

УДК 629.114.2.001.2:631.3(075.8)

**Нагружение трактора на тяговых испытаниях при силе тяги, направленной под углом****Loading of tractor on drawbar test when pulling force is directed at the angle****К. И. ГОРОДЕЦКИЙ<sup>1</sup>, д-р техн. наук****А. М. ЛАВЛИНСКИЙ<sup>1</sup>, инж.****Е. М. АЛЕНДЕЕВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук**<sup>1</sup> Университет машиностроения (МАМИ),  
Москва, Россия, kg1101@yandex.ru<sup>2</sup> ОАО "Научно-исследовательский институт  
стали", Москва, Россия, evg9702@gmail.com**K. I. GORODETSKIY<sup>1</sup>, DSc in Engineering****A. M. LAVLINSKIY<sup>1</sup>, Engineer****E. M. ALENDEEV<sup>2</sup>, PhD in Engineering**<sup>1</sup> University of Mechanical Engineering (MAMI),  
Moscow, Russia, kg1101@yandex.ru<sup>2</sup> Research Institute of Steel, PLC, Moscow, Russia,  
evg9702@gmail.com

Зарубежные методики проведения тяговых испытаний тракторов не позволяют оценить показатели работы движителей и ходовой системы в целом с рядом других общих характеристик из-за использования тармакадама в качестве почвенного фона. Методика испытаний тракторов, применяемая в России, предусматривает проведение опытов на реальных почвах и направлена на широкий охват разнообразных природных условий страны, но даже такие тяговые испытания не дают полной картины работы машинно-тракторного агрегата. Трактор — универсальная машина, агрегируемая с различными орудиями, которые имеют широкий диапазон тягового сопротивления. Поэтому при агрегатировании необходимо рационально нагружать его оси. Балластирование трактора увеличивает силу сопротивления качению, негативно влияющую на тяговый коэффициент полезного действия. В большинстве случаев передний балласт не снимается и остается на тракторе на постоянной основе, что увеличивает расход топлива. Возникает задача поиска таких технических решений, которые оптимизировали бы работу трактора без использования переднего балласта. С целью решения указанной задачи предлагается усовершенствовать методику тяговых испытаний, направив силу тяги под углом. Управляя этим углом, можно догружать переднюю ось вместо использования балласта. При этом разгружается задняя ось, уменьшается ее сцепной вес. Догрузка задней оси регулируется с помощью добавления балластных грузов на задние колеса или поперечный брус нижних тяг. Для каждого случая нагружения силой тяги необходимо обеспечивать соответствующую рациональную развесовку по осям для достижения наибольшего тягового коэффициента полезного действия.

**Ключевые слова:** трактор; сила тяги; реакции грунта; догрузка движителей; тяговые испытания.

Foreign methods of tractor drawbar testing do not allow to evaluate the performance capabilities of movers and drive system in general with a number of other common characteristics, because of using a tar makadam as a surfacing. Methods of tractor testing used in Russia provide the experiments on real soils and aiming to a wide variety of the country's natural environments. But even these tests do not give a full picture of performance of a machine-tractor unit. Tractor is a multipurpose machine that aggregates with a variety of implements that have a wide range of draught resistance. Therefore, during aggregation it is necessary to load tractor's axles efficiently. Tractor ballasting increases the rolling resistance force that affects negatively on the propulsive efficiency. In most cases, the front ballast is not removed and remains on a tractor permanently, which increases the fuel consumption. There is a search problem for technical solutions that would optimize the tractor performance without using front ballast. For solving this problem, it is proposed to improve the methods of drawbar testing by directing of pulling force at the angle. If this angle is controlled, it is possible to load a front axle without ballast. In this case, the rear axle is loaded, and its trailing weight is decreased. Additional loading of the rear axle is adjusted by adding ballast weights to the rear wheels or on a cross bar of lower arms. For each case of loading by pulling force, it is necessary to provide the proper rational weight distribution to achieve the highest propulsive efficiency.

**Keywords:** tractor; pulling force; ground reaction; weight transfer; drawbar test.

**Введение**

Реальные показатели тракторов определяются по результатам полевых тяговых испытаний. Известно по меньшей мере два метода тяговых испытаний тракторов. Первый метод применяется лабораторией испытаний тракторов Университета штата Небраска в Линкольне (США) [1], второй — машиноиспытательными станциями и другими организациями в России [2]. Есть осно-

вания полагать, что американским методом пользуются и некоторые европейские компании [3], чем обеспечивается сравнимость результатов. Оба метода подробно описаны и не требуют пояснений, однако кратко отметим их характерные особенности.

Американский метод отличается применением специальной дорожки, на которой проводятся испытания (тармакадама). Это обеспечивает стабильность при разных погодных условиях, но исключает испытания гусе-

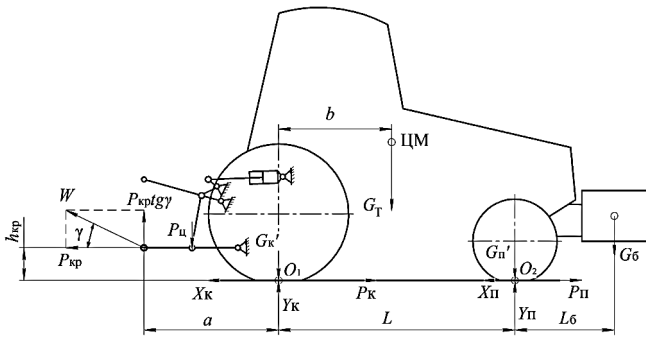


Рис. 1. Схема сил, действующих на колесный трактор, у которого сила тяги приложена под углом  $\gamma$

ничных тракторов с металлическими траками. Заметим, что в США и мире парк с.-х. тракторов составляют преимущественно более универсальные колесные, в то время как в России в прежние годы они составляли только около половины парка. Подобная структура парков продиктована отличающимися почвенно-климатическими условиями стран.

### Цель исследования

Цель работы — предложить и обосновать метод нагружения трактора силой тяги не горизонтально, а под углом.

### Материалы и методы

В лаборатории испытаний тракторов Университета штата Небраска в Линкольне (США) проходят испытания практически все производимые в мире тракторы, результаты испытаний регулярно публикуются в Интернете [1]. Стабильные характеристики искусственной дорожки обеспечивают сопоставимость результатов. Однако отсутствие взаимосвязи таких данных с реальной почвой не позволяет оценить показатели работы движителей и ходовой системы в целом с рядом других общих характеристик. Методика испытаний тракторов, применяемая в РФ [2], предусматривает проведение опытов на реальных почвах, а не на искусственном фоне, и направ-

лена на широкий охват разнообразных природных условий страны, из-за чего она весьма затратна. Но даже в этих условиях тяговые испытания не дают полной картины работы.

Исходя из этого, можно получить для каждого трактора рекомендации по нагружению для различных случаев, обеспечивая максимально возможный тяговый КПД. Суть сказанного показана на рис. 1, на котором сила тяги  $W$  приложена к тяговому поперечному брусу нижних тяг навесного устройства не горизонтально, а под некоторым углом  $\gamma$ . Разложим силу  $W$  на горизонтальную составляющую  $P_{кр}$ , которая равна сумме сил тяги каждого колеса  $P_{кр} = P_к + P_п$ , и вертикальную составляющую  $P_{кр}tg\gamma$ .

От силы  $P_{кр}$  возникает момент на плече  $h_{кр}$ , опрокидывающий трактор назад, а от силы  $P_{кр}tg\gamma$  возникает момент, опрокидывающий трактор вперед. При этом может происходить как догрузка, так и разгрузка задних и передних колес. Регулируя угол  $\gamma$ , можно воздействовать на тяговую динамику трактора.

Для улучшения тягово-сцепных свойств применяют балластирование трактора. В зависимости от его тягового класса балластные грузы имеют различный вес. У наиболее мощных тракторов суммарный вес балласта может достигать 40 кН. Например, гусеничный трактор Challenger MT855 при увеличении эксплуатационного веса на 27 кН может на тармакадеме развить тягу на крюке на 20 % больше, чем без балластирования, а при увеличении веса на 41 кН — на 37,5 % больше при одной и той же величине буксования (рис. 2, а) [4].

На колесные тракторы балластные грузы навешиваются спереди и на диски колес. На гусеничные — спереди, сбоку на раму ходовой системы, на направляющие колеса. Балластные грузы, устанавливаемые спереди трактора и увеличивающие нагрузку на передний мост, улучшая его сцепные качества и управляемость, препятствуют опрокидыванию назад. Балластирование в целом снижает буксование, тем самым повышая скорость трактора (рис. 2, б). Из рис. 2, б видно, что без балласта на больших тягах имеет место снижение скорости. Для данного трактора при силе тяги до 170 кН балластирование не дает выигрыша в скорости, так как кри-

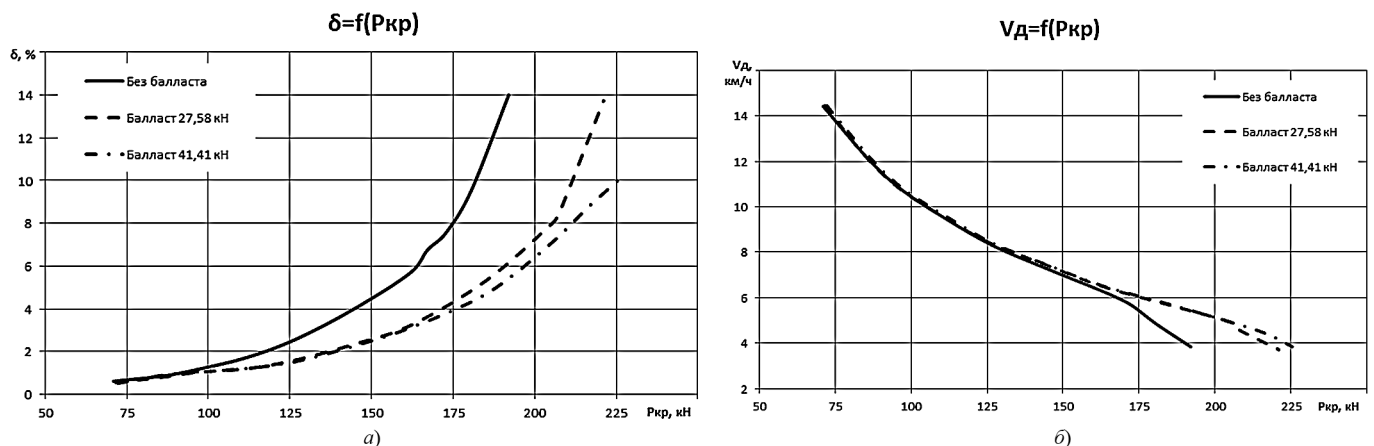


Рис. 2. Зависимости буксования трактора (а) и его действительной скорости (б) от  $P_{кр}$  при различном балластировании (на тармакадеме)

вые практически совпадают, что позволяет снизить его массу.

Однако при балластировании увеличивается сила сопротивления качению, негативно влияющая на тяговый КПД трактора. Более того, в большинстве случаев передний балласт не снимается и остается на тракторе на постоянной основе, что увеличивает расход топлива. Поэтому возникает задача поиска таких технических решений, которые оптимизировали бы работу трактора без использования переднего балласта.

Графики на рис. 2 указывают на то, что параметры зависят от применения балласта на специальном искусственном фоне тармакаде и поэтому далеки от реальных. Имеющиеся же реальные характеристики [5] могут быть ограниченно использованы для предварительных расчетов на основных видах почв. Поэтому научная задача состоит в уточнении расчетных и экспериментальных методик испытаний машинно-тракторных агрегатов с учетом режимов их работы.

Важно найти такую развесовку, при которой трактор может реализовать наибольшую силу тяги при наибольшем значении тягового КПД. Стоит отметить, что при увеличении сцепного веса тяговый КПД практически не

меняется, но при этом увеличивается верхняя граница силы тяги [5].

Рассмотрим силы, действующие на колесный трактор с передним балластом и влияющие на величину реакций почвы. Допустим, что трактор движется по горизонтальной поверхности прямолинейно и равномерно, сопротивление качению пренебрежимо мало.

Влияние каждой силы на реакции почвы показывают уравнения сумм моментов относительно точек  $O_1$  и  $O_2$ :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n M_{O_1} = 0; \\ \sum_{i=1}^n M_{O_2} = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} Y_{\text{п}} = \frac{G_{\text{т}}b + G_{\text{б}}(L + L_{\text{б}}) + P_{\text{кр}}\text{tg}\gamma \cdot a - P_{\text{кр}}h_{\text{кр}}}{L}; \\ Y_{\text{к}} = \frac{G_{\text{т}}(L - b) - G_{\text{б}}L_{\text{б}} - P_{\text{кр}}\text{tg}\gamma \cdot (L + a) + P_{\text{кр}}h_{\text{кр}}}{L}. \end{cases} \quad (1)$$

Запишем уравнения реакций почвы на передние и задние колеса трактора только от действия веса  $G_{\text{т}}$ :

$$\begin{cases} Y_{\text{п}} = \frac{G_{\text{т}}b}{L}; \\ Y_{\text{к}} = \frac{G_{\text{т}}(L - b)}{L}. \end{cases}$$

Вес, приходящийся на каждую ось, обозначим как  $G_{\text{к}}$  и  $G_{\text{п}}$ , кН. Проведем расчеты на примере трактора John Deere 5525 [6] (исходные данные см. в табл. 1). Значения  $G_{\text{к}}$  и  $G_{\text{п}}$  занесем в табл. 2.

Аналогично рассчитаем развесовку для балласта, находящегося в пределах колесной базы (балластные грузы на колесах, водитель, оборудование и т.п.). Изменение веса на каждой оси относительно развесовки без использования балласта обозначим как  $\Delta G_{\text{кбL}}$  и  $\Delta G_{\text{пбL}}$ , кН (см. табл. 2).

К реакциям от силы тяжести трактора добавим реакции от действия веса балласта, установленного спереди:

$$\begin{cases} \Delta Y_{\text{п}} = \frac{G_{\text{б}}(L + L_{\text{б}})}{L} = \Delta G_{\text{пб}}; \\ \Delta Y_{\text{к}} = -\frac{G_{\text{б}}L_{\text{б}}}{L} = -\Delta G_{\text{кб}}. \end{cases} \quad (2)$$

В формулах (2) и в дальнейшем знак "-" у значения приращения веса означает разгрузку оси, знак "+" означает догрузку. Таким образом, при установке переднего балласта передние колеса догружаются, а задние разгружаются.

Теперь добавим действие только силы  $P_{\text{кр}}\text{tg}\gamma$ . Найдем реакции почвы и занесем значения величин в табл. 2.

$$\begin{cases} \Delta Y_{\text{п}} = \frac{P_{\text{кр}}\text{tg}\gamma \cdot a}{L} = \Delta G_{\text{пw}}; \\ \Delta Y_{\text{к}} = -\frac{P_{\text{кр}}\text{tg}\gamma \cdot (L + a)}{L} = -\Delta G_{\text{кw}}. \end{cases} \quad (3)$$

Таблица 1

Исходные данные для расчета развесовки трактора John Deere 5525

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$G_{\text{т}}$ , Н	34 520	$P_{\text{кр}}\text{tg}\gamma$ , Н	8000
$L$ , м	2,178	$a$ , м	0,996
$b$ , м	0,854	$G_{\text{б}}$ , Н	2000
$P_{\text{кр}}$ , Н	30 000	$L_{\text{б}}$ , м	1
$h_{\text{кр}}$ , м	0,455	$G_{\text{бL}}$ , Н	1500
$\gamma$ , град.	+15	$L_{\text{бб}}$ , м	1,8

Таблица 2

Сложение весовых нагрузок

№ п/п	Задняя ось		Передняя ось	
	Параметр	Значение, кН	Параметр	Значение, кН
1	$G_{\text{к}}$	20,98	$G_{\text{п}}$	13,54
2	$\Delta G_{\text{кбL}}$	0,26	$\Delta G_{\text{пбL}}$	1,24
3	$-\Delta G_{\text{кб}}$	-0,92	$\Delta G_{\text{пб}}$	2,92
4	$-\Delta G_{\text{кw}}$	-11,71	$\Delta G_{\text{пw}}$	5
5	$\Delta G_{\text{ккр}}$	6,27	$-\Delta G_{\text{пкр}}$	-3,68
6	$G_{\text{к}} + \Delta G_{\text{кбL}}$	21,24	$G_{\text{п}} + \Delta G_{\text{пбL}}$	14,78
7	$G_{\text{к}} + \Delta G_{\text{кбL}} - \Delta G_{\text{кб}}$	20,32	$G_{\text{п}} + \Delta G_{\text{пбL}} + \Delta G_{\text{пб}}$	17,7
8	$G_{\text{к}} + \Delta G_{\text{кбL}} - \Delta G_{\text{кб}} + \Delta G_{\text{ккр}}$	26,59	$G_{\text{п}} + \Delta G_{\text{пбL}} + \Delta G_{\text{пб}} - \Delta G_{\text{пкр}}$	14,02
9	$G_{\text{к}} + \Delta G_{\text{кбL}} - \Delta G_{\text{кб}} + \Delta G_{\text{ккр}} - \Delta G_{\text{кw}}$	14,88	$G_{\text{п}} + \Delta G_{\text{пбL}} + \Delta G_{\text{пб}} - \Delta G_{\text{пкр}} + \Delta G_{\text{пw}}$	19,02

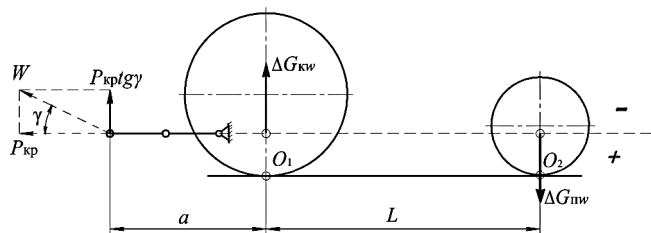


Рис. 3. Нагружение осей при действии  $P_{кр}tg\gamma$

С учетом знаков реакций откладываем их величины от нулевой линии (рис. 3). Схема сил показывает, что вертикальная составляющая силы на крюке разгружает задние колеса и нагружает передние.

В данном случае разгрузка задних колес ведет к уменьшению сцепного веса заднего ведущего моста. Чтобы компенсировать разгрузку, предлагается использовать заднее балластирование (на навесной системе или присоединительной раме орудия).

Момент от силы  $P_{кр}$  на плече  $h_{кр}$  догружает заднюю ось трактора так же, как разгружает переднюю. Соответственно, реакция почвы уменьшится на передней оси настолько же, насколько увеличится на задней.

$$\begin{cases} \Delta Y_{п} = -\frac{P_{кр}h_{кр}}{L} = -\Delta G_{пкр}; \\ \Delta Y_{к} = \frac{P_{кр}h_{кр}}{L} = \Delta G_{ккр}. \end{cases} \quad (4)$$

Рассмотренные случаи нагружения осей трактора оказывают различное влияние на суммарные реакции почвы. В табл. 2 приведено последовательное сложение нагрузок на оси от воздействий балласта в пределах базы, переднего балласта, сил на крюке. Изменяя вес балласта и угол  $\gamma$ , можно подстраивать суммарную развесовку трактора для достижения различных целей.

При указанной крюковой нагрузке на заднюю ось приходилось 26,59 кН веса, на переднюю 14,02 кН. Строка 9 табл. 2 показывает, что при угле  $\gamma = +15^\circ$  нагрузка на заднюю ось становится меньше нагрузки на переднюю (14,88 кН на задней оси и 19,02 кН на передней), т.е. при больших значениях  $P_{кр}$  достаточно малого изменения угла  $\gamma$  для выравнивания развесовки по осям.

Воздействие переднего балласта на оси аналогично действию силы  $P_{кр}tg\gamma$ , если она направлена вверх, т.е. передний мост догружается, а задний разгружается. Направление силы зависит от угла  $\gamma$ , под которым приложена нагрузка на крюке. Управляя этим углом, можно догружать переднюю ось с помощью силы  $P_{кр}tg\gamma$  вместо использования переднего балласта. Но при этом разгружается задняя ось, уменьшается ее сцепной вес. Тогда догрузку задней оси необходимо регулировать с помощью добавления балластных грузов на задние колеса или поперечный брус нижних тяг. Таким образом, разгрузка задней оси от угла  $\gamma$  компенсируется добавлением балластных грузов сзади.

Все это решает одну из задач рационального балластирования и агрегатирования трактора с орудиями, у ко-

торых тяговое сопротивление лежит в широких пределах (от плуга до прицепа). Поэтому для каждого случая нагружения силой тяги необходимо обеспечивать соответствующую развесовку по осям для достижения наибольшего тягового КПД.

Зная вертикальную нагрузку на движители, можно переходить к расчетам коэффициента сцепления, что необходимо в данной работе, так как он определяет, какая часть вертикальной нагрузки участвует в создании силы тяги движителя.

Тяговые испытания при общем нагружении трактора предлагается проводить следующим образом. Сначала трактор проходит цикл тяговых испытаний по принятой методике [2]. Далее проводим испытания по предлагаемой методике. Выбираем 4–5 значений угла  $\gamma$  и прицепляем дышло или сцепку загрузочной тележки под этими углами. При каждом значении угла трактор нагружается как передним балластом, так и балластом на колесах: сначала 1/3 от веса балласта, затем 2/3 и наконец максимальным весом балласта. Кроме того, устанавливаются наборы разных грузов в точках прицепа нижних тяг. Контроль за этим осуществляется и фиксируется по давлению в цилиндре навесного устройства.

В результате получим ряд таблиц данных для каждого случая нагружения (величина буксования, мощность на крюке, расход топлива, скорость и др.). Проанализировав их и проведя вычисления, найдем такую комбинацию грузов и/или угла  $\gamma$ , при которой трактор будет способен реализовать наибольшую силу тяги при наибольшем тяговом КПД.

## Выводы

1. Метод проведения тяговых испытаний требует развития в силу двух причин. Первая — используемые сегодня методы расчета и методики тяговых испытаний разрабатывались во время наибольшего распространения заднеприводных тракторов 4к2 и их балластирования передним балластом. Однако в последние годы получают широкое распространение полноприводные тракторы. Вторая причина — появление гусеничных тракторов с двумя видами резиноармированных гусениц.

2. Основная задача, которую необходимо решить при развитии методов тяговых испытаний, — определение коэффициента сцепления движителя с опорной поверхностью. Для этого нужно знать вертикальную нагрузку на движитель, причем стоит рассмотреть применение различных видов балласта (передний, боковой, на колесах, на ведущем и направляющем колесах, на точке прицепа). Предложенная в работе схема приложения силы на крюке под углом  $\pm\gamma$  дает дополнительную возможность воздействовать на опорные реакции. Момент  $P_{кр}h_{кр}$  от силы на крюке также перераспределяет вес машины. Поэтому в расчетах целесообразно комбинировать различные виды вертикального нагружения движителей для достижения желаемых показателей тяговой способности трактора.

3. В предложенной схеме приложения силы на крюке под углом одновременно используются и регулировки угла  $\gamma$ , и балластирование сзади.

## Литература и источники

1. **Tractor** test reports // Nebraska Tractor Test Laboratory [Электронный ресурс]. URL: <http://tractortestlab.unl.edu/testreports> (дата обращения 08.04.2016).
2. **ГОСТ 30745—2001**. Тракторы сельскохозяйственные. Определение тяговых показателей. М.: Издательство стандартов, 2002. 15 с.
3. **Deutsche** Landwirtschafts-Gesellschaft [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dlg.org> (дата обращения 08.04.2016).
4. **Nebraska** OECD tractor test 1814 — summary 380 Challenger MT855 diesel 16 speed // Nebraska Tractor Test Laboratory [Электронный ресурс]. URL: <http://tractortestlab.unl.edu/documents/MT855.pdf> (дата обращения 08.04.2016).
5. **Колобов Г. Г., Парфенов А. П.** Тяговые характеристики тракторов. М.: Машиностроение, 1972. 157 с.
6. **Nebraska** tractor test 1869 John Deere 5525 diesel 12 speed // Nebraska Tractor Test Laboratory [Электронный ресурс]. URL: [http://tractortestlab.unl.edu/documents/Deere\\_5525.pdf](http://tractortestlab.unl.edu/documents/Deere_5525.pdf) (дата обращения 08.04.2016).

## References

1. Tractor test reports. *Nebraska Tractor Test Laboratory*. URL: <http://tractortestlab.unl.edu/testreports> (accessed 08.04.2016).
2. *GOST 30745—2001*. Agricultural tractors. Measurement of traction characteristics. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 2002, 15 p.
3. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft. URL: <http://www.dlg.org> (accessed 08.04.2016).
4. Nebraska OECD tractor test 1814 — summary 380 Challenger MT855 diesel 16 speed. *Nebraska Tractor Test Laboratory*. URL: <http://tractortestlab.unl.edu/documents/MT855.pdf> (accessed 08.04.2016).
5. Kolobov G. G., Parfenov A. P. *Tyagovye kharakteristiki traktorov* [Drawbar performance of tractors]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972, 157 p.
6. Nebraska tractor test 1869 John Deere 5525 diesel 12 speed // Nebraska Tractor Test Laboratory. URL: [http://tractortestlab.unl.edu/documents/Deere\\_5525.pdf](http://tractortestlab.unl.edu/documents/Deere_5525.pdf) (accessed 08.04.2016).