$ , кг/кВт	58,0	58,0	58,0	62,4*	68,6*
		62,4	62,4	62,4	64,3*	70,7*
$m_{Буд}^*$ (0,07 – 0,08) $\bar{m}_{уд}^*$	$\bar{\Phi}_{крн}$	0,450	0,400	0,350	0,470	0,470
					0,485	0,490
	$\bar{\eta}_{тн}$	0,645	0,660	0,665	0,633	0,633
		0,693	0,710	0,715	0,683	0,683
	$P_{уд}$ , кН/кВт	0,256	0,228	0,199	0,288	0,316
		0,275	0,245	0,214	0,311	0,342
	$A_{ц}^*$	0,61/0,60	0,57/0,56	0,57/0,56	0,61/0,60	0,61/0,60
	$\bar{K}_W$	0,977	1,0	1,0	0,961	0,961
	$\bar{K}_E$	0,952	1,0	1,0	0,917	0,917
	$\bar{K}_m$	1,0	1,0	0,852	1,0	1,0
	$\bar{K}_{\Sigma}$	0,930	1,0	0,852	0,881	0,881
	$\lambda \bar{K}_{ЭК}$	1,128	1,128	1,130	1,110	1,110

скоростей (2,0–2,8) м/с, соответствующим операциям 1–2 групп скоростных ( $V_{min1} = 2,2$  м/с) и специальных ( $V_{\delta} = 2,0$  м/с) агрегатов при  $\bar{K}_{\Sigma} = 0,887 - 1,00$ . На операциях 2 и 3 групп, за счёт смещения тягового режима в зону  $\Phi_{кр\ min} < \Phi_{кр\ min}^* \bar{K}_{\Sigma} = 0,840 - 0,637$ , что является нерациональным из-за превышения  $m_{уд}^*$  до 33%. Комплектация сдвоенными колесами на всех тягово-скоростных режимах, кроме  $\Phi_{кр\ \delta}$ , обеспечивает повышение технологического уровня трактора до  $\lambda \bar{K}_{ЭК} = 1,128$ . К указанной категории следует отнести тракторы К-730 и К-735 серии К-7 с одинарными колесами в базовой комплектации [8].

Второй вариант представляет трактор с широким диапазоном регулирования удельной массы за счёт съёмного балласта от  $m_{уд\ min}^* = m_{уд3}^* = 50,5$  (1к)–54,3 (2к) кг/кВт при  $m_{уд} = 0$  до  $m_{уд\ max}^* = m_{уд1}^* = 67,3$  (1к)–72,4 (2к) кг/кВт с полным балластом  $m_{Буд\ max}^* = m_{уд3}^* = 16,8$ (1к)–18,1(2к) кг/кВт для использования на операциях почвообработки разных групп в зоне  $\Phi_{кр\ н}^* = 0,40$  при  $\bar{K}_{\Sigma} = 1,0$  и стабильности показателя  $\lambda \bar{K}_{ЭК}$ . Для работы в составе навесных агрегатов при  $V=2,0-3,0$  м/с изменение абсциссы центра масс до  $A_{ц}^* = 0,61/0,60$  достигается за счет перемещения части балластных грузов с учетом их расположения при сохранении величины  $m_{уд1}^*$ . При этом, трактор мощностью  $N_{вз} \geq 200$  кВт с полным балластом независимо от комплектации переходит в повышенный тяговый класс. Указанный вариант является наиболее оптимальным для реализации потенциальных возможностей

трактора в технологиях почвообработки, однако требует дополнительных затрат и квалификации механизатора для его адаптации к условиям эксплуатации. Эта категория представлена тракторами РСМ 2 и 3 серий на сдвоенных колесах в базовой комплектации при максимальной массе съёмного балласта  $m_{Б\ max}^* = (0,20 - 0,25 \cdot m_{\Sigma}^*)$ .

Сдвигание колес полной массой  $m_{2к} = 2200$  [2–3] обеспечивает во всех вариантах увеличение номинального тягового усилия на 8,63 кН, что является определяющим для перехода трактора в смежный повышенный (до 6) тяговый класс. Переход трактора из 6-го тягового класса в 8-ой при сдвигании колес возможен за счет установки дополнительного балласта массой не менее 2400 кг.

В качестве третьего варианта рассмотрен трактор любой базовой комплектации с постоянной величиной и регулируемым распределением по осям удельной массы  $\bar{m}_{уд}^* = 58,0$  (1к)–62,4 (2к) кг/кВт за счет перемещаемого съёмного балласта  $m_{Буд}^* = (0,075 - 0,085) \bar{m}_{уд}^*$  при номинальном тягово-скоростном режиме, соответствующем  $\Phi_{кр\ н}^* = 0,40$  и  $V_{H2} = 2,90$  м/с. Установленные значения  $\bar{m}_{уд}^*$  обеспечивает функционирование трактора на операциях всех групп в тяговом диапазоне  $(\Phi_{кр\ min} - \Phi_{кр\ max})^*$  при  $\bar{K}_{\Sigma} = 0,852 - 1,00$ . Увеличение абсциссы центра масс до  $A_{ц}^* = 0,61/0,60$  на операциях первой группы достигается перемещением части заднего балласта в зону переднего. Для реализации потенциальных возможностей в интервале  $(V_{\delta} - V_{min}) = 2,0 - 2,2$  м/с при  $\bar{K}_{\Sigma} > R_{\Sigma\ min}$  исполь-

зуется ГСВ из условия  $\bar{m}_{ГСВуд}^* = (0,107 - 0,110) \cdot \bar{m}_{уд}^*$ . Этот вариант адаптации трактора к производственным условиям имеет существенные преимущества перед рассмотренными выше по показателям технологического уровня и необходимых для реализации затрат. В несколько упрощенном виде он применяется при настройке тракторов К-739, К-740 и К-742 для выполнения конкретных операций на сдвоенных колесах.

Приведенные результаты моделирования показывают, что использование потенциальных возможностей повышения технологического уровня колесных тракторов высокой мощности при достигнутых скоростных интервалах выполнения операций почвообработки и посева по агротехническим требованиям и энергозатратам невозможны без регулирования эксплуатационной массы установкой балласта и сдвоенных колес. Выполнение этих операций существенно повышает трудоемкость эксплуатации тракторов, требует более высокого профессионального уровня механизаторов и применения дополнительных технических средств для подготовительных работ по регулированию параметров — адаптеров до начала технологического процесса. С учетом оценочных показателей эффективности основных методов и уровня балластирования в основу адаптации следует положить последний вариант с использованием в качестве базовой комплектации трактора сдвоенные колеса с регулируемой установкой съёмного балласта  $\bar{m}_{Буд}^* = (0,07 - 0,09) \bar{m}_{уд}^*$ .

## ВЫВОДЫ

1. Рациональный тяговый диапазон трактора 4к4б разной комплектации для операционных технологий почвообработки с интервалом номинальных рабочих скоростей 2,5–3,3 м/с по условиям ресурсосбережения ограничен в пределах зоны максимального тягового КПД режимами  $\varphi_{кр\min}^* (\eta_{т\max}) - \varphi_{кр\max}^* (\delta_d) = 0,36 - 0,45$  при допустимом снижении комплексного показателя технологичности  $\bar{K}_{Э\min} \geq 0,880$ .
2. Наиболее эффективным по минимуму трудозатрат и уровню реализации потенциальных возможностей методом адаптации трактора к технологиям почвообработки является формирование эксплуатационной массы базовой комплектации при  $\varphi_{кр}^* = 0,40$  и  $V_{Н2} = 2,90$  м/с с регулируемым распределением по осям входящей в неё массы съёмного балласта, соответствующей оптимальным значением удельного параметра-адаптера на одинарных  $m_{удн1}^* = 58,0$  кг/кВт и сдвоенных  $m_{удн2}^* = 62,4$  кг/кВт колёсах при  $m_{Буд}^* = (0,075 - 0,080) m_{удн}^*$  и обеспечивающей  $\bar{K}_{Э} = 0,852 - 1,00$ .
3. С учетом тенденций развития и ограниченных скоростных интервалов операционных технологии

почвообработки в основу базовой комплектации колесных 4к4б тракторов следует положить удельную массу  $m_{удн2}^* = 62 - 63$  кг/кВт на сдвоенных колёсах, включающую съёмный балласт  $m_{Буд}^* = 5,0 - 5,5$  кг/кВт с регулируемым распределением по осям и использование при  $V_{\min} \leq 2,0 - 2,2$  м/с с навесным оборудованием гидроувеличителя сцепного веса (ГСВ) из расчёта  $m_{ГСВуд}^* = 0,107 - 0,110 m_{удн2}^*$ .

## ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Вклад авторов.** Н.И. Селиванов, А.В. Кузнецов, Н.В. Кузьмин — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; В.Г. Шрам, Ю.Ф. Кайзер — редактирование текста рукописи, создание изображений; Н.И. Селиванов — экспертная оценка, утверждение финальной версии. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Исследование выполнены при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» в ходе выполнения проекта «Разработка рекомендаций по устойчивому развитию технической оснащенности растениеводства в сельском хозяйстве Красноярского края».

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** N.I. Selivanov, A.V. Kuznetsov, N.V. Kuzmin — search for publications, writing the text of the manuscript; V.G. Shram, Yu.F. Kaiser — editing the text of the manuscript; N.I. Selivanov — expert opinion, approval of the final version. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding source.** The research was carried out with the financial support of the Krasnoyarsk Regional Fund for Support of Scientific and Scientific-Technical Activities during the implementation of the project "Development of recommendations for the sustainable development of technical equipment for crop production in agriculture in the Krasnoyarsk Territory".

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селиванов Н.И., Кузнецов А.В., Кузьмин Н.В. Типоразмеры колесных тракторов и состав почвообрабатывающих агрегатов для Восточно-Сибирской агрозоны // Вестник АГАУ. 2022. № 3 (209). С. 94–101. doi: 10.53083/1996-4277-2022-209-3-94-101
2. Тракторы «Кировец» К-744Р, К-744Р1, К-744Р2, К-744Р3. Инструкция по эксплуатации 744Р-0000010. ИЭ. ЗАО «Петербургский тракторный завод». Санкт-Петербург. [дата обращения: 21.03.2023] Режим доступа: [https://zinref.ru/000\\_uchebniki/05300\\_traktora/004\\_00\\_00\\_Kirovec\\_k\\_744\\_r\\_rukovodstvo/000.htm](https://zinref.ru/000_uchebniki/05300_traktora/004_00_00_Kirovec_k_744_r_rukovodstvo/000.htm).
3. Инструкция по эксплуатации Versatile 435, 485, 535 -89002113. Buhler Versatile Inc. Виннипег, Манитоба, Канада, 2009. [дата обращения: 21.03.2023] Режим доступа: <https://hostozavr.com/files/traktora/rukovodstvo-po-jekspluatacii-traktorov-versatile-435-485-535.pdf>.
4. ГОСТ 27021-86 Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Тяговые классы. М: ИПК Издательство стандартов, 1986. [дата обращения: 21.03.2023] Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200009845>
5. Запрудский В.Н., Макеева Ю.Н. Оценка эффективности использования колесных тракторов высокой мощности на основной обработке почвы // Вестник КрасГАУ. 2016. № 5. С. 117–122. [дата обращения: 21.03.2023] Режим доступа: [http://www.kgau.ru/vestnik/2016\\_5/content/18.pdf](http://www.kgau.ru/vestnik/2016_5/content/18.pdf)
6. Селиванов Н.И., Запрудский В.Н., Макеева Ю.Н., и др. Рациональный тяговый диапазон использования колесных тракторов // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ. Часть 2. Наука: опыт, проблемы, перспективы развития. Красноярск: КрасГАУ, 2022. С. 115–119.
7. Либцис С.Е. Потенциальные возможности использования мощности энергонасыщенных тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 1986. № 9. С. 8–16.
8. Глушков Р.В., Крылов А.В., Кузнецова П.А. Методика определения энергозатрат опытного образца культиватора // Ресурсосберегающие технологии в агропромышленном комплексе России. Материалы III Международной научной конференции. Красноярск, 2022. С. 319–323.

## REFERENCES

1. Selivanov NI, Kuznetsov AV, Kuzmin NV. Standard sizes of wheeled tractors and the composition of tillage units for the East Siberian agrozone. *Vestnik AGAU*. 2022;3(209):94–101. (in Russ). doi: 10.53083/1996-4277-2022-209-3-94-101
2. Tractors “Kirovets” K-744R, K-744R1, K-744R2, K-744R3. Operating instructions 744R-0000010 IE.2. Tractors “Kirovets” K-744R, K-744R1, K-744R2, K-744R3. Operating Instructions 744P-0000010. IE. CJSC “Petersburg Tractor Plant” Saint Petersburg. (in Russ). Accessed: 21.03.2023. Available from: [https://zinref.ru/000\\_uchebniki/05300\\_traktora/004\\_00\\_00\\_Kirovec\\_k\\_744\\_r\\_rukovodstvo/000.htm](https://zinref.ru/000_uchebniki/05300_traktora/004_00_00_Kirovec_k_744_r_rukovodstvo/000.htm)
3. Operating instruction3.s Operating Instructions Versatile 435, 485, 535 -89002113. Buhler Versatile Inc. Winnipeg, Manitoba, Canada, 2009. (in Russ). Accessed: 21.03.2023. Available from: <https://hostozavr.com/files/traktora/rukovodstvo-po-jekspluatacii-traktorov-versatile-435-485-535.pdf>.
4. GOST 27021-86 Traktory selskokhozyaystvennyye i lesokhozyaystvennyye. Tyagovye klassy. Moscow: IPK Izdatelstvo standartov; 1986. (in Russ). Accessed: 21.03.2023. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200009845>
5. Zaprudsky VN, Makeeva YuN. Evaluation of the effectiveness of the use of wheeled tractors of high power on the main tillage. *Vestnik KrasGAU*. 2016;5:117–122. (in Russ). Accessed: 21.03.2023. Available from: [http://www.kgau.ru/vestnik/2016\\_5/content/18.pdf](http://www.kgau.ru/vestnik/2016_5/content/18.pdf)
6. Selivanov NI, Zaprudsky VN, Makeeva YuN, et al. Rational traction range for the use of wheeled tractors. In: *Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of Krasnoyarsk State Agrarian University. Part 2. Science: experience, problems, development prospects*. Krasnoyarsk: KrasGAU; 2022:115–119. (in Russ).
7. Libtsis SE. Potential possibilities of using the power of energy-saturated tractors. *Tractors and agricultural machinery*. 1986;9:8–16. (in Russ).
8. Glushkov RV, Krylov AV, Kuznetsova PA. Method for determining the energy consumption of a prototype cultivator. In: *Resource-saving technologies in the agro-industrial complex of Russia. Proceedings of the III International Scientific Conference*. Krasnoyarsk; 2022:319–323. (in Russ).

## ОБ АВТОРАХ

\* **Шрам Вячеслав Геннадьевич**,  
доцент, канд. техн. наук,  
доцент кафедры топливообеспечения  
и горюче-смазочных материалов;  
адрес: Российская Федерация, 660041, Красноярск,  
пр-т Свободный, д. 82. стр. 6;  
ORCID: 0000-0002-1415-1737;  
eLibrary SPIN: 4003-3010;  
e-mail: shram18rus@mail.ru

## AUTHORS' INFO

\* **Vyacheslav G. Shram**,  
Associate Professor, Cand. Sci. (Tech.),  
Associate Professor of the Fuel Supply  
and Fuels & Lubricants Department;  
address: 82 bldg 6, Svobodny Avenue, 660041 Krasnoyarsk,  
Russian Federation;  
ORCID: 0000-0002-1415-1737;  
eLibrary SPIN: 4003-3010;  
e-mail: shram18rus@mail.ru

**Селиванов Николай Иванович,**

профессор, д-р техн. наук,  
профессор кафедры «Тракторы и автомобили»;  
ORCID: 0000-0003-1595-1266;  
eLibrary SPIN: 8026-5097;  
e-mail: zaprudskii@list.ru

**Кузнецов Александр Вадимович,**

доцент, канд. техн. наук,  
заведующий кафедрой «Тракторы и автомобили»;  
ORCID: 0000-0002-6252-1464;  
eLibrary SPIN: 8637-4667;  
e-mail: kuznetsov1223@yandex.ru

**Кузьмин Николай Владимирович,**

доцент, канд. техн. наук,  
директор института инженерных систем и энергетики;  
ORCID: 0000-0002-8877-7409;  
eLibrary SPIN: 7002-9948;  
e-mail: kusmin\_nikolai@mail.ru

**Кайзер Юрий Филиппович,**

доцент, канд. техн. наук,  
заведующий кафедрой авиационных горюче-смазочных  
материалов;  
ORCID: 0000-0003-2552-1884;  
eLibrary SPIN: 4923-9507;  
e-mail: kaiser170174@mail.ru

\* Автор, ответственный за переписку

**Nikolay I. Selivanov,**

Professor, Dr. Sci. (Tech.),  
Professor of the Tractors and Automobiles Department;  
ORCID: 0000-0003-1595-1266;  
eLibrary SPIN: 8026-5097;  
e-mail: zaprudskii@list.ru

**Alexander V. Kuznetsov,**

Associate Professor, Cand. Sci. (Tech.),  
Head of the Tractors and Automobiles Department;  
ORCID: 0000-0002-6252-1464;  
eLibrary SPIN: 8637-4667;  
e-mail: kuznetsov1223@yandex.ru

**Nikolay V. Kuzmin,**

Associate Professor, Cand. Sci. (Tech.),  
Director of the Institute of Engineering Systems and Energy;  
ORCID: 0000-0002-8877-7409;  
eLibrary SPIN: 7002-9948;  
e-mail: kusmin\_nikolai@mail.ru

**Yuriy F. Kaiser,**

Associate Professor, Cand. Sci. (Tech.),  
Head of the Aviation Fuels and Lubricants Department;  
ORCID: 0000-0003-2552-1884;  
eLibrary SPIN: 4923-9507;  
e-mail: kaiser170174@mail.ru

\* Corresponding author