

# ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ БАЛЛАСТИРОВАНИЯ И УГЛА ПРИЛОЖЕНИЯ СИЛЫ ТЯГИ ДЛЯ ГУСЕНИЧНОГО ТРАКТОРА

## THE CHOICE OF A RATIONAL BALLASTING SCHEME AND THE ANGLE OF APPLICATION OF THE TRACTION FORCE FOR A CATERPILLAR TRACTOR

**К.И. ГОРОДЕЦКИЙ**<sup>1</sup>, д.т.н.  
**В.М. ШАРИПОВ**<sup>1</sup>, д.т.н.  
**Е.М. АЛЕНДЕЕВ**<sup>2</sup>, к.т.н.  
**А.М. ЛАВЛИНСКИЙ**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>2</sup> ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва, Россия, kg1101@yandex.ru, evg9702@gmail.com

**K.I. GORODETSKIY**<sup>1</sup>, DSc in Engineering  
**V.M. SHARIPOV**<sup>1</sup>, DSc in Engineering  
**E.M. ALENDEEV**<sup>2</sup>, PhD in Engineering  
**A.M. LAVLINSKIY**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, kg1101@yandex.ru

<sup>2</sup> Central scientific research automobile and automotive engine institute «NAMI», Moscow, Russia, evg9702@gmail.com

Особенность компоновки современных гусеничных тракторов такова, что центр масс трактора, как правило, расположен со смещением от середины опорной поверхности гусеницы вперед. Такое компоновочное решение в сочетании с использованием балластных грузов, размещаемых чаще всего спереди трактора, позволяет обеспечить его требуемые тягово-сцепные свойства при агрегатировании с орудиями. Однако, поскольку трактор работает с широким диапазоном нагрузок, при смене орудия с высоким тяговым сопротивлением, к примеру, на прицеп с низким сопротивлением возникает необходимость и регулировки массы балласта. На практике такая регулировка зачастую не осуществляется, т.е. один раз установленный передний балласт используется в течение всего срока эксплуатации машины, ухудшая ее топливную экономичность и не обеспечивая оптимальные тягово-сцепные свойства. В связи с этим важной представляется задача поиска решений, которые бы позволили устранить необходимость регулировки массы балласта в зависимости от крюковой нагрузки. Для этого в статье рассмотрена схема балластирования гусеничного трактора при приложении силы тяги под положительным углом. Также для трактора Challenger MT865B при ряде допущений о его геометрических параметрах была построена расчетная зависимость коэффициента балластирования от коэффициента использования сцепного веса и угла приложения силы тяги. Анализ зависимости позволил прийти к выводу о возможности обеспечения совпадения центра давления с серединой опорной поверхности трактора на всем диапазоне его нагрузок при неизменных значениях коэффициента балластирования и угла приложения силы тяги. Для расчета данных оптимальных значений указанных параметров в работе представлены соответствующие формулы.

**Ключевые слова:** гусеничный трактор, балластирование, центр давления, опорная поверхность гусеницы, сила тяги.

A feature of the layout of modern tracked tractors is that the center of mass of the tractor is usually located with a forward shift from the center of the caterpillar support surface. Such a layout solution, in combination with the use of ballast weights placed most often in front of the tractor, makes it possible to provide its required traction and coupling properties when assembling with guns. However, since the tractor operates with a wide range of loads, when changing the gun with high traction resistance, for example, to a low-resistance trailer, it becomes necessary to adjust the weight of the ballast. In practice, this adjustment is often not carried out, i.e. Once installed, the front ballast is used throughout the operating life of the machine, worsening its fuel economy and not providing optimum traction and coupling properties. In this regard, the important task is to find solutions that would eliminate the need to adjust the mass of the ballast depending on the hook load. For this purpose, the article deals with the scheme of ballasting of a caterpillar tractor with the application of traction force at a positive angle. Also, for the Challenger MT865B tractor, with a number of assumptions about its geometric parameters, the calculated dependence of the ballasting coefficient on the coupling weight and the thrust angle was constructed. Dependence analysis allowed to come to the conclusion that it is possible to ensure the coincidence of the pressure center with the middle of the tractor's support surface over the entire range of its loads, with constant values of the ballasting factor and the angle of application of the traction force. To calculate the optimal values of these parameters, the paper presents the corresponding formulas.

**Keywords:** caterpillar tractor, ballasting, pressure center, caterpillar bearing surface, traction force.

## Введение

На сегодняшний день балластирование трактора является наиболее распространенным способом повышения его тягово-сцепных свойств. При этом требования, предъявляемые к балластированию колесных и гусеничных машин, различны. Так, на колесных тракторах стремятся обеспечить максимальную догрузку ведущих колес, что достигается размещением боковых и передних балластов, заполнением камер ведущих колес жидкостью, а также – при работе с навесными орудиями автоматическим управлением навесной системой. Для гусеничных тракторов необходимо обеспечить равномерное распределение нагрузки по всей длине опорной поверхности гусениц [1–4]. Наиболее простым способом выполнения данного условия, не требующим изменений в компоновке трактора, является размещение балластного груза спереди машины на специальном кронштейне. На рис. 1 приведен пример таких тракторов с передним балластом. Однако указанный способ не обеспечивает оптимальные технико-экономические показатели. При этом в ряде работ [5, 6] предлагается прикладывать силу тяги под положительным углом, который создает ее вертикальную составляющую, препятствующую опрокидыванию трактора, что в совокупности с балластированием позволяет обеспечить возможность управления положением центра давления.

## Цель работы

Целью работы является анализ возможности обеспечения оптимальных тягово-сцепных свойств трактора на всем диапазоне его нагрузок при условии постоянства массы балласта и отсутствия конструктивных изменений в компоновке машины.

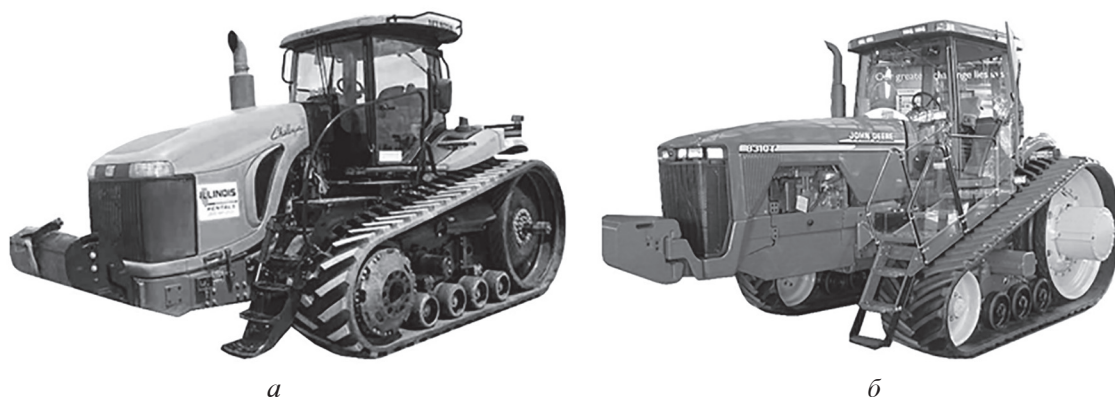


Рис. 1. Гусеничные тракторы:  
а – Challenger MT865B; б – John Deere 8310T

## Материалы, методы исследования и обсуждение результатов

Для достижения поставленной цели рассмотрим схему сил, действующих на трактор при его установившейся работе на горизонтальной поверхности (рис. 2). Особенностью данной схемы является приложение силы тяги под углом  $\gamma$  и размещение балласта сзади на специальном кронштейне. Также балласт может быть размещен на нижних тягах навески.

На рис. 2 принято:  $G_{тр}$ ,  $G_б$  – вес трактора и балласта, соответственно;  $P_{кр}$ ,  $P_{кр} \operatorname{tg} \gamma$  – горизонтальная и вертикальная составляющая силы тяги  $W$ ;  $R_n$  – суммарная реакция почвы на гусеницы;  $X_n$  – реакция почвы на гусеничный движитель;  $L$  – длина опорной поверхности;  $X_d$  – положение центра давления относительно оси вращения  $O$  ведущего колеса;  $a$  – расстояние от точки  $b$  до точки  $O$ ;  $b$  – расстояние от центра масс трактора до точки  $O$ ;  $c$  – расстояние от центра масс балласта до точки  $O$ ;  $d$  – длина нижней тяги 2;  $e$  – высота положения оси вращения нижней тяги 2;  $f$  – расстояние от точки  $O$  до точки 3 нижней тяги 2 в горизонтальном положении;  $h_{кр}$  – высота положения точки  $b$ ;  $k$  – расстояние от точки 3 нижней тяги 2 в ее крайнем положении до опорной поверхности;  $r$  – высота положения точки  $O$ ;  $\gamma$  – угол приложения силы тяги.

Распределение нормальных реакций почвы на опорные поверхности гусеничных движителей трактора характеризуется положением центра давления  $X_d$ , которое для принятых обозначений может быть определено из уравнения моментов, записанного относительно вертикали, проходящей через ось вращения ведущего колеса трактора [1, 2]:

$$X_d = \frac{G_{тр} b + P_{кр} \operatorname{tg} \gamma a - P_{кр} h_{кр} \pm G_б y}{G_б + G_{тр} - P_{кр} \operatorname{tg} \gamma}$$

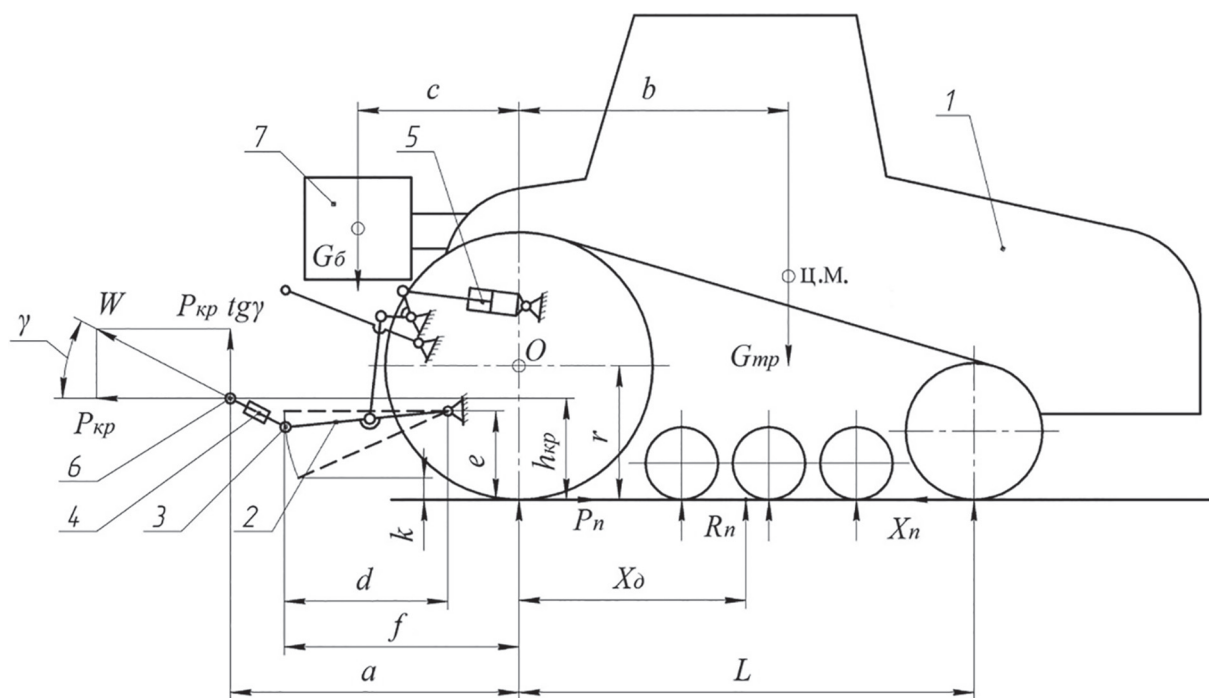


Рис. 2. Схема сил, действующих на гусеничный трактор:

1 – трактор; 2 – нижняя тяга навесной системы; 3 – точка крепления дышла к нижней тяге; 4 – дышло регулируемой длины; 5 – гидроцилиндр навесной системы; 6 – точка крепления орудия к дышлу; 7 – балласт

В данном выражении знак момента от веса балласта ( $G_6 y$ ) будет зависеть от положения балласта по отношению к оси вращения ведущего колеса (знак «+» – балласт спереди от оси вращения, «-» – сзади), а знак силы ( $P_{кр} \operatorname{tg} \gamma$ ) будет определяться знаком угла  $\gamma$ .

В соответствии с рис. 2 и учитывая тот факт, что для обеспечения высоких тягово-сцепных свойств трактора его центр давления должен находиться на середине его опорной поверхности ( $X_d = 0,5L$ ), а также расстояние от балласта до оси вращения ведущего колеса  $y$  равно  $c$ , можно записать:

$$G_{тр} \left( \frac{L}{2} - b \right) + G_6 \left( \frac{L}{2} + c \right) - P_{кр} \operatorname{tg} \gamma \left( \frac{L}{2} + a \right) + P_{кр} h_{кр} = 0, \quad (1)$$

Данное выражение соответствует уравнению моментов, записанному относительно середины опорной поверхности. Также его можно преобразовать, как:

$$\left( \frac{L}{2} - b \right) + \psi \left( \frac{L}{2} + c \right) - \varphi \operatorname{tg} \gamma \left( \frac{L}{2} + a \right) + \varphi h_{кр} = 0, \quad (2)$$

где  $\psi = \frac{G_6}{G_{тр}}$  – коэффициент балластирования;  $\varphi = \frac{P_{кр}}{G_{тр}}$  – коэффициент использования сцепного веса трактора без учета массы балласта.

Коэффициент балластирования  $\psi$  – безразмерная величина, показывающая, как вес установленного балласта соотносится с весом трактора. Из выражения (2) он равен:

$$\psi = \frac{\varphi \left( \operatorname{tg} \gamma \left( \frac{L}{2} + a \right) - h_{кр} \right) - \left( \frac{L}{2} - b \right)}{\left( \frac{L}{2} + c \right)}.$$

В табл. 1 для трех гусеничных тракторов схожей компоновки и разных тяговых классов (рис. 1) приведены параметры, среди которых значения  $a, b, c$  были приняты условно, основываясь на известных размерах машин [7]. Трактор Challenger MT865B и тракторы John Deere 8310T, Challenger MT745 – разного тягового класса, John Deere 8310T и Challenger MT745 – одного. Данное обстоятельство также может быть отмечено по числу  $n$  опорных катков, которое тем больше, чем больше длина опорной поверхности гусениц. Основываясь на данных табл. 1, можно заключить, что, не смотря на разницу в тяговых классах и фирмах-производителях, значения параметров навесных систем

Таблица 1

Исходные и расчетные данные

Параметр	Challenger MT865B	Challenger MT745	John Deere 8310T
$N_{дв}$ , кВт	340	155	154
$m_{тр}$ , кг	20021	12710	11775
$n$ , шт	4	3	3
$L$ , мм	3110	2600	2261
$r$ , мм	890	849	853
$d$ , мм	929	1005	1056
$f$ , мм	1369	1230	1231
$k$ , мм	230	230	203
$e$ , мм	590	549	573
$h_{кр}$ , мм	590	590	590
$a$ , мм	1730	1600	1600
$b$ , мм	1800	1510	1310
$c$ , мм	1000	950	950
$\gamma_{онт}$ , град	10,2	11,5	12,2
$\psi_{онт}$	0,096	0,093	0,087
$P_{кр} \operatorname{tg} \gamma$ , кН, при $P_{кр} = 0,4 m_{тр} g$	14,2	10,1	10,0

рассматриваемых машин близки. В связи с этим для проведения дальнейших расчетов также примем, что высоты  $h_{кр}$  точки крепления дышла 4 к орудию для всех трех машин одинаковы.

В качестве примера подробнее рассмотрим энергонасыщенный трактор Challenger MT865B массой  $m_{тр} = 20021$  кг и с двигателем мощностью  $N_{дв} = 340$  кВт. Для данного трактора представляется возможным построить зависимость  $\psi = f(\varphi, \gamma)$ . Из рис. 3 видно, что при отсутствии нагрузки на крюке ( $\varphi = 0$ ) для смещения центра давления до середины опорной поверхности необходимо сзади машины разместить балласт с  $\psi = 0,096$ , т.е. массой 1929 кг, а при  $\gamma = 0^\circ$  и нагрузке на крюке, превышающей 80 кН ( $\varphi > 0,41$ ) коэффициент балластирования будет отрицательным. Отрицательный знак коэффициента  $\psi$  говорит о необходимости балластирования машины спереди для обеспечения условия совпадения центра давления с серединой опорной поверхности. Также из рис. 3, б видно, что все кривые диапазона нагрузок пересекаются в одной точке при  $\gamma = 10,2^\circ$  и  $\psi = 0,096$ , т.е. данными значениями текущих параметров можно обеспечить весь диапазон нагрузок, и эти значения являются оптимальными для трактора с приведенными выше параметрами.

Оптимальный угол приложения силы тяги определяется высотой  $h_{кр}$  и расстоянием  $a$ , определяемым регулировкой длины дышла 4 (рис. 2). Это хорошо видно из выражения (1), где момент от вертикальной составляющей силы тяги должен уравнивать момент от горизонтальной составляющей:

$$P_{кр} \operatorname{tg} \gamma \left( \frac{L}{2} + a \right) = P_{кр} h_{кр}. \quad (3)$$

Откуда оптимальный угол приложения силы тяги будет:

$$\gamma_{онт} = \operatorname{arctg} \left( \frac{h_{кр}}{\frac{L}{2} + a} \right).$$

При выполнении условия (3) для выражения (1) за смещение центра давления на середину опорной поверхности будет отвечать только масса балласта и плечо, на котором предполагается его размещать. Тогда оптимальный коэффициент балластирования будет определяться как:

$$\psi_{онт} = \frac{b - \frac{L}{2}}{\frac{L}{2} + c}.$$



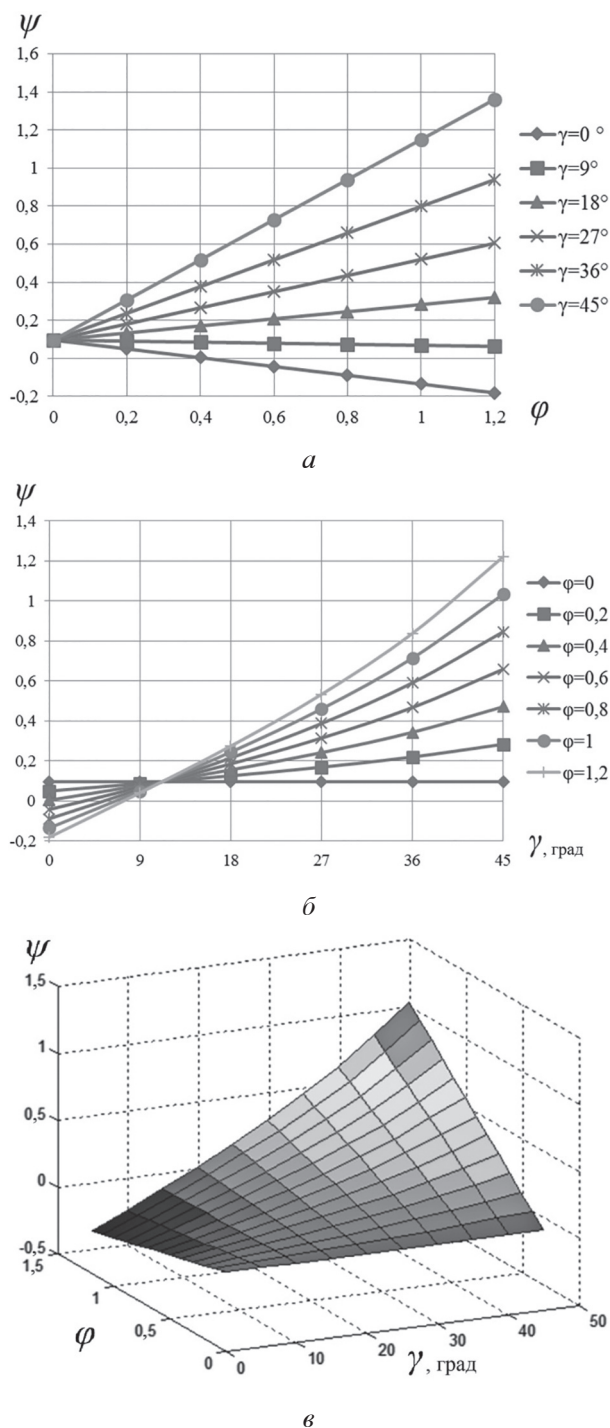


Рис. 3. Зависимости:

$$a - \psi = f(\varphi); \text{ б} - \psi = f(\gamma); \text{ в} - \psi = f(\varphi, \gamma)$$

Расчеты (табл. 1) показывают, что значения  $\gamma_{\text{опт}}$  и  $\psi_{\text{опт}}$  для машин разных тяговых классов будут отличаться незначительно, что обусловлено схожими геометрическими размерами основных элементов их навесных систем. Также видно, что для рассматриваемых машин значения вертикальной составляющей от силы тяги может превышать треть веса, к примеру, оборотного плуга, дающего сопоставимые

значения по нагрузке. При этом уменьшение вертикальной нагрузки на орудие может быть достигнуто уменьшением угла  $\gamma_{\text{опт}}$ , которое в свою очередь может быть получено в значительной степени уменьшением высоты точки крепления к орудью. С учетом вышесказанного предлагаемая схема балластирования может потребовать пересмотра существующих конструкций орудий.

## Выводы

1. Приведены расчетные зависимости по определению угла приложения силы тяги и коэффициента балластирования, которые позволяют обеспечить совпадение центра давления с серединой опорной поверхности на всем диапазоне нагрузок трактора.

2. Приведенные расчетные зависимости показали, что балластирование в рассмотренной схеме направлено исключительно на устранение конструктивно заложенного смещения центра масс трактора от середины его опорной поверхности.

3. Приложение силы тяги под положительным углом создает вертикальную составляющую, которая дополнительно нагружает орудие. Это делает рассматриваемую схему актуальной только при агрегатировании трактора с орудиями, имеющими свое шасси, которое способно воспринять вертикальную составляющую от силы тяги, сохраняя при этом глубину пахоты. Причем, для устранения перегрузки опорных колес орудия и снижения его уплотняющего воздействия на почву орудие может быть дооснащено дополнительными колесами.

4. Поскольку точка крепления различных орудий к навесной системе трактора может находиться на разной высоте, дышло, соединяющее нижнюю тягу навески с орудием, должно иметь регулируемую длину.

## Литература

1. Шарипов В.М. Конструирование и расчет тракторов. М.: Машиностроение, 2009. 752 с.
2. Шарипов В.М., Апельинский Д.В., Арустамов Л.Х. и др. Тракторы. Конструкция / под общ. ред. В.М. Шарипова. М.: Машиностроение, 2012. 790 с.
3. Шарипов В.М., Дмитриева Л.А., Сергеев А.И., Шевелев А.С., Щетинин Ю.С. Проектирование ходовых систем тракторов. М.: МГТУ «МАМИ», 2006. 82 с.

4. Шарипов В.М., Бирюков М.К., Дементьев Ю.В. и др. Тракторы и автомобили / под общ. ред. В.М. Шарипова. М.: Издательский дом «Спектр», 2010. 351 с.
  5. Городецкий К.И., Лавлинский А.М., Аллендеев Е.М. Нагружение трактора на тяговых испытаниях при силе тяги, направленной под углом // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 8. С. 10–14.
  6. Городецкий К.И., Серебряков В.В., Лавлинский А.М. Определение сцепления ведущих колес трактора МТЗ-82 // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 12. С. 16–18.
  7. Tractor test reports. Nebraska Tractor Test Laboratory. URL: <http://tractortestlab.unl.edu/testreports> (дата обращения 12.12.2017).
- References**
1. Sharipov V.M. Konstruirovaniye i raschet traktorov [Design and calculation of tractors]. Moscow: Mashinostroeniye Publ., 2009. 752 p.
  2. Sharipov V.M., Apelinskiy D.V., Arustamov L.Kh. i dr. Traktory. Konstruktsiya [Tractors. Design]. Pod obshch. red. V.M. Sharipova. Moscow: Mashinostroeniye Publ., 2012. 790 p.
  3. Sharipov V.M., Dmitrieva L.A., Sergeev A.I., Shevelev A.S., Shchetinin Yu.S. Proektirovaniye khodovykh sistem traktorov [Design of tractor drive systems]. Moscow: MGTU «MAMI» Publ., 2006. 82 p.
  4. Sharipov V.M., Biryukov M.K., Dement'ev Yu.V. i dr. Traktory i avtomobili [Tractors and automobiles]. Pod obshch. red. V.M. Sharipova. Moscow: Izdatel'skiy dom «Spektr» Publ., 2010. 351 p.
  5. Gorodetskiy K.I., Lavlinskiy A.M., Alendeev E.M. Loading of the tractor on traction tests with traction force directed at an angle. Traktory i sel'khoz mashiny. 2015. No 8, pp. 10–14 (in Russ.).
  6. Gorodetskiy K.I., Serebryakov V.V., Lavlinskiy A.M. Determination of traction of MTZ-82 tractors. Traktory i sel'khoz mashiny. 2016. No 12, pp. 16–18 (in Russ.).
  7. Tractor test reports. Nebraska Tractor Test Laboratory. URL: <http://tractortestlab.unl.edu/testreports> (accessed 12.12.2017).