

УДК 629.017

З. Э. ЗАБЕЛЫШИНСКИЙ, инженер, Харьковский тракторный завод им. С. Орджоникидзе;

М. А. ПОДРИГАЛО, д-р техн. наук, проф., ХНАДУ, Харьков;

Е. А. ДУБИНИН, канд. техн. наук, доц., ХНАДУ, Харьков

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННОГО КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА И ТРАКТОРНОГО ПОЕЗДА В РАЗЛИЧНЫХ ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

Получены аналитические выражения для коэффициента устойчивости шарнирно-сочлененного колесного трактора и тракторного поезда при повороте, которые позволяют оценить устойчивость против заноса при различном распределении крутящих моментов между мостами. Проведено математическое моделирование устойчивости против заноса шарнирно-сочлененного трактора с номинальным тяговым усилием 35 кН и тракторного поезда на его базе в различных дорожных условиях. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых и модернизации находящихся в эксплуатации колесных машин.

Ключевые слова: колесный трактор, тракторный поезд, шарнирно-сочлененный, устойчивость, дорожные условия.

Введение. Распределение крутящих моментов между мостами оказывает существенное влияние на устойчивость колесных тракторов и тракторных поездов. Это относится к устойчивости против складывания и опрокидывания тракторных поездов и секций тракторов с шарнирно-сочлененными рамами. Оценку устойчивости шарнирно-сочлененного трактора при повороте в тяговом режиме движения при различном распределении крутящих моментов между передними и задними колесами возможно провести с использованием коэффициента устойчивости тракторного поезда против складывания.

Анализ последних достижений и публикаций. Динамика тракторных поездов и шарнирно-сочлененных колесных тракторов исследовалась различными авторами как в тяговом [1-4], так и в тормозном [5, 6] режимах. В работах [7-9] установлено, что колесо, нагруженное касательной реакцией дороги, по мере увеличения последней теряет способность воспринимать боковую силу.

Для оценки устойчивости колесных машин против заноса в работе [10] предложен коэффициент устойчивости, представляющий собой отношение момента стабилизирующего к моменту, возмущающему занос

$$K_{уст} = \frac{M_{стаб}}{M_{возм}} = \frac{b \cdot R_{\delta_2}}{a \cdot R_{\delta_1}}, \quad (1)$$

где $M_{возм}$ и $M_{стаб}$ – моменты, возмущающий и стабилизирующий занос, соответственно;

a, b – расстояния от передней и задней осей колесной машины до проекции центра масс на горизонтальную плоскость;

R_{δ_1} и R_{δ_2} – суммарные боковые реакции дороги на колесах передней и задней осей колесной машины.

При этом в известных исследованиях не определено влияние распределения тяговой силы между осями шарнирно-сочлененного трактора на устойчивость тракторного поезда против заноса (складывания) при повороте. Наиболее важным с точки зрения обеспечения безопасности движения является сохранение устойчивости тракторного поезда против заноса, который в дальнейшем может привести к потере устойчивости положения.

Цель исследования, постановка задачи. Целью исследования является обеспечение устойчивости шарнирно-сочлененного трактора и тракторного поезда на повороте при различном распределении крутящих моментов между мостами путем совершенствования методов ее оценки.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить коэффициент устойчивости шарнирно-сочлененного колесного трактора и тракторного поезда при повороте;
- провести оценку устойчивости шарнирно-сочлененного трактора с номинальным тяговым усилием 35 кН и тракторного поезда.

Материалы исследований. Рассмотрим движение тракторного поезда и выполним оценку устойчивости против заноса (складывания) по критерию коэффициента устойчивости $K_{уст}$. Рассмотрим общий случай возможного заноса заднего моста, при котором все мосты шарнирно-сочлененного трактора являются ведущими. На рис. 1а и рис. 1б приведены схемы сил, действующих на тракторный поезд при использовании как одноосного, так и двухосного прицепов (их действие выражается составляющими крюкового усилия $P_{крx}$ и $P_{крz}$, приложенными в точке сцепки).

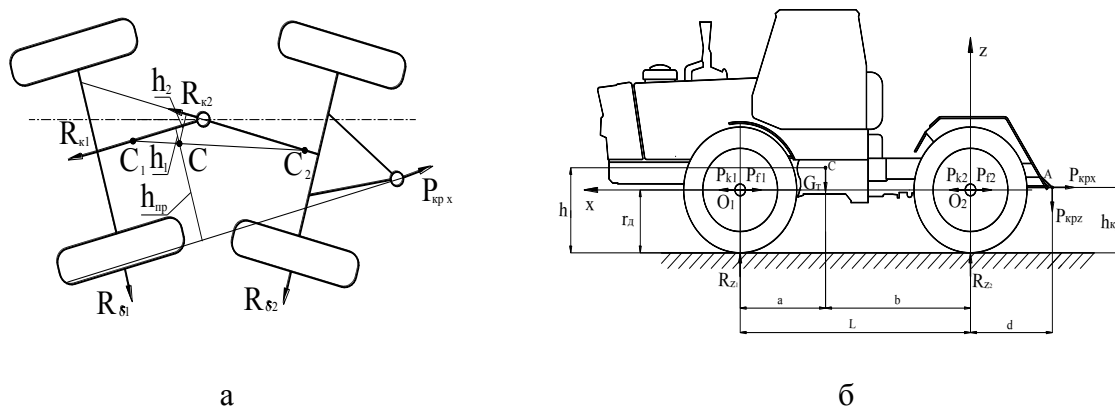


Рисунок 1 – Схема сил, действующих на тракторный поезд при всех ведущих мостах шарнирно-сочлененного трактора, при повороте
а – одноосный прицеп; б – двухосный прицеп

Рассмотрим момент движения, когда секции сложились на максимальный угол δ , а прицеп еще не успел изменить свою траекторию относительно начального (прямолинейного) движения. Принимаем, что скорость движения трактора $V = const$ при повороте не превышает 2,8 м/с, поэтому действием центробежных сил инерции можно пренебречь. При повороте с постоянным минимальным радиусом движение

секций осуществляется вокруг одного центра поворота [11]. При этом общий центр масс трактора C находится на линии, соединяющей центры масс передней C_1 и задней C_2 секций. Расстояния между этими точками можно найти по известной зависимости для определения центра массы тела, состоящего из двух элементов

$$\frac{|C_1C|}{|CC_2|} = \frac{m_2}{m_1}, \quad (2)$$

где m_1 – масса передней секции шарнирно-сочлененного трактора;

m_2 – масса задней секции шарнирно-сочлененного трактора.

При складывании тракторного поезда в составе шарнирно-сочлененного трактора и прицепа возмущающий момент создаётся суммой моментов от предельной по сцеплению боковой реакции дороги на колесах передней оси трактора R_{δ_1} , силы сопротивления движению прицепа $P_{крx}$, суммарных касательных реакций дороги на колесах передней $R_{к_1}$ и задней $R_{к_2}$ осей трактора

$$M_{\text{возм}} = R_{\delta_1} \cdot a + R_{к_1} \cdot h_1 + R_{к_2} \cdot h_2 + P_{крx} \cdot h_{np}, \quad (3)$$

где h_1, h_2, h_{np} – расстояния от центра масс трактора до линий действия соответствующих сил (рис. 1а);

$P_{крx}$ – горизонтальная составляющая крюкового усилия.

В рассматриваемом случае движения эта составляющая определяется как

$$P_{крx} = f \cdot m_{np} \cdot g, \quad (4)$$

где m_{np} – масса прицепа.

Расстояния a и b приняты в качестве плеч соответствующих сил для упрощения математической модели, исходя из того, что для реальной конструкции на примере шарнирно-сочлененного трактора с номинальным тяговым усилием 35 кН погрешность составит не более 10%.

Стабилизирующий момент формируется за счёт момента от предельной по сцеплению боковой реакции дороги на задней оси трактора

$$M_{\text{стаб}} = R_{\delta_2} \cdot b, \quad (5)$$

где R_{δ_2} – суммарная боковая сила на задней оси шарнирно-сочлененного трактора.

Коэффициент устойчивости тракторного поезда в этом случае

$$K_{уст} = \frac{M_{\text{стаб}}}{M_{\text{возм}}} = \frac{R_{\delta_2} \cdot b}{R_{\delta_1} \cdot a + R_{к_1} \cdot h_1 + R_{к_2} \cdot h_2 + P_{крx} \cdot h_{np}}. \quad (6)$$

При $K_{уст} \geq 1$ движение тракторного поезда устойчиво, а при $K_{уст} < 1$ – неустойчиво.

Предельные боковые реакции на колёсах трактора могут быть определены с помощью круга Камма [7-9]

$$R_{\delta_1} = \sqrt{\varphi^2 \cdot R_{Z_1}^2 - R_{K_1}^2}; \quad (7)$$

$$R_{\delta_2} = \sqrt{\varphi^2 \cdot R_{Z_2}^2 - R_{K_2}^2}, \quad (8)$$

где R_{Z_1} , R_{Z_2} – суммарные нормальные реакции дороги на колесах передней и задней осей трактора;

φ – коэффициент сцепления колес с дорогой.

В случае движения с небольшими скоростями $\varphi = const$ для различных дорожных условий [12].

В тяговом режиме движения тракторного поезда

$$R_{K_1} = K_M \cdot P_K - R_{Z_1} \cdot f; \quad (9)$$

$$R_{K_2} = (1 - K_M) \cdot P_K - R_{Z_2} \cdot f, \quad (10)$$

где P_K – суммарная тяговая сила трактора;

f – коэффициент сопротивления качению;

K_M – коэффициент распределения общего крутящего момента на переднюю ось

$$K_M = \frac{M_{K_1}}{M_{K_1} + M_{K_2}}, \quad (11)$$

M_{K_1} , M_{K_2} – суммарные крутящие моменты на колесах передней и задней осей.

Тяговая сила на ведущих колесах определялась по следующей зависимости

$$P_K = f \cdot g \cdot (m_T + m_{np}) = \frac{\eta_{mp} \cdot K_N \cdot N_e}{V} \leq \varphi_x \cdot g \cdot (m_T + m_{np}), \quad (12)$$

где m_T – масса трактора;

N_e – номинальная мощность двигателя;

K_N – коэффициент использования мощности двигателя;

η_{mp} – КПД трансмиссии трактора;

V – скорость движения трактора (тракторного поезда).

Суммарные нормальные реакции на колесах передней и задней осей трактора определены по зависимостям, полученным в работе [4]

$$R_{z1} = G_T \cdot \frac{b}{L} - P_{kpx} \cdot \frac{h_{kp} - r_{\partial 2}}{L} - P_{kpz} \cdot \frac{d}{L}; \quad (13)$$

$$R_{z2} = G_T \cdot \frac{a}{L} + P_{kpx} \cdot \frac{h_{kp} - r_{\partial 1}}{L} + P_{kpz} \cdot \left(1 + \frac{d}{L}\right), \quad (14)$$

где G_T – общий вес трактора;

L – база трактора;

h_{kp} – высота расположения точки присоединения прицепа к трактору над опорной поверхностью;

$r_{\partial 1}, r_{\partial 2}$ – динамические радиусы передних и задних ведущих колес трактора (принимая $r_{\partial} = r_{\partial 1} = r_{\partial 2}$);

d – расстояние от оси задних колес трактора до нормали, опущенной из точки присоединения прицепа к трактору на опорную поверхность.

После подстановки соотношений (9) и (10) в выражения (7) и (8), последние примут вид

$$R_{\delta 1} = \sqrt{\varphi^2 \cdot R_{Z1}^2 - (K_M \cdot P_K - f \cdot R_{Z1})^2}; \quad (15)$$

$$R_{\delta 2} = \sqrt{\varphi^2 \cdot R_{Z2}^2 - [(1 - K_M) \cdot P_K - f \cdot R_{Z2}]^2}. \quad (16)$$

Выражение (6) с учётом (9), (10) примет следующий вид:

$$K_{уст} = \frac{\sqrt{\varphi^2 \cdot R_{Z2}^2 - [(1 - K_M) \cdot P_K - f \cdot R_{Z2}]^2} \cdot b}{\sqrt{\varphi^2 \cdot R_{Z1}^2 - (K_M \cdot P_K - f \cdot R_{Z1})^2} \cdot a + (K_M \cdot P_K - R_{Z1} \cdot f) \cdot h_1 + ((1 - K_M) \cdot P_K - R_{Z2} \cdot f) \cdot h_2 + P_{kpx} \cdot h_{np}}. \quad (17)$$

При одном заднем ведущем мосту величина $K_M = 0$ и выражение (17) примет следующий вид:

$$K_{уст} = \frac{\sqrt{\varphi^2 \cdot R_{Z2}^2 - (P_K - f \cdot R_{Z2})^2} \cdot b}{\sqrt{\varphi^2 \cdot R_{Z1}^2 - (f \cdot R_{Z1})^2} \cdot a - R_{Z1} \cdot f \cdot h_1 + (P_K - R_{Z2} \cdot f) \cdot h_2 + P_{kpx} \cdot h_{np}}. \quad (18)$$

При одном переднем ведущем мосту трактора $K_M = 1$. В этом случае

$$K_{уст} = \frac{\sqrt{\varphi^2 \cdot R_{Z2}^2 - (f \cdot R_{Z2})^2} \cdot b}{\sqrt{\varphi^2 \cdot R_{Z1}^2 - (P_K - f \cdot R_{Z1})^2} \cdot a + (P_K - R_{Z1} \cdot f) \cdot h_1 - R_{Z2} \cdot f \cdot h_2 + P_{kpx} \cdot h_{np}}. \quad (19)$$

Полученные аналитические выражения для коэффициента устойчивости тракторного поезда с шарнирно-сочлененным трактором позволяют оценить устойчивость последнего против заноса при повороте не только при включении одного из ведущих мостов (переднего или заднего) трактора, но и при обоих включенных мостах с различным коэффициентом распределения крутящих моментов K_M между мостами. Коэффициенты устойчивости для шарнирно-сочлененного трактора без прицепа получаются из (17)-(19) при $P_{kpx} = 0$, $P_{kpz} = 0$.

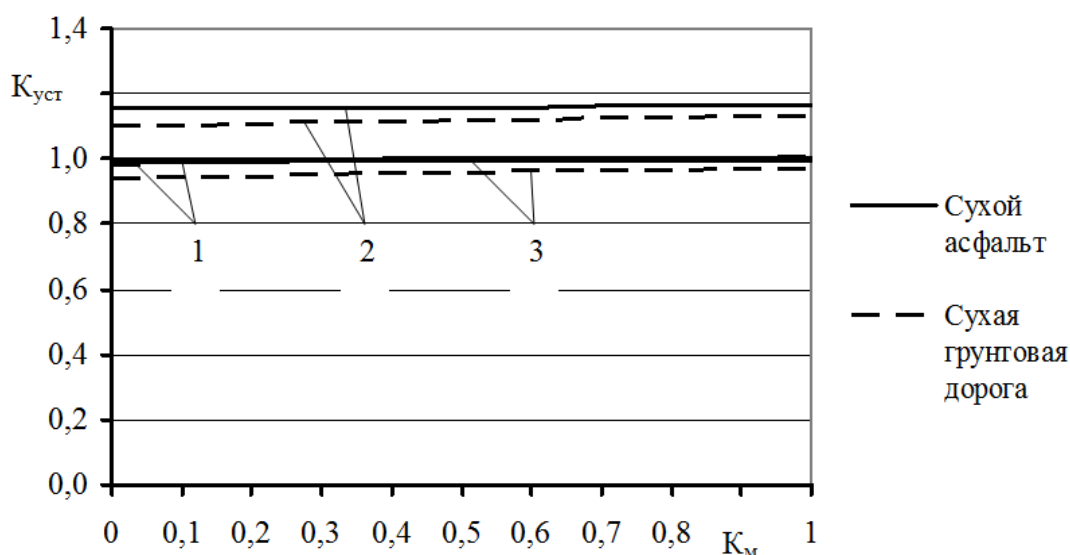
Проведем оценку устойчивости тракторного поезда на базе шарнирно-сочлененного трактора с номинальным тяговым усилием 35 кН и прицепов (одноосного и двухосного) при следующих данных: $h_1=0,12$ м, $h_2=0,33$ м, $h_{np}=1,1$ м, $m_{np}=3000$ кг, $P_{крз\ 2осн}=100$ Н, $P_{крз\ 1осн}=3500$ Н, $V=2,8$ м/с, $\eta_{np}=0,9$. Исходные для расчёта данные трактора приведены в таблице 1.

Таблица 1– Параметры шарнирно-сочлененного трактора

Параметр	Значение	
Общая масса трактора m_T , кг	8980	
Номинальная мощность двигателя N_e , кВт	176	
Продольная колесная база L , мм	2860	
Координаты центра масс трактора, мм	a	1060
	b	1800
Динамический радиус колеса (принимаем равным свободному), мм	r_0	800
Координаты точки соединения с прицепом, мм	d	1017
	$h_{кр}$	495
Максимальный угол складывания полурам, град	δ	30

Расчёт показателей устойчивости шарнирно-сочлененного трактора с номинальным тяговым усилием 35 кН и тракторного поезда осуществлялся по формуле (17), где $K_M = 0...1$, при различных состояниях дорожного покрытия.

Результаты математического моделирования устойчивости шарнирно-сочлененного трактора с номинальным тяговым усилием 35 кН и тракторного поезда показаны на рис. 2. Шарнирно-сочлененный трактор и тракторный поезд устойчивы при условии $K_{уст} \geq 1$.



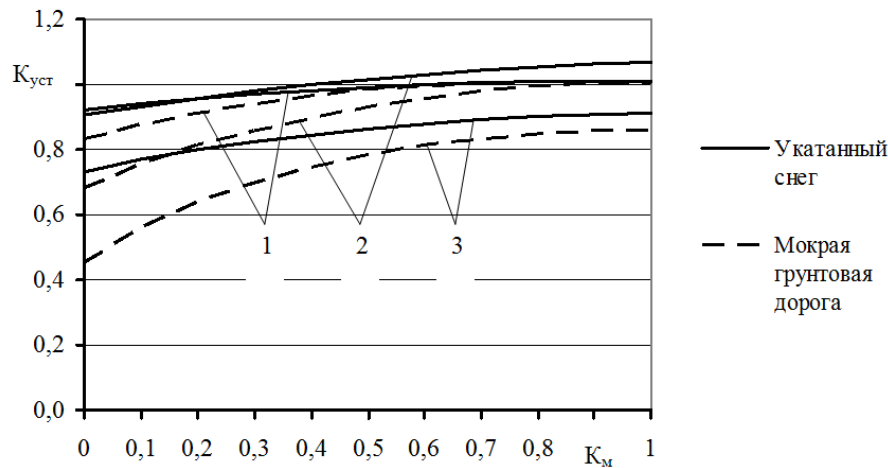


Рисунок 2 – Залежності коефіцієнта устойчивості $K_{уст}$ шарнірно-сочлененого трактора і тракторного поїзда від коефіцієнта розподілу загального крутячого моменту K_M в різних дорожніх умовах (1 – без прицепа, 2 – с одноосним прицепом, 3 – с двухосным прицепом)

Исходя из результатов проведенного исследования можно сделать вывод о том, что на сухом асфальте и сухой грунтовой дороге тип привода не имеет существенного значения. На мокрой грунтовой дороге и укатанном снегу при $K_M = 1$ величина $K_{уст}$ имеет более высокие значения, чем при $K_M = 0$. Это означает, что шарнірно-сочлененный трактор и тракторный поезд, имеющие только один передний ведущий мост более устойчивы, чем в случае одного заднего ведущего моста.

Выводы. Полученные аналитические выражения для коэффициента устойчивости шарнірно-сочлененного колесного трактора и тракторного поїзда при повороте позволяют оценивать их устойчивость против заноса при различном распределении крутящих моментов между мостами. Анализ зависимостей коэффициента устойчивости $K_{уст}$ шарнірно-сочлененного трактора и тракторного поїзда от коэффициента распределения общего крутящего момента K_M при повороте в различных дорожніх условиях показал: на сухом асфальте и сухой грунтовой дороге тип привода не имеет существенного значения; для укатанного снега и мокрой грунтовой дороги при включении только одного переднего ведущего моста трактора обеспечиваются более высокие значения $K_{уст}$, чем при включении только одного заднего ведущего моста. При включении двух ведущих мостов $K_{уст}$ больше, чем при включении одного заднего ведущего моста, но меньше, чем при включении одного переднего ведущего моста. Для шарнірно-сочлененного трактора с номинальным тяговым усилием 35 кН и тракторного поїзда при повороте при включении только одного переднего ведущего моста $K_{уст} > 1$ для всех рассмотренных дорожніх условий, кроме движения с двухосным прицепом. Для движения по мокрой грунтовой дороге с одноосным прицепом необходимо распределение $K_M \geq 0,8$, а для движения по грунтовой дороге и укатанному снегу с двухосным прицепом – балластирование задней секции трактора.

Список литературы: 1. Ясеневиц В.Е. Исследование тракторного поїзда, прицеп которого имеет ведущую ось / В.Е. Ясеневиц // Исследование работы тракторного поїзда в сельскохозяйственном производстве. Труды НАТИ. – 1964. – №175. – С. 3-44.

2. *Богдан Н.В.* Определение реакций на осях тракторного поезда / *Н.В. Богдан, Г.П. Грибко, И.С. Раклей* // Автотракторостроение. – Минск: Высшая школа. – 1977. – Вып. 9. – С. 85-91. 3. *Забельшинский З.Э.* Курсовая устойчивость тракторного поезда при различном распределении крутящих моментов между мостами / *З.Э. Забельшинский, В.В. Кириченко, Д.М. Клец, М.А. Подригало* // Механізація сільськогосподарського виробництва та переробки сільськогосподарської продукції. Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка. Технічні науки. – 2010. – Вип. 103. – С. 217-227. 4. *Забельшинский З.Э.* Влияние распределения нормальных реакций между осями колесного трактора на его эксплуатационные свойства / *З.Э. Забельшинский, М.А. Подригало, Е.А. Дубинин* // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 9 (1052). – С. 18-26. 5. *Парфенов А.П.* Исследование динамики торможения тракторного поезда / *А.П. Парфенов, В.Е. Ясеневиц* // Исследование работы тракторного поезда в сельскохозяйственном производстве. Труды НАТИ. – 1964. – №175. – С. 71-105. 6. *Рашидов Н.Р.* Торможение многозвенных тракторных поездов / *Н.Р. Рашидов*. – Ташкент: Фан. – 1978. – 88 с. 7. *Чудаков Е.А.* Устойчивость автомобиля против заноса / *Е.А. Чудаков*. – М.: Машгиз, 1949. – 193 с. 8. *Чудаков Е.А.* Устойчивость автомобилей при заносе / *Е.А. Чудаков*. – М.: Изд-во АН СССР. – 1945. – 144 с. 9. *Певзнер Я.М.* Теория устойчивости автомобиля / *Я.М. Певзнер*. – М.: Машгиз. – 1947. – 156 с. 10. Динамика автомобиля / [*Подригало М.А., Волков В.П., Бобошко А.А., Павленко В.А., Файст В.Л., Клец Д.М., Редько В.В.*]; под ред. *М.А. Подригало*. – Х.: Изд-во ХНАДУ. – 2007. – 424 с. 11. *Боклаг В.М.* Анализ общей устойчивости шарнирно-сочленённых колесных машин: дисс. на соиск. степени канд. техн. наук / *В.М. Боклаг*. – Харьков, 1964. – 200 с. 12. Автомобильный справочник Bosch / [пер. с англ. *Г.С. Дугин*]. – М.: За рулем. – 1999. – 895 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Yasenevich V.E.* Issledovanie traktornogo poezda, pritsep kotorogo imeet vedushchuyu os'. Issledovanie raboty traktornogo poezda v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve. Trudy NATI, 1964, No175, pp. 3-44. 2. *Bogdan N.V., Gribko G.P., Rakley I.S.* Opredelenie reaktsiy na osyakh traktornogo poezda. Avtotraktorostroenie. Minsk: Vysshaya shkola, 1977, Vol. 9, pp. 85-91. 3. *Zabelyshinskiy Z.E., Kirichenko V.V., Klets D.M., Podrigalo M.A.* Kursovaya ustoychivost' traktornogo poezda pri razlichnom raspredelenii krutyashchikh momentov mezhdou mostami. Mekhanizatsiya sil'skohospodars'koho vyrobnyctva ta pererobky sil'skohospodars'koyi produktsiyi. Visnyk KhNTUS·H im. P.Vasylenka. Tekhnichni nauky, 2010, Vol. 103. pp. 217-227. 4. *Zabelyshinskiy Z.E., Podrigalo M.A., Dubinin E.A.* Vliyanie raspredeleniya normal'nykh reaktsiy mezhdou osyami kolesnogo traktora na ego ekspluatatsionnye svoystva. Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Avtomobile- ta traktorobuduvannya. – Kharkov.: NTU «KhPI», 2014, No9 (1052), pp. 18-26. 5. *Parfenov A.P., Yasenevich V.E.* Issledovanie dinamiki tormozheniya traktornogo poezda. Issledovanie raboty traktornogo poezda v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve. Trudy NATI, 1964, No175, pp. 71-105. 6. *Rashidov N.R.* Tormozhenie mnogozvennykh traktornykh poezdov. Tashkent: Fan, 1978, 88 p. 7. *Chudakov E.A.* Ustoychivost' avtomobilya protiv zanosa. Moscow: Mashgiz, 1949, 193 p. 8. *Chudakov E.A.* Ustoychivost' avtomobiley pri zanose. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1945, 144 p. 9. *Pevzner Ya.M.* Teoriya ustoychivosti avtomobilya. Moscow: Mashgiz, 1947, 156 p. 10. Dinamika avtomobilya / [*Podrigalo M.A., Volkov V.P., Boboshko A.A., Pavlenko V.A., Fayst V.L., Klets D.M., Red'ko V.V.*]; pod red. *M.A. Podrigalo*. Kh.: Izd-vo KhNADU, 2007, 424 p. 11. *Boklag V.M.* Analiz obshchey ustoychivosti sharnirno-sochlenennykh kolesnykh mashin: diss. na soisk. stepeni kand. tekhn. nauk. Khar'kov, 1964, 200 p. 12. Avtomobil'nyy spravochnik Bosch / [per. s angl. *G.S. Dugin*]. – Moscow: Za rulem, 1999, 895 p.

Поступила (received) 27.01.15