



## Разработка подвижного модуля экспериментального стенда для определения тягово-сцепных свойств колесных движителей и результаты лабораторных исследований силы тяги на ведущих колесах мотоблока

В. Ф. Купряшкин<sup>1</sup>, А. С. Уланов<sup>1\*</sup>, М. Г. Шляпников<sup>1</sup>,  
А. Ю. Гусев<sup>1</sup>, В. И. Славкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск,  
Российская Федерация)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный заочный  
университет» (г. Балашиха, Российская Федерация)

\*[ulanow.aleksandr2010@yandex.ru](mailto:ulanow.aleksandr2010@yandex.ru)

*Введение.* Обработка почвы является неотъемлемой операцией сельскохозяйственного производства, для проведения которой личными подсобными и крестьянско-фермерскими хозяйствами широко применяются мотоблоки, оснащенные тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами. Одним из главных показателей эффективного функционирования мотоблоков является обеспечение равномерного движения при минимально допустимом буксовании ведущих колес с почвой. При этом определяющим силовым фактором является сила тяги на ведущих колесах почвообрабатывающего агрегата, объективное значение которой, как показывают исследования, можно получить только в ходе проведения экспериментальных исследований.

*Материалы и методы.* Для определения силы тяги на ведущих колесах мотоблока экспериментальным путем была предложена и обоснована конструкция стенда (Патент РФ на полезную модель № 188610 «Подвижный модуль испытательного стенда»), а также составлена методика планирования и проведения многофакторного эксперимента по определению силы тяги.

*Результаты исследования.* В результате проведенных лабораторных испытаний были получены расчетные зависимости силы тяги на ведущих колесах мотоблока «Нева» МБ23-МультиАГРО Про в зависимости от почвенных условий и с учетом его конструктивно-технологических параметров, режимов функционирования, а также силы сопротивления перекачиванию.

*Обсуждение и заключение.* Совместное использование регрессионных моделей силы тяги с условиями обеспечения равномерного движения при минимально допустимом буксовании ведущих колес мотоблока с почвой в последующем позволит получить допустимые значения скорости движения и сформировать зоны наиболее эффективного его функционирования.

**Ключевые слова:** мотоблок, обработка почвы, тяговые и тягово-приводные сменные адаптеры, экспериментальный стенд, тягово-сцепные свойства, ведущие колеса, сила тяги, устойчивость движения

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

© Купряшкин В. Ф., Уланов А. С., Шляпников М. Г., Гусев А. Ю., Славкин В. И., 2021



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

*Для цитирования:* Разработка подвижного модуля экспериментального стенда для определения тягово-сцепных свойств колесных движителей и результаты лабораторных исследований силы тяги на ведущих колесах мотоблока / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов, М. Г. Шляпников [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202101.143-160 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 143–160.

*Original article*

## Experimental Stand Movable Module for Determining the Traction-Linked Properties of Wheel Engines and the Results of Laboratory Researches for Determining the Traction Force of Two-Wheel Tractors

V. F. Kupryashkin<sup>a</sup>, A. S. Ulanov<sup>a\*</sup>, M. G. Shlyapnikov<sup>a</sup>,  
A. Yu. Gusev<sup>a</sup>, V. I. Slavkin<sup>b</sup>

<sup>a</sup>National Research Mordovia State University (Saransk, Russian Federation)

<sup>b</sup>Russian State Agrarian Correspondence University (Balashikha, Russian Federation)

\**ulanow.aleksandr2010@yandex.ru*

*Introduction.* Farmers make extensive use of two-wheel tractors equipped with traction and drive interchangeable units. Two-wheel tractors are required to move evenly with minimal slip of the drive wheels on the soil. The tractive force on the drive wheels of the tillage unit is the decisive power factor in this case. An objective traction force value can be measured only by carrying out experimental studies.

*Materials and Methods.* To determine the traction force on the drive wheels of the two-wheel tractor, the design of the experimental stand was proposed and substantiated (RF patent for useful model No. 188610 “Movable module of the test stand”), and a methodology for planning and conducting a multifactor experiment to determine the traction force was developed.

*Results.* As a result of the laboratory tests the calculation dependencies of the tractive force on the drive wheels of the Neva MB23-MultiAGRO Pro two-wheel tractor were obtained. Soil conditions, design and technological parameters, operating modes of the two-wheel tractor, and rolling resistance forces were taken into account.

*Discussion and Conclusion.* The use of the developed regression models of the traction force under the condition of ensuring uniform movement with the minimum permissible slipping of the driving wheels of the two-wheel tractor on the soil will allow obtaining the permissible values of the two-tractor motion speed and form the zones of its most effective functioning.

**Keywords:** two-wheel tractor, tillage, traction and traction drive interchangeable adapters, experimental stand, traction and coupling properties, drive wheels, traction force, stability of movement

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

**For citation:** Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Shlyapnikov M.G., et al. Experimental Stand Movable Module for Determining the Traction-Linked Properties of Wheel Engines and the Results of Laboratory Researches for Determining the Traction Force of Two-Wheel Tractors. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):143-160. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.143-160>

## Введение

При производстве экологически чистого картофеля и других овощей на приусадебных участках важной операцией является обработка почвы (вспашка, фрезерование, культивация и т. д.) [1–3]. Для обработки почвы, учитывая малые площади и сложные контуры, достаточно широко используются средства малой механизации, среди которых наиболее распространены являются мотоблоки [4].

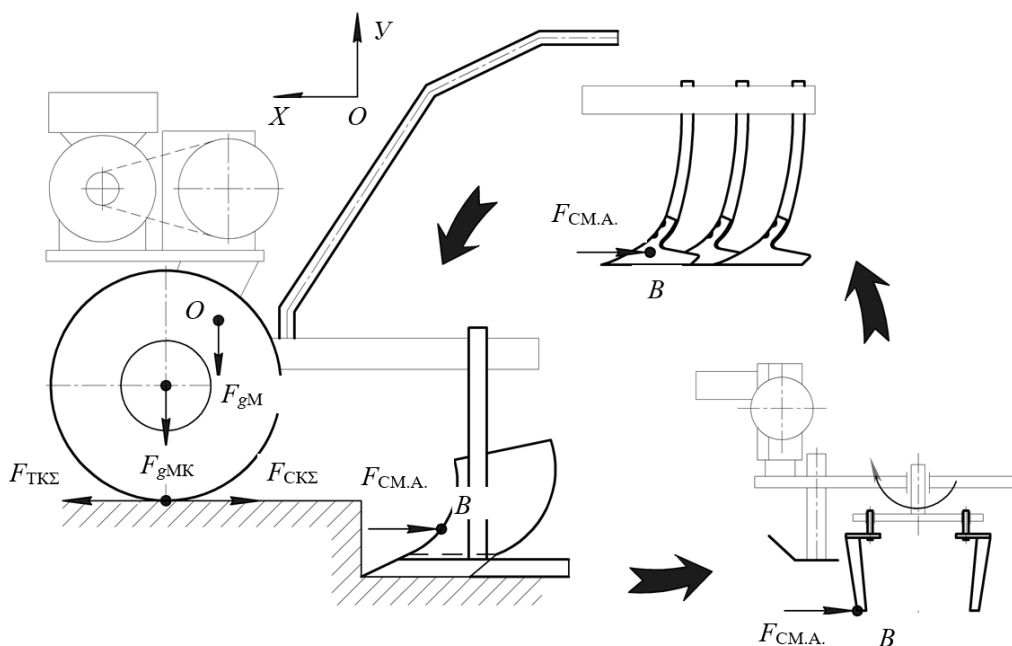
Согласно исследованиям основными критериями обеспечения высокой эффективности функционирования мотоблоков, агрегируемых с тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами, являются условия их прямолинейного движения при минимально допустимом буксовании ведущих ко-

лес, основанном на условии тягового баланса [5–7]. Так, согласно рисунку 1 данное условие для почвообрабатывающего агрегата на базе мотоблока с тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами будет иметь вид<sup>1</sup>:

$$F_{\text{ТКС}} - F_{\text{СКΣ}} - F_{\text{СМ.А.}} \geq 0, \quad (1)$$

где  $F_{\text{ТКС}}$  – сила тяги на ведущих колесах (суммарная), Н;  $F_{\text{СКΣ}}$  – сила сопротивления при перекаtywании колес, Н;  $F_{\text{СМ.А.}}$  – сила сопротивления на рабочем органе, определяемая в ходе динамометрирования, Н [8–10].

Из анализа условия (1) следует, что для функционирования почвообрабатывающего агрегата необходимо обеспечить преодоление сил  $F_{\text{СКΣ}}$  и  $F_{\text{СМ.А.}}$ .



Р и с. 1. Схема сил, действующих на мотоблок с тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами

F i g. 1. Scheme of forces acting on the two-wheel tractor with traction and traction drive interchangeable adapters

<sup>1</sup> Уланов А. С. Повышение эффективности функционирования мотоблока с лемешно-отвальным плугом: дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2019. 250 с.

Определяющим фактором для преодоления данных сопротивлений, согласно техническому регламенту, является сила тяги  $F_{\text{ТК}}$  на ведущих колесах<sup>2</sup>.

Сила тяги мотоблока определяется зависимостью [11]:

$$F_{\text{ТК}} = k_c \cdot F_{\text{гМК}}, \quad (2)$$

где  $k_c$  – коэффициент сцепления ведущих колес с почвой;  $F_{\text{гМК}}$  – сила тяжести мотоблока, приходящая на ось ведущих колес, Н.

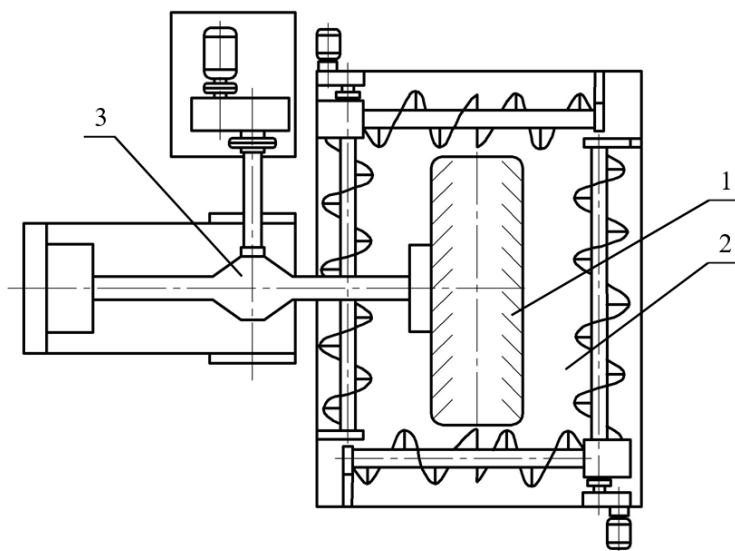
Значения коэффициента  $k_c$  можно принимать по рекомендациям [12]. Однако приводимые значения коэффициента не всегда отвечают нужным требованиям и условиям функционирования. Поэтому получение наиболее точных значений силы тяги на ведущих колесах мотоблока возможно только в результате проведения экспериментальных исследований.

### Обзор литературы

В настоящее время для исследования ведущих колес транспортно-технологических машин и определения их тягово-сцепных свойств применяются различные конструкции испытательных стендов. Рассмотрим особенности их конструкций и принципы функционирования.

С целью проведения испытаний ведущих колес путем моделирования их работы в Могилевском машиностроительном институте был разработан стенд для испытаний крупногабаритных колес (рис. 2) [13].

Отличительной особенностью данного стенда является то, что испытуемое колесо 1 устанавливается в ванну 2, заполненную землей. При включении привода 3 испытуемого колеса происходит имитация его проскальзывания на тяговом режиме. Однако данный стенд имеет основной недостаток, заключающийся



Р и с. 2. Стенд для испытания ведущих колес  
F i g. 2. Test bench for driving wheels

<sup>2</sup> Иншаков А. П., Карпов А. М., Кувшинов А. Н. Технологические и технические аспекты эффективного использования машинно-тракторного парка в сельскохозяйственном производстве. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2012. 156 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005488674> (дата обращения: 10.02.2021).

в том, что твердость почвы в ходе испытаний меняется в небольшом диапазоне значений и определяется гранулометрическим составом и типом почвы.

Существует стенд для определения коэффициентов сцепления колес в продольном и поперечном направлениях (рис. 3) [14].

Данный стенд позволяет проводить исследования тягово-сцепных свойств колеса 1 при фиксированном значении давления воздуха в шине с одновременным контролем вертикальной и горизонтальной нагрузок при помощи тензометрической площадки 2 и осциллографа 3.

Однако предлагаемый стенд позволяет определять коэффициенты сцепления только колес с пневматическими шинами на твердых типах покрытия.

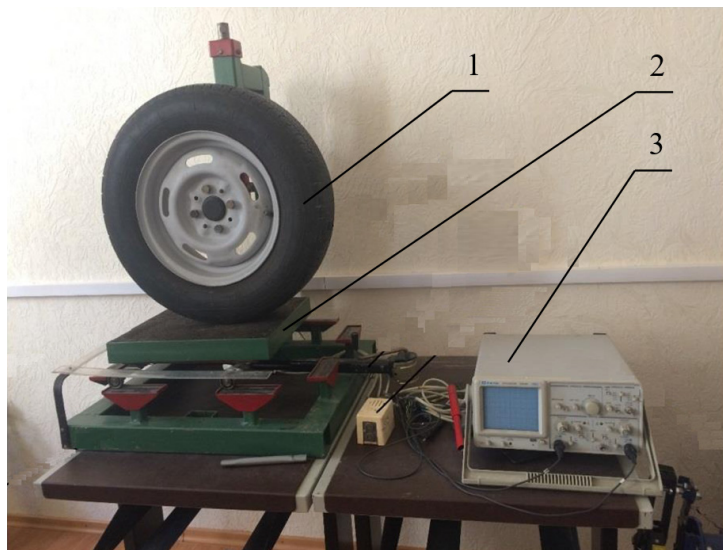
Также существует стенд для определения эксплуатационных показателей колесных движителей, разработанный Днепропетровским инженерно-строительным институтом (рис. 4) [15].

Принцип работы стенда заключается в передаче крутящего момента от ве-

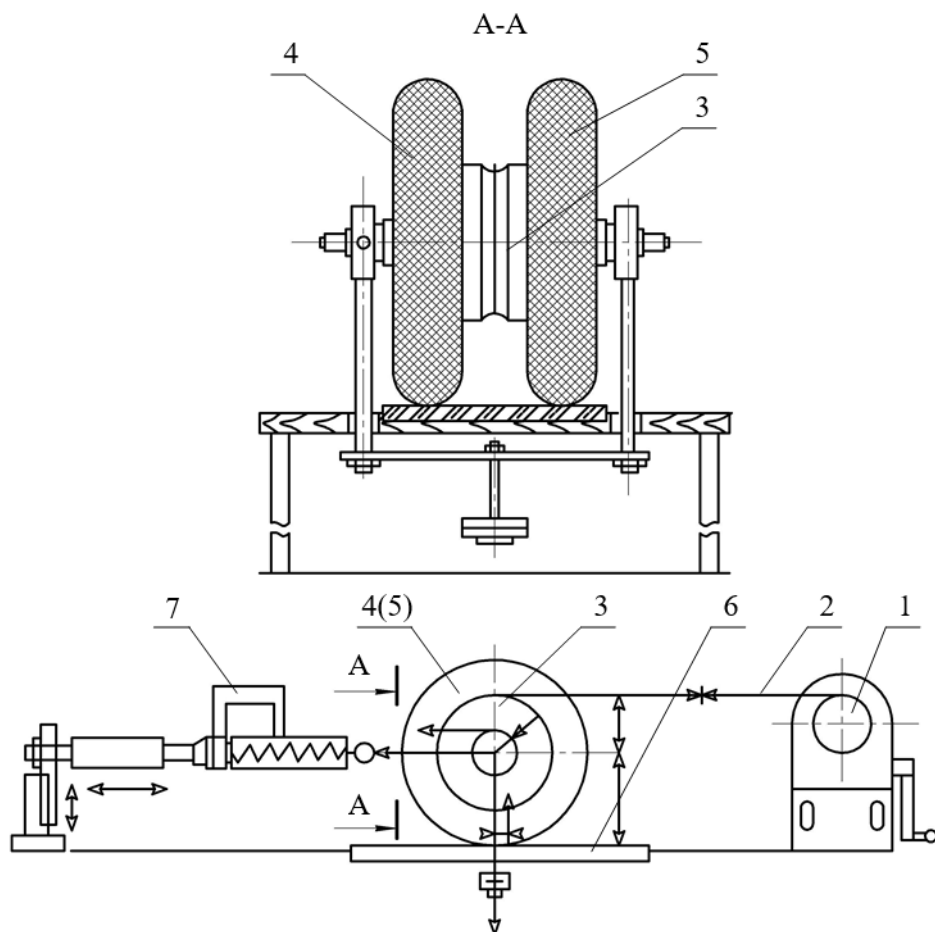
дущего барабана 1 через тяговый канат 2 к ведомому барабану 3 с закрепленными на нем испытуемыми колесами 4 и 5. Ведущие колеса контактируют с имитатором дорожного покрытия 6, связанным с динамометром 7.

Особенностью данного стенда является то, что тяговое сопротивление приложено к оси испытуемых колес, что в свою очередь повышает точность воспроизведения режимов их работы. Однако, как и в предыдущем случае, данный стенд предназначен для испытания только колес на резиновом ходу при условии их движения по твердой поверхности.

Кроме выше указанных конструкций стендов для исследования тяговых показателей ведущих колес транспортно-технологических машин существуют разработки коллективов ученых во главе с В. В. Гуськовым, С. А. Владыкиным, М. А. Левиным, В. В. Кузнецовым и др. [16–19]. Однако данные разработки отличаются сложностью конструкций и ограниченностью функциональных возможностей, в связи с чем их использование, наряду



Р и с. 3. Стенд для определения коэффициентов сцепления  
F i g. 3. Stand for determining the coefficient of adhesion



Р и с. 4. Стенд для исследования тягово-сцепных свойств колесного движителя  
 F i g. 4. Stand for the study of traction and coupling properties wheel mover

с рассмотренными стендами для испытания металлических грунтозацепов, используемых, как правило, в качестве ведущих колес мотоблока при обработке почвы, не представляется возможным.

#### Материалы и методы

В результате изучения выше указанных конструкций стендов для исследования тягово-сцепных свойств колес транспортно-технологических машин был выявлен ряд недостатков, а именно: подавляющее большинство стендов направлено на исследование характеристик колес только на рези-

новом ходу и на твердых покрытиях [13–16].

Из патентного и литературного анализа следует, что для исследования тягово-сцепных свойств движителей мотоблока необходимо разработать установку, которая позволит определить значение силы тяги на его ведущих колесах с учетом массовых характеристик, скорости движения и свойств обрабатываемой среды.

Для этого была предложена и разработана конструкция экспериментального стенда (рис. 5), позволяющего

обеспечить натурное моделирование функционирования ведущих колес мотоблоков как с пневматическими шинами, так и с металлическими грунтозацепами и определить тяговые силы в зависимости от конкретных почвенных условий (патент РФ на полезную модель № 188610 «Подвижный модуль испытательного стенда») [20].



Р и с. 5. Подвижный модуль экспериментального стенда для исследования ведущих движителей

Fig. 5. Movable module to determine traction on the drive wheels of the two-wheel tractor

Возможность стенда устанавливать экспериментальным путем силу тяги на ведущих колесах будет способствовать определению наиболее оптимальных режимов функционирования почвообрабатывающих агрегатов на базе мотоблоков с тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами [21].

Для конкретизации значений силы тяги на ведущих колесах мотоблока экспериментальным путем рассмотрим методику планирования и проведения многофакторного эксперимента в зависимости от массы и скорости движения почвообрабатывающего агрегата и твердости почвы<sup>3</sup>.

Первоначальным этапом реализации методики планирования является выбор оптимальной математической модели и типа плана<sup>4</sup>. Приняв во внимание ранее проводимые исследования степени влияния почвенных условий, скоростных и массовых характеристик почвообрабатывающих агрегатов на их тяговые показатели, можно утверждать, что зависимость  $F_{\text{ТК}}$  имеет нелинейный характер<sup>5</sup> [22–24]. Следовательно, при проведении эксперимента первоначальной моделью функции отклика выберем полином второго порядка<sup>6</sup>.

Для планирования эксперимента необходимо определить область факторного пространства. Основываясь на анализе исследований, в которых отражены условия возникновения силы тяги  $F_{\text{ТК}}$  на ведущих колесах почвообрабатывающих машин, параметры, описывающие состояние обрабатываемой почвы, а также учитывая большое количество конструктивных и технологических характеристик почвообрабатывающих агрегатов, с большой долей вероятности основными показателями можно считать скорость движения

<sup>3</sup> Копылова И. Б. Методы обработки методических материалов для магистров направления подготовки 03.04.01 – «Прикладные математика и физика». Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2017. 48 с.; Методы и средства научных исследований. Методы планирования и обработки результатов экспериментов / А. Н. Чубинский [и др.]. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. 109 с. URL: <https://search.rsl.ru/record/01009792444> (дата обращения: 10.02.2021).

<sup>4</sup> Коптяев В. А. Повышение эффективности функционирования колесных энергосредств, работающих в составе машинно-тракторных агрегатов, за счет улучшения их тягово-сцепных свойств: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2002. 19 с. URL: <https://search.rsl.ru/record/01003231092> (дата обращения: 10.02.2021).

<sup>5</sup> Копылова И. Б. Методы обработки методических материалов для магистров направления подготовки...

<sup>6</sup> Методы и средства научных исследований...

$v_n$  (км/ч), твердость почвы  $p$  (МПа), массу мотоблока  $m$  (кг)<sup>7</sup> [12; 25].

Ввиду того, что передвижение мотоблока по обрабатываемому участку всегда сопровождается буксованием движителей относительно почвы, перед началом определения факторных пространств  $v_n$ ,  $p$  и  $m$  необходимо указать величину коэффициента буксования  $\delta$  ведущих колес, при котором достигается максимальная сила тяги почвообрабатывающего агрегата.

Учитывая исследования, проведенные В. В. Гуськовым, и приняв во внимание тяговый класс мотоблоков (0,1), которому соответствует максимальное значение силы тяги, равное 1,8 кН, сделаем вывод, что для мотоблоков коэффициент буксования находится в пределах от 31 до 32 %<sup>8</sup>.

Для выбора факторного пространства скорости движения мотоблока  $v_n$  и твердости обрабатываемой почвы  $p$  воспользуемся рекомендациями, из которых можно сделать некоторые выводы<sup>9</sup> [26; 27]:

– величина скорости мотоблока под управлением человека не должна превышать 4 км/ч;

– минимальная скорость передвижения в процессе обработки почвы (например вспашки) с учетом качества выполняемых работ составляет 2 км/ч;

– диапазон варьирования значений твердостей существующих типов почв, от легких до тяжелых, находится в пределах от 0,7 до 3 МПа соответственно;

– существующие конструкции мотоблоков эксплуатируются только на легких и средних почвах в диапазоне твердости от 0,7 до 1,6 МПа.

В основе выбора факторного пространства массовых характеристик  $m$  необходимо опираться на весовые показатели исследуемого мотоблока, в нашем случае «Нева» МБ23-МультиАГРО Pro с грузами-утяжелителями, оказывающими влияние на повышение тягово-сцепных свойств ведущих колес. В совокупности с массой мотоблока, сменного адаптера (плуга, фрезерного рабочего органа и др.) и установленных грузов-утяжелителей общая масса почвообрабатывающего агрегата находится в пределах от 140 до 180 кг.

Указанные значения массы соответствуют тяговому классу 0,1, к которому причисляются мотоблоки<sup>10</sup>. Однако, учитывая, что центр масс мотоблока расположен на определенном расстоянии от его центральной оси (оси симметрии), указанный диапазон его масс в полной мере не удовлетворяет условиям проведения эксперимента. В связи с этим целесообразно будет выбрать в качестве факторного пространства, учитывающего массу мотоблока, реакцию почвы, приходящуюся на каждое его ведущее колесо  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$ , принимая во внимание балластные грузы.

После проведенного анализа исследований по определению статической

<sup>7</sup> Романов Ф. Ф. Малогабаритные энергосредства. Выбор оптимальных эксплуатационных параметров: монография. СПб.: Агропромиздат, 2000. 182 с. URL: <https://search.rsl.ru/record/01000691674> (дата обращения: 10.02.2021).

<sup>8</sup> ГОСТ 28523–90. Мобильные средства малой механизации сельскохозяйственных работ. Тракторы малогабаритные. Типы и основные параметры. М., 2005. 2 с.; Гуськов В. В., Велев Н. Н., Атаманов А. Ю. Тракторы: Теория: Учеб. для вузов по спец. «Автомобили и тракторы». М.: Машиностроение, 1988. 376 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001407450> (дата обращения: 10.02.2021).

<sup>9</sup> Мотоблок «Агро»: Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. URL: <https://fermerinform.ru/wp-content/uploads/2017/12/agro2.pdf> (дата обращения: 10.02.2021); Мотоблок «Нева» МБ-23 МультиАГРО и его модификации. Руководство по эксплуатации 005.70.0100 РЭ1 [Электронный ресурс]. URL: <http://tehnoservis.ru/docs/mb23.pdf> (дата обращения: 10.02.2021).

<sup>10</sup> ГОСТ 27021–86. Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Тяговые классы. М., 1986. 6 с.



устойчивости мотоблока от опрокидывания было выяснено, что значения  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$  с большой точностью можно вывести из соотношений:

$$R_{K1} = K_1 K_2 F_{gM} + K_4 F_{gB1} - K_5 F_{gB2}, \quad (3)$$

$$R_{K2} = K_1 K_3 F_{gM} - K_5 F_{gB1} + K_4 F_{gB2}. \quad (4)$$

Для наглядности величины  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$  для мотоблока «Нева» МБ23-МультиАГРО Pro сведены в таблицу 1.

Из таблицы 1 следует, что значения  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$ , действующие со стороны почвы, находятся в диапазоне от 570 до 990 Н. Таким образом, область факторного пространства для определения силы тяги на ведущих колесах мотоблока  $R_{Ki} = 570-990$  Н.

Проведя анализ вышеуказанных результатов, окончательно примем интервалы варьирования переменных факторов:  $v_n = 2-4$  км/ч,  $p = 0,7-1,6$  МПа и  $R_{Ki} = 570-990$  Н.

Далее, основываясь на ранее проведенных исследованиях с учетом рекомендаций, определим условия лабораторных исследований (координаты центра плана эксперимента, интервалы и уровни варьирования для принятых значений  $p$ ,  $v_n$  и  $R_{Ki}$ )<sup>11</sup>. Условия проведения лабораторных исследований представлены в таблице 2.

### Результаты исследования

В ходе проведения лабораторных исследований были определены коэффициенты регрессионной модели силы тяги  $F_{TKi}$  (табл. 3).

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

**Значения  $R_{K1}$  и  $R_{K2}$  для мотоблока «Нева» МБ23-МультиАГРО Pro**  
 **$R_{K1}$  and  $R_{K2}$  values for the Neva MB-23-MultiAGRO Pro two-wheel tractor**

Сцепной вес мотоблока с утяжелителями $m$ , кг / Coupling weight of the two-wheel tractor with weights $m$ , kg	Реакция на ведущих колесах мотоблока со стороны почвы / The reaction to the drive wheels of tillers from the soil	
	$R_{K1}$ , Н / $R_{K1}$ , N	$R_{K2}$ , Н / $R_{K2}$ , N
140	814	570
160	903	679
180	990	790

Т а б л и ц а 2

T a b l e 2

**Условия проведения лабораторных исследований**  
**Conditions for conducting laboratory tests**

Переменный фактор / Variable factor	Переменный интервал ( $\Delta X_i$ ) / Variable interval ( $\Delta X_i$ )	Звездное плечо ( $\alpha_i$ ) / Star Shoulder ( $\alpha_i$ )	Уровни переменных факторов / Levels of variable factors				
			0	+1,0	-1,0	-1,682	+1,682
Твердость почвы $p$ , МПа / Soil hardness $p$ , МПа	0,45	0,76	1,15	1,6	0,7	0,390	1,910
Скорость движения $v_n$ , км/ч / Travel speed $v_n$ , km/h	1,00	1,68	3,00	4,0	2,0	1,320	4,680
Реакция на ведущем колесе $R_{Ki}$ , Н / Reaction on the driving wheel $R_{Ki}$ , Н	210,00	143,00	780,00	990,0	570,0	427,000	1133,000

<sup>11</sup> Уланов А. С. Повышение эффективности функционирования мотоблока с лемешно-отвальным плугом...; Методы и средства научных исследований...

**Коэффициенты регрессионной модели силы тяги  $F_{TKi}$  ведущего колеса мотоблока в натуральном виде**
**Coefficients of the regression model of the traction force  $F_{TKi}$  of the drive wheel of the two-wheel tractor in natural form**

Характеристика уравнения регрессии / Characteristic regression equations	Коэффициенты регрессии в кодированном виде / Regression coefficients encoded	
	Обозначение, размерность / Designation, dimension	Значение / Value
Сила $F_{TKi}$ / Strength $F_{TKi}$	$K_{TK0}$ , Н / $K_{TK0}$ , N	132,600000
	$K_{TK1}$ , мм <sup>2</sup> / $K_{TK1}$ , mm <sup>2</sup>	351,600000
	$K_{TK2}$ , Н·ч/км / $K_{TK2}$ , N·h/km	38,400000
	$K_{TK3}$	0,019000
	$K_{TK12}$ , мм <sup>2</sup> ·ч/км / $K_{TK12}$ , mm <sup>2</sup> ·h/km	12,610000
	$K_{TK13}$ , мм <sup>2</sup> /Н / $K_{TK13}$ , mm <sup>2</sup> /N	0,608000
	$K_{TK23}$ , ч/км / $K_{TK23}$ , h/km	0,088000
	$K_{TK11}$ , мм <sup>4</sup> /Н / $K_{TK11}$ , mm <sup>4</sup> /N	87,400000
	$K_{TK33}$ , Н <sup>-1</sup> / $K_{TK33}$ , N <sup>-1</sup>	0,000186

На основании данных таблицы 3 было установлено уравнение регрессии силы тяги на ведущих колесах в натуральном виде:

$$\begin{aligned}
 F_{TKi} = & 132,6 - 351,6p + 38,4v_n - \\
 & - 0,019R_{Ki} - 12,61pv_n + \\
 & + 0,608pR_{Ki} - 0,088v_nR_{Ki} + \\
 & + 87,4p^2 + 0,000186R_{Ki}^2. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Однако, как было отмечено ранее, масса мотоблока «Нева» МБ23-МультиАГРО Pro с целью повышения тягово-сцепных свойств колес мотоблока с почвой может варьироваться путем установки или снятия грузов-утяжелителей, масса которых имеет фиксированное значение (10 кг). Следовательно, масса мотоблока с утяжелителями может быть равной 140, 160 или 180 кг.

Для указанных значений массы мотоблока реакция  $R_{Ki}$  на ведущих колесах, с учетом положения его центра масс, будет равна:

– при  $m = 140$  кг  $R_{K1} = 709,3$  Н,  
 $R_{K2} = 671,5$  Н;  
 – при  $m = 160$  кг  $R_{K1} = 808,7$  Н,  
 $R_{K2} = 770,9$  Н;  
 – при  $m = 180$  кг  $R_{K1} = 908,1$  Н,  
 $R_{K2} = 870,3$  Н.

Учитывая значения  $R_{Ki}$ , регрессионное уравнение силы тяги (5) для каждого ведущего колеса мотоблока  $F_{TK1}$  и  $F_{TK2}$  будут иметь вид:

1. При  $m = 140$  кг

$$\begin{aligned}
 F_{TK1} = & 212,7 + 79,7p - 24v_n - \\
 & - 12,67pv_n + 87,4p^2, \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{TK2} = & 203,7 + 56,7p - 20,7v_n - \\
 & - 12,67pv_n + 87,4p^2. \quad (7)
 \end{aligned}$$

2. При  $m = 160$  кг

$$\begin{aligned}
 F_{TK1} = & 238,8 + 140,1p - 33,7v_n - \\
 & - 12,67pv_n + 87,4p^2, \quad (8)
 \end{aligned}$$

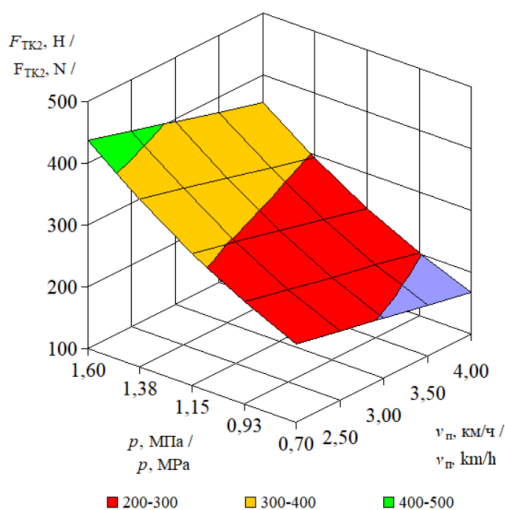
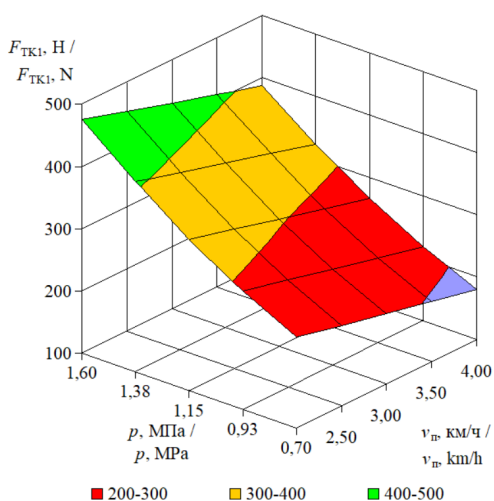
$$\begin{aligned}
 F_{TK2} = & 228,5 + 117,1p - 29,4v_n - \\
 & - 12,67pv_n + 87,4p^2. \quad (9)
 \end{aligned}$$

3. При  $m = 180$  кг

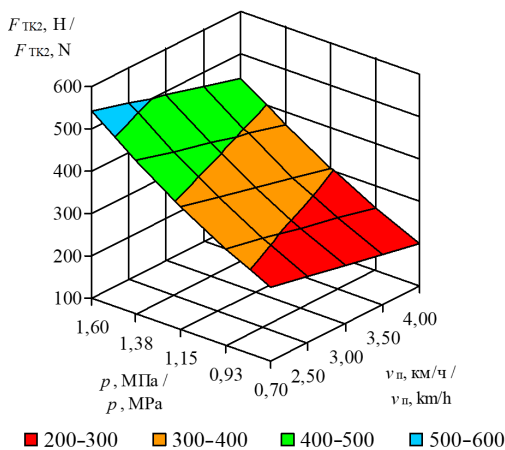
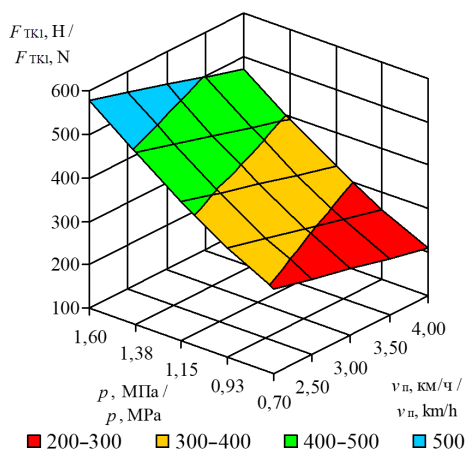
$$F_{TK1} = 268,7 + 200,5p - 41,5v_n - 12,67pv_n + 87,4p^2, \quad (10)$$

$$F_{TK2} = 257 + 177,5p - 38,2v_n - 12,67pv_n + 87,4p^2. \quad (11)$$

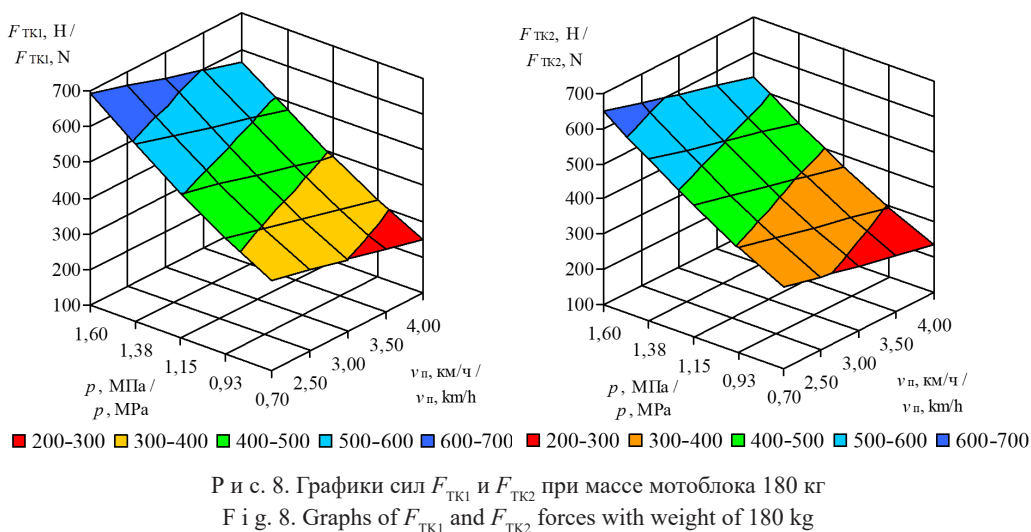
На рисунках 6–8 представлены частные графические решения уравнений (6) и (7), (8) и (9), (10) и (11) для массы мотоблока 140, 160 и 180 кг соответственно с осями координат  $F_{TK1}$  ( $F_{TK2}$ ),  $p$  и  $v_n$ . Полученные результаты коррелируют с ранее проведенными исследованиями [28–30].



Р и с. 6. Графики сил  $F_{TK1}$  и  $F_{TK2}$  при массе мотоблока 140 кг  
F i g. 6. Graphs of  $F_{TK1}$  and  $F_{TK2}$  forces with weight of 140 kg



Р и с. 7. Графики сил  $F_{TK1}$  и  $F_{TK2}$  при массе мотоблока 160 кг  
F i g. 7. Graphs of  $F_{TK1}$  and  $F_{TK2}$  forces with weight of 160 kg



### Обсуждение и заключение

Таким образом, предложенная конструкция подвижного модуля экспериментального стенда позволяет в лабораторных условиях обеспечить проведение исследований функционирования ведущих колес мотоблока как с пневматическими шинами, так и с металлическими грунтозацепами с возможностью определения их силы тяги  $F_{TK}$  на различных режимах работы, в процессе проведения обработки почвы различными тяговыми и тягово-приводными сменными адаптерами [20].

В результате лабораторных испытаний были получены регрессионное уравнение в общем виде (5), его частные решения (6)–(11) и графические модели сил тяги  $F_{TK1} = f(p; v_n)$  и  $F_{TK2} = f(p; v_n)$  (рис. 6–8), показывающие изменение силовых характеристик для различных значений массы пахотного агрегата на каждом ведущем колесе мотоблока.

Использование полученных результатов позволит в дальнейшем определять наиболее эффективные режимы функционирования мотоблока при проведении различных технологических операций, связанных с обработкой почвы.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хвостов, Е. Н. Влияние приемов основной и предпосевной обработки почвы и удобрений на продуктивность звена полевого севооборота / Е. Н. Хвостов, Л. Н. Прокина. – DOI 10.30766/2072-9081.2018.67.6.115-120 // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. – 2018. – Т. 67, № 6. – С. 115–120. – URL: <https://www.agronauka-sv.ru/jour/article/view/287> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
2. Тарчоков, Х. Ш. Агротехника в борьбе с сорняками / Х. Ш. Тарчоков, Ф. Х. Бжинаев. – DOI 10.31677/2311-0651-2018-0-4-46-50 // *Инновации и продовольственная безопасность*. – 2018. – № 4. – С. 46–50. – URL: <https://innfoodsecr.elpub.ru/jour/article/view/464> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
3. Эффективные севообороты и приемы возделывания культур при орошении / П. Д. Шевченко, А. Д. Дробилко, А. С. Елецкий [и др.] // *Земледелие*. – 2007. – № 4. – С. 33–34. – URL: <http://jurzemledelie.ru/arkhiv-nomerov/4-2007> (дата обращения: 10.02.2021).

4. Анализ энергоёмкости процесса вспашки почвы мотоблоком в агрегате с лемешно-отвальным плугом / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов, Н. И. Наумкин [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.029.201903.414-427](https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.414-427) // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 414–427. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/84-19-3/721-10-15507-0236-2910-029-201903-6> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
5. Повышение эффективности работы почвообрабатывающих фрез / А. В. Безруков, Н. И. Наумкин, В. Ф. Купряшкин, А. В. Брагин // Сельский механизатор. – 2016. – № 9. – С. 6–7. – URL: [http://selmech.msk.ru/916.html#\\_Повышение\\_эффективности\\_работы](http://selmech.msk.ru/916.html#_Повышение_эффективности_работы) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
6. Обоснование режимов работы пахотного агрегата на базе мотоблока «Нева» МБ-23-МУЛЬТИАГРО Pro с плугом П1-20/3 по критерию отсутствия буксования ведущих колес с почвой / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов, М. Г. Шляпников, А. С. Князьков // Вестник НГИЭИ. – 2019. – № 7 (98). – С. 5–15. – URL: [https://yadi.sk/i/BJtkW-\\_KB315HQ](https://yadi.sk/i/BJtkW-_KB315HQ) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
7. Уланов, А. С. Теоретическое исследование устойчивости движения мотоблока с плугом при вспашке почвы / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов // Нива Поволжья. – 2019. – № 1 (50). – С. 101–108. – URL: [https://niva-volga.ru/file/vipuski/2019\\_1\\_50/Содержание.pdf](https://niva-volga.ru/file/vipuski/2019_1_50/Содержание.pdf) (дата обращения: 10.02.2021).
8. Купряшкин, В. Ф. Обоснование конструкции динамометрического модуля для исследования лемешно-отвального плуга мотоблока и его практическая апробация с использованием технологий реверс-инжиниринга / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов, Н. И. Наумкин. – DOI [10.15507/0236-2910.028.201803.400-415](https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.400-415) // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 3. – С. 400–415. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/62-18-3/431-10-15507-0236-2910-028-201803-9> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
9. Донцов, И. Е. Установка для объемного динамометрирования почвообрабатывающих рабочих органов и результаты ее использования / И. Е. Донцов, М. Н. Лысыч // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – № 2. – С. 9–15. – URL: [https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory\\_i\\_selhozmashiny\\_2\\_2017.pdf](https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selhozmashiny_2_2017.pdf) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
10. Мяленко, В. И. Пространственное динамометрирование рабочих органов почвообрабатывающих орудий / В. И. Мяленко, Н. А. Маринов. – DOI [10.22314/2073-7599-2017-5-22-26](https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-5-22-26) // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2017. – № 5. – С. 22–26. – URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/207> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
11. Исследование процесса взаимодействия ведущих колес трактора с грунтовой поверхностью / В. В. Гуськов, А. А. Дзёма, А. С. Колола [и др.] – DOI: [10.21122/2227-1031-2017-16-1-83-88](https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-83-88) // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 83–88. – URL: <https://sat.bntu.by/jour/article/view/982> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
12. Дунаев, А. В. Совершенствование технической эксплуатации машинно-тракторного парка агропромышленного комплекса / А. В. Дунаев, В. И. Балабанов // Техника и оборудование для села. – 2014. – № 11. – С. 28–31. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22515097> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
13. Патент № 1499145 СССР, МПК G01M 17/02. Стенд для испытаний шин : № 3891043 : заявл. 06.05.1985 : опубл. 07.08.1989 / Щемелев А. М., Хустенко А. Н., Похвалов С. В. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1499145A1\\_19890807](https://yandex.ru/patents/doc/SU1499145A1_19890807) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
14. Черепанов, Л. А. Стенд для испытаний сцепных свойств колес легковых автомобилей / Л. А. Черепанов, А. А. Елизаров. – DOI [10.46960/62045\\_2018\\_4\\_22](https://doi.org/10.46960/62045_2018_4_22) // Транспортные системы. – 2018. – № 4 (10). – С. 22–26. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36664117> (дата обращения: 10.02.2021).
15. Патент № 1437723 СССР, МПК G01M 17/02. Стенд для исследования тягово-сцепных свойств колесного движителя : № 4250017 : заявл. 26.05.1987 : опубл. 15.11.1988 / Тимошенко В. К., Хмара Л. А., Деревянчук М. И., Шипилов А. С. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1437723A1\\_19881115](https://yandex.ru/patents/doc/SU1437723A1_19881115) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.
16. Патент № 1562730 СССР, МПК G01M 17/02. Стенд для испытаний пневматических шин : № 4484627 : заявл. 29.07.1988 : опубл. 07.05.1990 / Гуськов В. В., Бойков В. П., Козачевский Г. Г.,

Свирищевский И. Ю. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1562730A1\\_19900507](https://yandex.ru/patents/doc/SU1562730A1_19900507) (дата обращения: 10.02.2021).

17. Патент № 1029028 СССР, МПК G01M 17/02. Стенд для испытания движителей : № 3361468 : заявл. 05.12.1981 : опубл. 15.07.1983 / С. А. Владыкин, В. В. Гринев, М. И. Маленков [и др.]. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1029028A1\\_19830715](https://yandex.ru/patents/doc/SU1029028A1_19830715) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.

18. Патент № 875240 СССР, МПК G01M 17/02. Стенд для испытания колес и способ испытания колес на стенде : № 2788153 : заявл. 02.08.1979 : опубл. 23.10.1981 / Левин М. А., Бойков В. П. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/SU875240A1\\_19811023](https://yandex.ru/patents/doc/SU875240A1_19811023) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.

19. Патент № 192280 Российская Федерация, МПК G01M 17/00. Стенд для исследования шин пневматических колес : № 2019108499 : заявл. 25.03.2019 : опубл. 11.09.2019 / Кузнецов В. В., Гринь А. М., Блохин В. Н. [и др.]. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1\\_20190911](https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1_20190911) (дата обращения: 10.02.2021).

20. Патент № 188610 Российская Федерация, МПК G01M 17/00. Подвижный модуль испытательного стенда : № 2019102333 : заявл. 29.01.2019 : опубл. 17.04.2019 / Купряшкин В. Ф., Уланов А. С., Купряшкин В. В. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва». – 5 с. – URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1\\_20190911](https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1_20190911) (дата обращения: 10.02.2021).

21. Стенд для определения силы тяги на ходовых колесах малогабаритной техники / В. Ф. Купряшкин, А. С. Уланов, В. Н. Купряшкина [и др.] // Сельский механизатор. – 2019. – № 2. – С. 38–39. – URL: <http://www.selmech.msk.ru/219.html> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.

22. Гапич, Д. С. К вопросу о тяговых испытаниях колесных тракторов различных конструктивных схем / Д. С. Гапич // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2014. – № 1 (33). – С. 229–234. – URL: [http://www.volgau.com/Portals/0/izv\\_auk/izv\\_auk\\_full/izvestiya\\_2014\\_33\\_1.pdf?ver=2014-03-26-132210-130](http://www.volgau.com/Portals/0/izv_auk/izv_auk_full/izvestiya_2014_33_1.pdf?ver=2014-03-26-132210-130) (дата обращения: 10.02.2021).

23. Крупчатников, Р. А. Анализ результатов сравнительных тяговых испытаний малогабаритных тракторов / Р. А. Крупчатников, Б. М. Ковынев // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2008. – № 3. – С. 39–41. – URL: <https://clck.ru/TEd7o> (дата обращения: 10.02.2021).

24. Соловьев, Е. Т. Обоснование тягового диапазона малогабаритного трактора / Е. Т. Соловьев // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2008. – № 3. – С. 37–39. – URL: <https://clck.ru/TEdBh> (дата обращения: 10.02.2021).

25. Самсонов, В. А. Расчет максимальной энергонасыщенности сельскохозяйственного трактора / В. А. Самсонов, Ю. Ф. Лачуга // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – № 10. – С. 33–38. – URL: [https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory\\_i\\_selhoz mashiny\\_No10\\_2017\\_dlya\\_sajta.pdf](https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selhoz mashiny_No10_2017_dlya_sajta.pdf) (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.

26. Калинин, А. Б. Обоснование шага измерения твердости дерново-подзолистых почв при проведении картографирования в технологиях точного земледелия / А. Б. Калинин, А. А. Устроенов, П. П. Кудрявцев // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2018. – № 1 (94). – С. 112–117. – URL: <https://www.sznii.ru/images/IAEP/jurnal/jurnali/Jurnal94.pdf> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.

27. Гаранин, Г. В. Объекты, показатели, средства управления и контроля качества работ в полеводстве / Г. В. Гаранин // Международный технико-экономический журнал. – 2016. – № 2. – С. 80–85. – URL: <http://www.tite-journal.com/content/2016/vypusk-no2/#c10356> (дата обращения: 10.02.2021). – Рез. англ.

28. Баладин, Е. А. Результаты сравнительных испытаний тяговых колес мотоблоков «Ко – Нева» / Е. А. Баладин // Вестник студенческого научного общества. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 87–91. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34921104> (дата обращения: 10.02.2021).

29. Narang, S. Draftability of a 8.95 kW Walking Tractor on Tilled Land / S. Narang, A. C. Varshney. – DOI 10.1016/j.jterra.2005.04.006 // Journal of Terramechanics. – 2006. – Vol. 43, Issue 4. – Pp. 395–409. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022489805000406?via%3Dihub> (дата обращения: 10.02.2021).

30. **Rasool, S.** Improving the Tractive Performance of Walking Tractors Using Rubber Tracks / S. Rasool, H. Raheman. – DOI [10.1016/j.biosystemseng.2017.12.013](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.12.013) // Biosystems Engineering. – 2018. – Vol. 167. – Pp. 51–62. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S153751101730822X?via%3Dihub> (дата обращения: 10.02.2021).

*Поступила 10.10.2020; одобрена после рецензирования 14.12.2020; принята к публикации 21.12.2020*

*Об авторах:*

**Купряшкин Владимир Федорович**, заведующий кафедрой мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, Researcher ID: [L-5153-2018](https://orcid.org/0000-0002-7512-509X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, [kupwf@mail.ru](mailto:kupwf@mail.ru)

**Уланов Александр Сергеевич**, преподаватель кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, Researcher ID: [L-4662-2018](https://orcid.org/0000-0001-6041-6911), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, [ulanow.aleksandr2010@yandex.ru](mailto:ulanow.aleksandr2010@yandex.ru)

**Шляпников Михаил Геннадьевич**, инженер кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4784-4695>, [mix.shlyapnickoff2015@yandex.ru](mailto:mix.shlyapnickoff2015@yandex.ru)

**Гусев Александр Юрьевич**, аспирант кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5808-4169>, [a.gusev57@yandex.ru](mailto:a.gusev57@yandex.ru)

**Славкин Владимир Иванович**, профессор кафедры эксплуатации и технического сервиса машин ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный заочный университет» (143907, Российская Федерация, г. Балашиха, ш. Энтузиастов, д. 50), доктор технических наук, Researcher ID: [AAF-2576-2021](https://orcid.org/0000-0002-6116-6616), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-6616>, [mcht@rambler.ru](mailto:mcht@rambler.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

В. Ф. Купряшкин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, формирование выводов, доработка текста.

А. С. Уланов – литературный и патентный анализ, проведение лабораторных исследований ведущих колес мотоблока, обработка результатов эксперимента, подготовка начального варианта текста и редактирование текста.

М. Г. Шляпников – проведение лабораторных исследований ведущих колес мотоблока, обработка результатов эксперимента.

А. Ю. Гусев – проведение лабораторных исследований, визуализация текста.

В. И. Славкин – формулирование основной концепции исследования, формирование выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Khvostov E.N., Prokina L.N. The Effect of Primary and Preliminary Methods of Soil Treatments and Fertilizers on the Productivity of Field Crop Rotation Link. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2018; 67(6):115-120. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.67.6.115-120>

2. Tarchokov H.Sh., Bzhinaev F.H. Agrotechnology in Fight against Weeds. *Innovatsii i proizvodstvennaya bezopasnost* = Innovations and Food Safety. 2018; (4):46-50. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2018-0-4-46-50>

3. Shevchenko P.D., Drobilko A.D., Yeletskiy A.S., et al. [Effective Crop Rotations and Cultivation Methods under Irrigation]. *Zemledelie* = Agriculture. 2007; (4):33-34. Available at: <http://jurzemledelie.ru/arkhiv-nomerov/4-2007> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)

4. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Naumkin N.I., et al. Analysis of Energy Consumption during Plowing Using a Motor-Block with Moldboard Plow. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):414-427. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.414-427>

5. Bezrukov A.V., Naumkin N.I., Kupriashkin V.Ph., et al. Improving the Efficiency of Tillage Cutters. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2016; (9):6-7. Available at: [http://selmech.msk.ru/916.html#ПОВЫШЕНИЕ\\_ЭФФЕКТИВНОСТИ\\_РАБОТЫ](http://selmech.msk.ru/916.html#ПОВЫШЕНИЕ_ЭФФЕКТИВНОСТИ_РАБОТЫ) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)

6. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Shlyapnikov M.G., et al. Substantiation of Modes of Arable Unit on the Basis of Motoblock Neva MB-23c-Multiagro Pro Plow P1-20/3 by the Criterion of Absence of Slipping of Wheels with the Soil. *Vestnik NGIEI* = Bulletin NGIEI. 2019; (7):5-15. Available at: <https://yadi.sk/i/BJtkW-KB3I5HQ> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)

7. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S. [Theoretical Study of the Stability of a Power Tiller with a Plow When Plowing the Soil]. *Niva Povolzhya* = Cornfield of Volga Region. 2019; (1):101-108. Available at: [https://niva-volga.ru/file/vipuski/2019\\_1\\_50/Содержание.pdf](https://niva-volga.ru/file/vipuski/2019_1_50/Содержание.pdf) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)

8. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Naumkin N.I. Design of a Dynamometric Module for Studying a Motoblock Share-Moldboard Plow and Its Practical Testing by Using Reverse Engineering. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2018; 28(3):400-415. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.400-415>

9. Dontsov I.E., Lysych M.N. Installation for Three-Dimensional Dynamic Measurement of the Tilling Tools and the Results of Its Use. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2017; (2):9-15. Available at: [https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory\\_i\\_selkhoz\\_mashiny\\_2\\_2017.pdf](https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selkhoz_mashiny_2_2017.pdf) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)

10. Myalenko V.I., Marinov N.A. Spatial Dynamometry of Working Tools of Agricultural Implements. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2017; (5):22-26. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-5-22-26>

11. Guskov V.V., Dzioma A.A., Kolola A.S., et al. Investigation of Process Pertaining to Interaction of Tractor Driving Wheels with Ground Surface. *Nauka i tekhnika* = Science & Technique. 2017; 16(1):83-88. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-1-83-88>

12. Dunayev A.V., Balabanov V.I. Improvement of Technical Maintenance of Machine-and-Tractor Fleet in Agro-Industrial Complex. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2014; (11):28-31. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22515097> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)

13. Bed for Testing Pneumatic Tyres: Patent 1499145 USSR. No. 3891043; appl. 06.05.1985; publ. 07.08.1989. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1499145A1\\_19890807](https://yandex.ru/patents/doc/SU1499145A1_19890807) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)

14. Cherepanov L.A., Yelizarov A.A. [Traction Test Bench for Passenger Car Wheels]. *Transportnyye sistemy* = Transport Systems. 2018; (4):22-26. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.46960/62045\\_2018\\_4\\_22](https://doi.org/10.46960/62045_2018_4_22)

15. Bed for Investigating Tractive-Cohesion Properties of Wheeled Propelling Gear: Patent 1437723 USSR. No. 4250017; appl. 26.05.1987; publ. 15.11.1988. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1437723A1\\_19881115](https://yandex.ru/patents/doc/SU1437723A1_19881115) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)

16. [Test Stand for Pneumatic Tires]: Patent 1562730 USSR. No. 4484627; appl. 29.07.1988; publ. 07.05.1990. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1562730A1\\_19900507](https://yandex.ru/patents/doc/SU1562730A1_19900507) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)

17. Propulsor Testing Stand: Patent 1029028 USSR. No. 3361468; appl. 05.12.1981; publ. 15.07.1983. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/SU1029028A1\\_19830715](https://yandex.ru/patents/doc/SU1029028A1_19830715) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)



18. Method and Stand for Testing Wheels on Stand: Patent 875240 USSR. No. 2788153; appl. 02.08.1979; publ. 23.10.1981. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/SU875240A1\\_19811023](https://yandex.ru/patents/doc/SU875240A1_19811023) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
19. [Stand for Pneumatic Wheel Tire Research]: Patent 192280 Russian Federation. No. 2019108499; appl. 25.03.2019; publ. 11.09.2019. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1\\_20190911](https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1_20190911) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
20. [Movable Module of the Test Bench]: Patent 188610 Russian Federation. No. 2019102333; appl. 29.01.2019; publ. 17.04.2019. 5 p. Available at: [https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1\\_20190911](https://yandex.ru/patents/doc/RU192280U1_20190911) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
21. Kupryashkin V.F., Ulanov A.S., Kupryashkina V.N., et al. Stand for Determining the Force of Traction on the Driving Wheels Compact Machinery. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2019; (2):38-39. Available at: <http://www.selmech.msk.ru/219.html> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
22. Gapitch D.S. The Question of Various Constructive Schemes Wheel Tractors Traction Test. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* = Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2014; (1):229-234. Available at: [http://www.volgau.com/Portals/0/izv\\_auk/izv\\_auk\\_full/izvestiya\\_2014\\_33\\_1.pdf?ver=2014-03-26-132210-130](http://www.volgau.com/Portals/0/izv_auk/izv_auk_full/izvestiya_2014_33_1.pdf?ver=2014-03-26-132210-130) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
23. Krupchatnikov R.A., Kovynev B.M. [Analysis of the Results of Comparative Traction Tests of Small Tractors]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Kursk State Agricultural Academy Bulletin. 2008; (3):39-41. Available at: <https://clck.ru/TEd7o> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
24. Solovev Ye.T. [Justification of Traction Range of a Small Tractor]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Kursk State Agricultural Academy Bulletin. 2008; (3):37-39. Available at: <https://clck.ru/TEdBh> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
25. Samsonov V.A., Lachuga Yu.F. Calculation of the Maximum Energy Saturation of an Agricultural Tractor. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2017; (10):33-38. Available at: [https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory\\_i\\_selkhoz mashiny\\_No10\\_2017\\_dlya\\_sajta.pdf](https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selkhoz mashiny_No10_2017_dlya_sajta.pdf) (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
26. Kalinin A.B., Ustroev A.A., Kudriavtsev P.P. Substantiation of Measurement Interval of Sod- Podzolic Soil Penetration Index in Mapping Surveys as a Part of Precision Farming Technologies. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2018; (1):112-117. Available at: <https://www.sznii.ru/images/IAEP/jurnal/jurnali/Jurnal94.pdf> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
27. Garanin G.V. Objects, Indicators, the Control Means and Quality Control of Works in the Field Husbandry. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal* = The International Technical-Economic Journal. 2016; (2):80-85. Available at: <http://www.tite-journal.com/content/2016/vypusk-no2/#c10356> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
28. Balandin Ye.A. [Results of Comparative Tests of Traction Wheels of the “Ko-Neva” Two-Wheel Traktor]. *Vestnik studencheskogo nauchnogo obshchestva* = Student Scientific Society Bulletin. 2017; 8(2):87-91. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=34921104> (accessed 10.02.2021). (In Russ.)
29. Narang S., Varshney A.C. Draftability of a 8.95 kW Walking Tractor on Tilled Land. *Journal of Terramechanics*. 2006; 43(4):395-409. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2005.04.006>
30. Rasool S., Raheman H. Improving the Tractive Performance of Walking Tractors Using Rubber Tracks. *Biosystems Engineering*. 2018; 167:51-62. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.12.013>

*Submitted 10.10.2020; approved after reviewing 14.12.2020; accepted for publication 21.12.2020*

*About the authors:*

**Vladimir F. Kupryashkin**, Head of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State Uni-

versity (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: L-5153-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7512-509X>, kupwf@mail.ru

**Aleksandr S. Ulanov**, Lecturer of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: L-4662-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6041-6911>, ulanow.aleksandr2010@yandex.ru

**Michail G. Shlyapnikov**, Engineer of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4784-4695>, mix.shlyapnickoff2015@yandex.ru

**Aleksandr Yu. Gusev**, Postgraduate Student of the Prof. Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5808-4169>, a.gusev57@yandex.ru

**Vladimir I. Slavkin**, Professor of the Chair of Operation and Technical Service of Machines, Russian State Agrarian Correspondence University (50 Shosse Entuziastov, Balashikha 143907, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: AAF-2576-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6116-6616>, mcht@rambler.ru

*Contribution of the authors:*

V. F. Kupryashkin – scientific guidance, formulation of the main concept of the study, the formation of conclusions, finalization of the text.

A. S. Ulanov – literature and patent analysis, laboratory research of power tiller drive wheels, processing of experimental results, preparation of the initial version of the text and text editing.

M. G. Shlyapnikov – conducting laboratory tests of the drive wheels of a power tiller, processing the results of the experiment.

A. Yu. Gusev – conducting laboratory tests, text visualization.

V. I. Slavkin – formulation of the basic concept of research, the formation of conclusions.

*All authors have read and approved the final manuscript.*