



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРУЖЕННОСТИ ТРАКТОРА НА УХОДЕ ЗА ЛЕСНЫМИ КУЛЬТУРАМИ С РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ АГРЕГАТИРОВАНИЯ

Максим В. Подрубалов<sup>1</sup>, podrubalov@mgul.ac.ru, 0000-0003-2589-5659

Евгений Е. Клубничкин<sup>1</sup> ✉, klubnichkin@mgul.ac.ru, 0000-0002-4086-1011

Леонид Д. Бухтояров<sup>2</sup>, vglta-mlx@yandex.ru, 0000-0002-7428-0821

<sup>1</sup>Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана», ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, 141005, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В данной работе произведены оценки испытаний трактора класса 2 интегральной компоновки ЛТЗ -155, с передним или задним, и комбинированным агрегатированием, с возможностью совмещения операций при возделывании пропашных и лесных культур путем применения комбинированных агрегатов с лесохозяйственными и сельхозмашинами передней и задней навесках. Показана оценка работоспособности и эффективности использования таких агрегатов от их виброн нагруженности. В ходе экспериментальных исследований трактора с различными способами навески (задней, передней, одновременно передней и задней) культиватора весом 2200 кг были получены тензометрированием горизонтальные и вертикальные составляющие тягового сопротивления, а также крутящие моменты на ведущих колесах трактора. Работа трактора проходила на специально подготовленном полигоне под лесовосстановление, на глубину 4 и 8 см соответственно для заднего и переднего культиватора. Разработанные тензометрические рамки использовались при анализе возникаемого тягового сопротивления. В полевых условиях установлено, что динамика процессов силовых параметров у агрегата с передним и задним культиваторами существенно ниже, чем только с передним или задним, а абсолютное значение превышает 2 т., т.е. тяговый класс трактора. Примененный спектрально корреляционный анализ показал, что для испытываемых агрегатов эти процессы имеют низкочастотные спектры (до 1 Гц) и относительно друг друга являются «белым» шумом. Это при математическом моделировании упрощает формирование структур подсистем «воздействие» и «машина».

**Ключевые слова:** трактор, агрегат, силовые параметры, взаимный анализ, белый шум, моделирование

**Благодарности:** Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения №075-11-2019-030 от 22 ноября 2019 г.


Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.



**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.


**Для цитирования:** Подрубалов М. В. Экспериментальные исследования нагруженности трактора на уходе за лесными культурами с разными способами агрегатирования / М. В. Подрубалов, Е. Е. Клубничкин, Л. Д. Бухтояров // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 170–180. – Библиогр.: с. 177–179 (13 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/15>.

**Поступила:** 30.10.2021 **Принята к публикации:** 27.12.2021 **Опубликована онлайн:** 30.12.2021

## EXPERIMENTAL STUDIES OF TRACTOR LOAD DURING THE CARE OF FOREST PLANTATIONS USING DIFFERENT AGGREGATION METHODS

Maksim V. Podrubalov<sup>1</sup>, podrubalov@mgul.ac.ru,  0000-0003-2589-5659

Evgeniy E. Klubnichkin<sup>1</sup> , klubnichkin@mgul.ac.ru,  0000-0002-4086-1011

Leonid D. Bukhtoyarov<sup>2</sup>, vglta-mlx@yandex.ru,  0000-0002-7428-0821

<sup>1</sup> Mytishchi branch of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, 141005, 1st Institutskaya street, 1, Mytishchi, Russian Federation

<sup>2</sup> FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 394087, 8 Timiryazeva street, Voronezh, Russian Federation

### Abstract

This work evaluates the tests of a 2 class tractor (integrated packaging LTZ -155) with front, rear, and combined aggregation, with the possibility of combining operations in the cultivation of row crops and forest plantations by using combined aggregates with forestry and agricultural vehicles with front and rear hinges. An assessment of the performance and efficiency of using such units with their vibration loading has been shown. During experimental studies of the tractor with different mounting methods (rear, front, both front and rear) of a cultivator weighing 2200 kg, horizontal and vertical components of traction resistance, as well as torques on the driving wheels of the tractor, were obtained by tensometric measurements. The work of the tractor took place at a specially prepared landfill for reforestation, to a depth of 4 and 8 cm, respectively, for the rear and front cultivators. The developed tensometric framework was used to analyze the resulting traction resistance. Field tests showed that the dynamics of the processes of power parameters for a unit with front and rear cultivators was significantly lower than with only front or rear cultivators. The absolute value exceeded 2 tons, i.e. traction class of the tractor. The applied spectral correlation analysis showed that these processes had low-frequency spectra (up to 1 Hz). They were "white" noise relative to each other. This, in mathematical modeling, simplifies the formation of the structures of the "impact" and "machine" subsystems.

**Keywords:** tractor, unit, power parameters, mutual analysis, white noise, modeling

**Acknowledgments:** The work was carried out at the Bauman Moscow State Technical University with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Agreement No. 075-11-2019-030 dated November 22, 2019.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Podrubalov M. V., Klubnichkin E. E., Bukhtoyarov L. D. (2021) Experimental research of tractor loading on the care of forest crops with different aggregation methods. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering journal], Vol. 11, No. 4 (44), pp. 170-180 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/15>.

**Received:** 30.10.2021 **Revised:** 18.12.2021 **Accepted for publication:** 27.12.2021 **Published online:** 30.12.2021

## Введение

Одной из главных отличительных особенностей трактора класса 2 ЛТЗ -155, на базе которой существенно повышается производительность труда, является возможность совмещения операций при возделывании пропашных и лесных культур путем применения комбинированных агрегатов с лесохозяйственными и сельхозмашинами передней и задней навесках [1, 2, 3, 4]. Однако работоспособность и эффективность использования таких агрегатов в существенной мере будет зависеть от их вибронгруженности [5, 6, 7, 8].

В свою очередь вопросы вибронгруженности входных и выходных процессов по отношению к динамической системе трактора интегрального типа при сравнении работы с передним, задним и комбинированным агрегатированием недостаточно изучены [9, 10, 11, 12, 13]. В современных условиях это не дает возможности корректно решать и ставить задачи, связанные со снижением вибронгруженности узлов и агрегатов трактора, а также оценки его тяговой динамики.

## Материалы и методы

Нами были проведены испытания трактора ЛТЗ специально оборудованного лесохозяйственным и лесовосстановительным агрегатами. Мы устанавливали на трактор оборудование сходное по своим характеристикам с культиватором КРШ – 8.1 (массой 2200 кг). При проведении экспериментов оборудование устанавливалось: 1 - на передней и задней навесках трактора, 2 - только на задней навеске трактора, 3 – только на передней навеске трактора. При исследованиях были получены результаты временных входных и выходных тяговых сопротивлений и крутящих моментов, а именно вертикальная составляющая тягового сопротивления и крутящие моменты на ведущих колесах.

Работа трактора происходила на специально подготовленном под лесовосстановление полигоне. Почва на полигоне во время испытаний: 1 – влажность от 12 до 14%; 2 - твердость от 4 до 6 ударов ударником ДорНИИ с малым наконечником. Трактор на момент проведения испытаний имел ходовую систему со сдвоенными шинами, шины 9.5-42 мод. Я – 183. Давление воздуха в шинах регулировалось согласно утверждённой методики проведе-

ния испытаний: 1 - давление воздуха в шинах ведущих колес 0.15 – 0.14 МПа для комбинации с передней и задней навесками; 2 - давление воздуха в шинах ведущих колес 0.14 – 0.12 МПа с передней навеской; 3 – давление воздуха в шинах ведущих колес 0.11 – 0.10 МПа с традиционным расположением орудия.

Нами было разработано специальное измерительное оборудование, для сбора и последующего анализа тягового процесса сопротивления движения трактора во время проведения испытаний. Основным элементом разработанного оборудования являются тензометрические рамки представленные на схеме номер 1 рис. 1. Для обеспечения нормированных среднеквадратических ошибок оценок основных статистических характеристик процессов, вызванных конечностью длин реализаций 7-20% использовались длины реализаций процессов от 15 до 40 секунд.

Формирование числовых массивов из временных реализаций процессов, зарегистрированных на осциллографической ленте, проводилось с помощью аналого-цифрового преобразователя ЭВМ ВС-1045 по специально разработанным программам, позволяющим проводить авто - и взаимнокорреляционный и спектральный анализы двух процессов по системе «вход-выход».

## Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены оценки характеристик вибронгруженности, рассчитанные для типичных в проведенных исследованиях реализаций входных и выходных процессов. Можно видеть, что для всех вариантов агрегатирования математические ожидания крутящих моментов на колесах левого борта больше (в 1.25 – 1.38 раза), чем правого, что может быть объяснено проявившейся асимметрией в наладке навесных систем или культиваторов.

Эксперимент показывает, что за счет лучших сцепных качеств, суммарная нагруженность задних колес, идущих по следу в 1.19-1.46 раза выше, чем передних. Испытываемый трактор имел самоблокирующийся дифференциал храпового типа у передних колес и конический дифференциал у задних колес. Данные табл. 1 свидетельствуют, что конический дифференциал обеспечивает меньшую не-

равномерность крутящих моментов на колесах, чем дифференциал храпового типа. При этом отношение оценок математических ожиданий моментов на задних колесах составляет величины 1.11-1.21, а на передних 1.45-1.69.

Из таблиц видно, что средние значения горизонтальной составляющей тяговых сопротивлений от одного культиватора составляют значения 9-12 кН. Для комбинированного агрегата суммарная величина этого входного параметра равна 22.4 кН, что несколько повышает тяговый класс трактора. Вертикальные же составляющие тяговых сопротивлений от культиваторов близки к нулю и их роль в перераспределении сцепного веса трактора весьма мала.

Анализ уровня оценок коэффициентов вариации показывает, что при работе трактора с культиваторами на передней или задней навесках степень изменчивости процессов крутящих моментов на колесах существенно ниже, чем для комбинированного агрегата. Так, средние значения коэффициентов вариации для этих процессов в условиях переднего и заднего агрегатирования составляет величины 27,6 и 24,5 %, в то время как для комбинированного 10,4 %. Причем уровень средних квадратических отклонений моментов для различного агрегатирования приблизительно одинаков.

Из результатов проведенного эксперимента следует (табл. 1), что динамика изменения величины горизонтальной составляющей тягового сопротивления от культиватора на передней навеске заметно больше, чем от культиватора при традиционном (заднем) агрегатировании. Это проявляется как при сравнении абсолютных значений оценок средних квадратических отклонений, так и коэффициентов вариации. По абсолютным значениям средних квадратических отклонений также видно, что динамика процессов вертикальных составляющих тяговых сопротивлений при комбинированном агрегатировании (табл. 1) лежит в тех же пределах, что и для горизонтальных составляющих.

Спектральный анализ исследуемых процессов нагруженности показывает (рис. 2, 3), что их дисперсия лежит в области низких частот (до 1-2 Гц). Причем, качественного различия между спектрами крутящих моментов на передних, задних и стоящих по разным бортам трактора колесах как для переднего и заднего, так и комбинированного агрегатирования, не наблюдается (рис. 2 а, 3 а).

На рис. 4 представлены нормированные взаимно корреляционные функции (а) и функции когерентности (б) процессов.

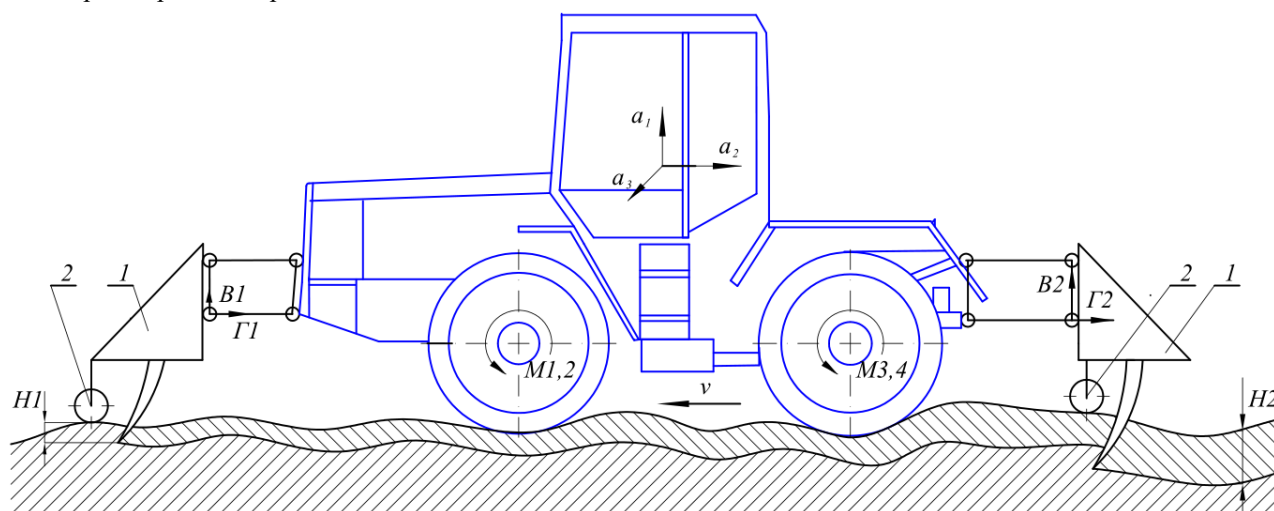


Рисунок 1. Схема комбинированного агрегата трактора 4К46

Figure 1. Combined-block design of tractor 4K4b

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Оценки статистических характеристик нагруженности трактора 4К46 при разных способах агрегатирования

Table 1

Evaluation of statistic performance of loading of tractor 4K4b with variable building-block designs

Процесс Process	Обозначение Designation	Мак. ожд., Exp. pected value,	RMS value, σ	Коэф. Вар., $V = \frac{\sigma^2}{\bar{x}^2}$ , %, Var. factor	Макс. значение   Max. value числитель   – numerator знаменатель   denominator					
					M1	M2	M3	M4	B2	Г2
Переднее агрегатирование, v=1.6 м/с   Front building-block design, v=1.6 m/s										
Момент на переднем левом колесе, кНм Front LH wheel torque, kNm	M1	2.88	0.67	23.2		$\frac{0.09}{0.19}$	$\frac{0.04}{0.09}$			
Момент на переднем правом колесе, кНм Front RH wheel torque, kNm	M2	1.71	0.73	42.8			$\frac{0.12}{0.20}$			
Момент на заднем левом колесе, кНм Rear LH wheel torque, kNm	M3	3.23	0.63	19.6				$\frac{0.61}{0.69}$		
Момент на заднем правом колесе, кНм Rear RH wheel torque, kNm	M4	2.68	0.67	24.9						
Горизонтальная составляющая тягового сопротивления на передней навеске, кН Horizontal component of traction resistance on front mounting, kN	Г1	9.35	2.37	25.4	$\frac{0.07}{0.13}$	$\frac{0.08}{0.11}$	$\frac{0.07}{0.10}$	$\frac{0.13}{0.09}$		
Заднее агрегатирование, v=1.6 м/с   Rear building-block design, v=1.6 m/s										
Момент на переднем левом колесе, кНм Front LH wheel torque, kNm	M1	3.55	0.67	19.0		$\frac{0.06}{0.10}$	$\frac{0.40}{0.12}$			
Момент на переднем правом колесе, кНм Front RH wheel torque, kNm	M2	2.46	0.76	30.9			$\frac{-0.21}{0.09}$			
Момент на заднем левом колесе, кНм Rear LH wheel torque, kNm	M3	3.76	1.31	34.8				$\frac{0.27}{0.65}$		
Момент на заднем правом колесе, кНм Rear RH wheel torque, kNm	M4	3.39	0.46	13.5						
Горизонтальная составляющая тягового сопротивления от орудия на задней навеске, кН Horizontal component of traction resistance on rear mounting, kN	Г2	10.63	1.42	13.5	$\frac{0.70}{0.08}$	$\frac{0.50}{0.50}$	$\frac{0.10}{0.26}$	$\frac{0.15}{0.23}$		

Комбинированное агрегатирование, $v=1.27$ м/с   Combined building-block design, $v=1.27$ m/s										
Момент на переднем левом колесе, кНм Front LH wheel torque, kNm	M1	5.06	0.34	6.7		$\frac{0.04}{0.43}$	$\frac{0.24}{0.63}$			
Момент на переднем правом колесе, кНм Front RH wheel torque, kNm	M2	3.23	0.46	14.3						
Момент на заднем левом колесе, кНм Rear LH wheel torque, kNm	M3	6.58	0.6	9.2				$\frac{0.40}{0.53}$		
Момент на заднем правом колесе, кНм Rear RH wheel torque, kNm	M4	5.48	0.62	11.3						
Вертикальная составляющая тягового сопротивления на передней навеске, кН Vertical component of traction resistance on front mounting, kN	B1	-0.35	1.10	-	$\frac{0.04}{0.17}$		$\frac{0.20}{0.60}$		$\frac{0.32}{0.70}$	$\frac{0.05}{0.28}$
Горизонтальная составляющая тягового сопротивления на передней навеске, кН Horizontal component of traction resistance on front mounting, kN	Г1	10.15	1.17	11.5	$\frac{0.04}{0.36}$		$\frac{0.07}{0.30}$		$\frac{0.03}{0.20}$	$\frac{0.03}{0.18}$
Вертикальная составляющая тягового сопротивления на задней навеске, кН Vertical component of traction resistance on rear mounting, kN	B2	0.32	1.71	-	$\frac{0.16}{0.50}$		$\frac{0.19}{0.48}$			$\frac{0.07}{0.31}$
Горизонтальная составляющая тягового сопротивления на задней навеске, кН Horizontal component of traction resistance on rear mounting, kN	Г2	12.25	0.73	5.9	$\frac{0.10}{0.41}$					

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что использование конического дифференциала приводит к равномерному распределению крутящих моментов между ведущими колёсами трактора. Результаты представленные в таблице показывают, что максимальные значения обоюдных функций для процессов крутящих моментов на ведущих задних колёсах достигают величины 0.7 – 0.8 и для каждого вида комплектования трактора при испытаниях технологическим оборудованием

оказываются достаточно большими, в отличие от других вариантов экспериментального анализа исследования процессов нагружения. По рис. 3 б можно определить, что существенная корреляция находится в зоне низких частот (до 0.8 Гц). Также максимальное значение 0.6 – 0.7 на частоте до 0.5 Гц отмечены также у взаимных функций между процессами вертикальных составляющих тягового сопротивления.

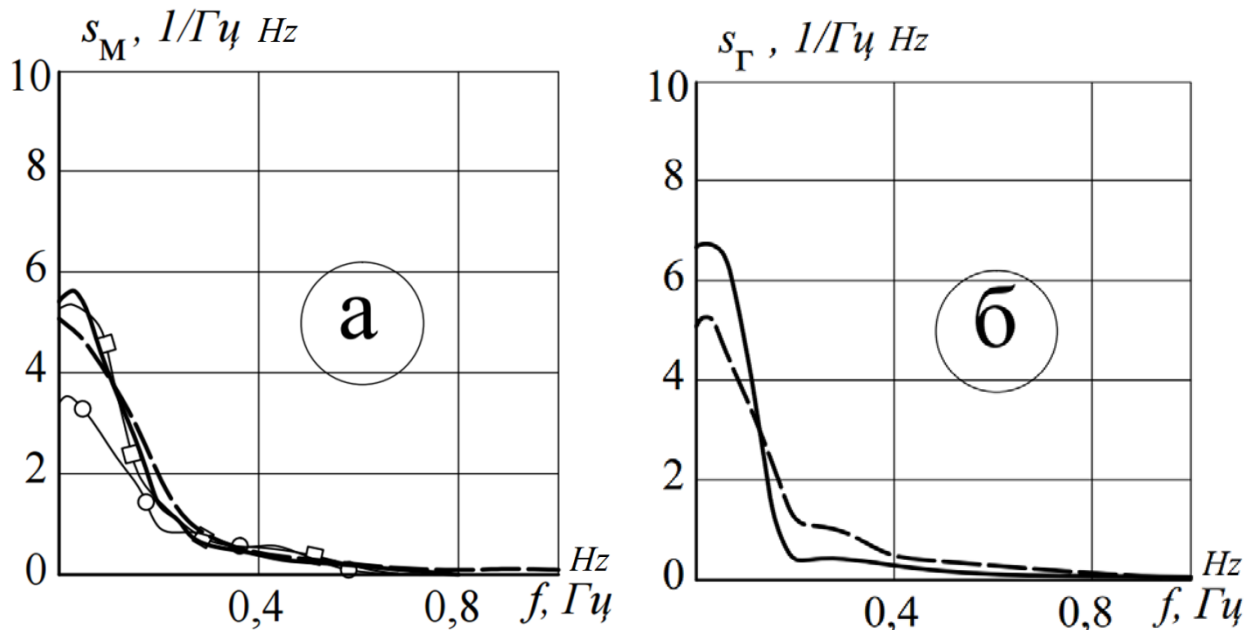


Рисунок 2. Нормированные спектральные плотности процессов нагруженности при культивации со скоростью  $v=1,6$  м/с: а) моментов М1 на переднем левом (— - культиватор на задней навеске, - - - - на передней навеске) и заднем правом (-o-o- - на задней навеске, -[-]-[-] - на передней навеске) колесах; б) горизонтальной составляющей тягового сопротивления  $\Gamma_1$ : — - от культиватора на задней навеске; - - - - на передней навеске

Figure 2. Rated spectral densities of the cultivation load processes at a speed of  $v=1.6$  mps:

а) moments M1 on front LH (— - cultivator is rear-mounted, - - - - is front-mounted) and on rear RH (-o-o- - rear-mounted, -[-]-[-] - front-mounted) wheels; б) horizontal component of tractive resistance  $\Gamma_1$ : — - from rear-mounted cultivator; - - - - from front-mounted cultivator

Источник: собственный результат авторов  
Source: Authors' own result

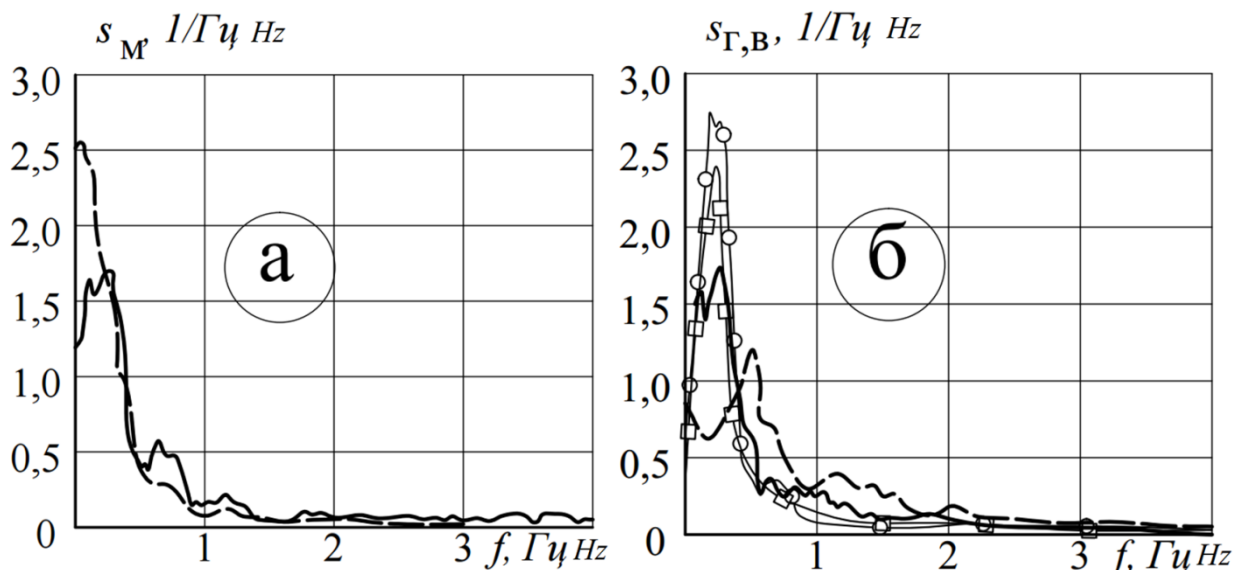


Рисунок 3. Нормированные спектральные плотности процессов нагруженности при культивации комбинированным агрегатом со скоростью  $v=1,27$  м/с:

а) моментов М1 на переднем левом (—) и заднем правом М4 (- - -) колесах; б) горизонтальных  $\Gamma_1, \Gamma_2$  (— - от культиватор на задней навеске; - - - - на передней навеске) и вертикальных в (соответственно -o-o- и -[-]-[-]) составляющих тягового сопротивления

Figure 3. Rated spectral densities of loading processes at cultivation done by combined block at a speed of  $v=1.27$  mps: а) moments M1 on front LH (—) and rear RH M4 (- - -) wheels; б) horizontal  $\Gamma_1, \Gamma_2$  (— - caused by rear-mounted cultivator; - - - - front-mounted cultivator) and vertical in (as per -o-o- and -[-]-[-]) components of the tractive resistance

Источник: собственный результат авторов  
Source: Authors' own result

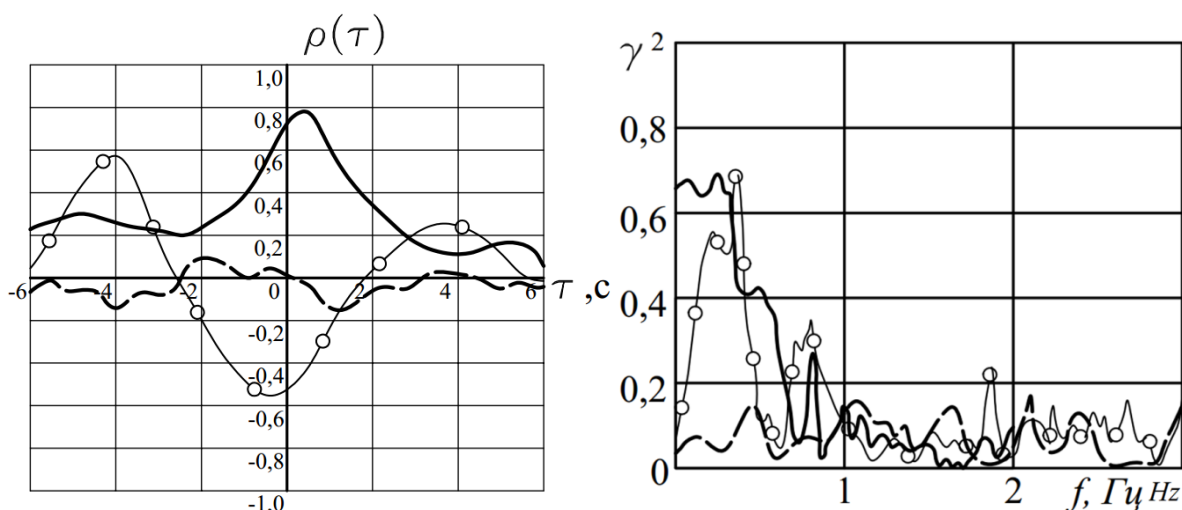


Рисунок 4. Нормированные взаимно корреляционные функции (а) и функции когерентности (б) процессов нагруженности: - - - - между моментом левого и правого задних колес при культивации со скоростью  $v=1,6$  м/с с передним агрегатированием; — — — — между горизонтальными и -o-o- - вертикальными составляющими тяговых сопротивлений при культивации со скоростью  $v=1,27$  м/с с комбинированным агрегатированием

Figure 4. Rated cross-correlation functions (a) and coherence functions (b) of the load processes:

- - - - between moments of the LH and RH rear wheels during cultivation at a speed of  $v=1.6$  mps at front building-block design;  
 — — — — between horizontal and -o-o- - vertical components of the tractive resistances during cultivation at a speed of  $v=1.27$  mps at combined building-block design

Источник: собственный результат авторов

Source: Authors' own result

На рис. 3 показано, что входным процессам в этом случае является вертикальная составляющая тягового сопротивления на задней навеске от культиватора трактора, в частности смещен в область отрицательных значений  $\tau$  от оси ординат первый экстремум и что на данной составляющей возрастание значений сопровождается уменьшением вертикальной составляющей сопротивления по тяги от культиватора на передней навеске в диапазоне  $\tau = \pm 2$  секунд.

### Выводы

Экспериментальные исследования трактора ЛТЗ -155 показали, что при культивации в составе комбинированного агрегата суммарная горизонтальная составляющая тягового сопротивления

несколько превышает (10 %) тяговый класс трактора, вертикальные составляющие тягового сопротивления от переднего и заднего культиваторов близки к нулю, а динамика процессов крутящих моментов на колесах существенно ниже, чем при культивации с только передним или традиционным агрегатированном.

Возникаемые вертикальные и горизонтальные составляющие крутящих моментов и тягового сопротивления на колесах в полосе частот, определяемой полосой пропускания динамической системы трактора (свыше 0,8 Гц), является статистически независимым шумом по отношению друг к другу.

### Список литературы

1. Подрубалов М. В. Подрубалов В. К., Никитенко А. Н. Экспериментальная оценка взаимосвязи силовых факторов при работе трактора 4К46 в составе с передним и задним культиваторами. Доклады ТСХА : Сборник статей, Москва, 01 января – 31 2015 года. Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева. 2016; 289-293. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41141048>.
2. Голдина И. И., Несговоров А. Г. Анализ и сравнение эксплуатационные свойства тракторов Беларус и тракторов ведущих зарубежных фирм. Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. 2019; № 3(3): 113-123. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38096683>.



3. Sokolov-Dobrev N. S., Ljashenko M. V., Shekhovtsov V. V. Research of dynamic loading in a drivetrain by means of mathematical modeling. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017; №177(1).DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012092.
4. Mederski P. S., Borz S. A., Đuka A., Lazdiņš A. Challenges in Forestry and Forest Engineering – Case Studies from Four Countries in East Europe. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2021; № 42(1): 117 – 134. DOI: 10.5552/crojfe.2021.838.
5. Подрубалов М. В., Никитенко А. Н. К вопросу о методике обработки данных эталонных сельскохозяйственных профилей пути мобильных машин. Сборник статей по итогам II международной научно-практической конференции "ГОРЯЧКИНСКИЕ ЧТЕНИЯ", посвященной 150-летию со дня рождения академика В.П. Горячкина, Москва, 18 апреля 2018 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева. 2019; 82-86. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38168834>
6. Косульников Р. А., Карсаков А. А., Фомин С. Д., Привалов В. А. Формирование крюковой нагруженности трактора в составе машинно-тракторного агрегата. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2019; № 1(53): 371-377. DOI: <http://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-01-49>
7. Gapich D. S., Kosulnikov R. A., Vorobyeva N. S. Forecasting of towing indicators of tractors with 4k4 wheel arrangements. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016; №11(11): 6801-6806. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26828041>
8. Kutzbach H. D., Bürger A., Böttinger S. Rolling radii and moment arm of the wheel load for pneumatic tyres. *Journal of Terramechanics*. 2019; №82: 13-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.11.002>.
9. Подрубалов М. В., Никитенко А. Н. К вопросу эксплуатационной нагруженности привода трактора 4К46 при культивации с различным агрегатированием. Доклады ТСХА: Материалы международной научной конференции, Москва, 05–07 декабря 2017 года. Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева. 2018; 126-128. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34968743>
10. Гапич Д. С., Привалов В. А., Афанасьев Ю. Н. Тяговые показатели тракторов с колесной формулой 4К2 на увлажненных почвах. *Научное обозрение*. 2016; № 7: 95-102. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26145897>
11. Kostyleva L. V., Ovchinnikov A. S., Gapich D. S. Gradient hardening chisel plow from nodular iron. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017; №12(7): 2085-2091. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29498638>
12. Gnusov M., Lysych M., Druchinin D. Volumetric dynamometer units for laboratory and field testing of tillage equipment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1889. 052047. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/5/052047.
13. Lysych M. Study of driving dynamics of modular forestry tillage machine-tractor units in CAE SolidWorks Motion. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 595. 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012024.

### References

1. Podrubalov M. V., Podrubalov V. K., Nikitenko A. N. Jeksperimental'naja ocenka vzaimosvjazi silovyh faktorov pri rabote traktora 4K4b v sostave s perednim i zadnim kul'tivatorami [Experimental evaluation of the relationship of power factors during the operation of a 4K4b tractor with front and rear cultivators.]. *Doklady TSHA : Sbornik statej*, Москва, 01 janvarja – 31 2015 goda. – Москва: Rossijskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet - MSHA im. K.A. Timirjazeva = Reports of the TLC : Collection of articles, Moscow, January 01 - 31, 2015. - Moscow: Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. 2016; 289-293. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41141048>
2. Goldina I. I., Nesgovorov A. G. Analiz i sravnenie jekspluatacionnye svojstva traktorov Belarus i traktorov vedushih zarubezhnyh firm [Analysis and comparison of operational properties of Belarus tractors and tractors of

leading foreign companies]. Nauchno-tehnicheskij vestnik: Tehnicheskie sistemy v APK = Scientific and Technical Bulletin: Technical systems in the agro-industrial complex. 2019; № 3(3): 113-123. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38096683>

3. Sokolov-Dobrev N. S., Ljashenko M. V., Shekhovtsov V. V. Research of dynamic loading in a drivetrain by means of mathematical modeling. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017; №177(1)DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012092.

4. Mederski P. S., Borz S. A., Đuka A., Lazdiņš A. Challenges in Forestry and Forest Engineering – Case Studies from Four Countries in East Europe. Croatian Journal of Forest Engineering. 2021; № 42(1): 117 – 134. DOI: 10.5552/crojfe.2021.838.

5. Podrubalov M. V., Nikitenko A. N. K voprosu o metodike obrabotki dannyh jetalonyh sel'skohozyajstvennyh profilej puti mobil'nyh mashin [To the question of the methodology of data processing of reference agricultural profiles of the path of mobile machines]. Sbornik statej po itogam II mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "GORJaChKINSKIE ChTENIJa", posvjashhennoj 150-letiju so dnja rozhdenija akademika V.P. Gorjachkina, Moskva, 18 aprelja 2018 goda. Moskva: Rossijskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet – MSHA im. K.A. Timirjazeva = Collection of articles on the results of the II International Scientific and Practical conference "GORYACHKIN READINGS" dedicated to the 150th anniversary of the birth of Academician V.P. Goryachkin, Moscow, April 18, 2018. - Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. 2019; 82-86. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38168834>

6. Kosul'nikov R. A., Karsakov A. A., Fomin S. D., Privalov V. A. Formirovanie krjukovoj nagruzhennosti traktora v sostave mashinno-traktornogo agregata [Formation of the hook loading of the tractor as part of the machine-tractor unit]. Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka I vysshee professional'noe obrazovanie = Proceedings of the Nizhnevolzhskyagrouniversitetskij kompleks: Science and higher professional education. 2019; № 1(53): 371-377. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-01-49>

7. Gapich D. S., Kosulnikov R. A., Vorobyeva N. S. Forecasting of towing indicators of tractors with 4k4 wheel arrangements. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016; № 11(11): 6801-6806. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26828041>

8. Kutzbach H. D., BürgerA., BöttingerS. Rolling radii and moment arm of the wheel load for pneumatic tyres. Journal of Terramechanics. 2019; №82: 13-21.DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.11.002>.

9. Podrubalov M. V., Nikitenko A. N. K voprosu jekspluatacionnoj nagruzhennosti privoda traktora 4K4b pri kul'tivacii s razlichnym agregatirovaniem [To the question of the operational load of the 4K4b tractor drive during cultivation with various aggregation]. Doklady TSHA: Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, Moskva, 05-07 dekabrja 2017 goda. Moskva: Rossijskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet - MSHA im. K.A. Timirjazeva = Reports of the TLC: Proceedings of the International scientific Conference, Moscow, 05-07 December 2017. - Moscow: Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev. 2018; 126-128. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34968743>

10. Gapich D. S., Privalov V. A., Afanas'ev Ju. N. Tjagovye pokazateli traktorov s kolesnoj formuloj 4K2 na uvlazhennyh pochvah [Traction indicators of tractors with a 4K2 wheel formula on moistened soils]. Nauchnoe obozrenie = Scientific review. 2016; №7: 95-102. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26145897>

11. Kostyleva L. V., Ovchinnikov A. S., Gapich D. S. Gradient hardening chisel plow from nodular iron. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017; № 12(7): 2085-2091. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29498638>

12. Gnusov M., Lysych M., Druchinin D. Volumetric dynamometer units for laboratory and field testing of tillage equipment. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 1889. 052047. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/5/052047.

13. Lysych M. Study of driving dynamics of modular forestry tillage machine-tractor units in CAE SolidWorks Motion. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020; 595. 012024. DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012024.

### Сведения об авторах

*Подрубалов Максим Валерьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирование объектов лесного комплекса, Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Российская Федерация, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2589-5659>, e-mail: [podrubalov@mgul.ac.ru](mailto:podrubalov@mgul.ac.ru).

✉ *Клубничкин Евгений Евгеньевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса, Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Российская Федерация, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4086-1011>, e-mail: [klubnichkin@mgul.ac.ru](mailto:klubnichkin@mgul.ac.ru).

*Бухтояров Леонид Дмитриевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: [vglta-mlx@yandex.ru](mailto:vglta-mlx@yandex.ru).

### Information about the authors

*Maxim V. Podrubalov* – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Design of objects of the forest complex, Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya str., 1, Mytishchi, Russian Federation, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2589-5659>, e-mail: [podrubalov@mgul.ac.ru](mailto:podrubalov@mgul.ac.ru).

✉ *Evgeny E. Klubnichkin* – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Transport and Technological Means and Equipment of the Forest Complex, Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya str., 1, Mytishchi, Russian Federation, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4086-1011>, e-mail: [klubnichkin@mgul.ac.ru](mailto:klubnichkin@mgul.ac.ru).

*Leonid D. Bukhtoyarov* – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-0821>, e-mail: [vglta-mlx@yandex.ru](mailto:vglta-mlx@yandex.ru).

✉ – Для контактов / Corresponding author