

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).

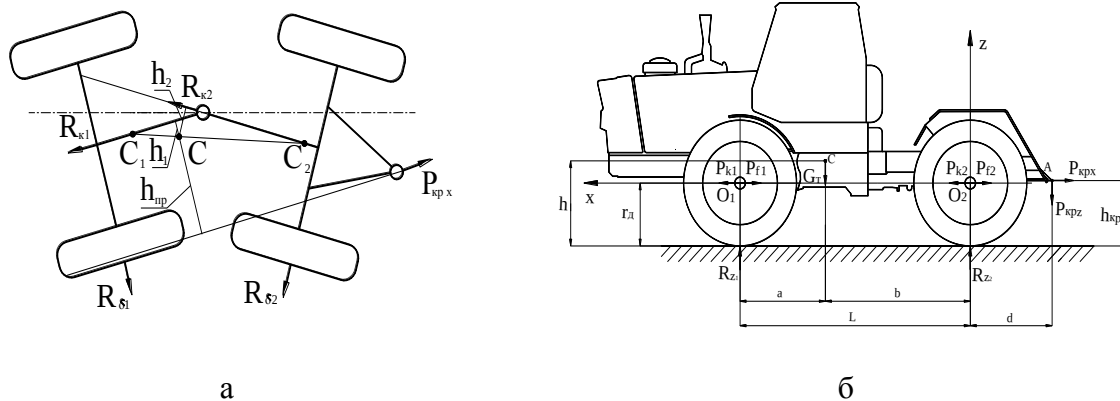


Рисунок 1 – Схема сил, действующих на тракторный поезд при всех ведущих мостах шарнирно-сочлененного трактора, при повороте
а – одноосный прицеп; б – двухосный прицеп

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_{κ_1} и задней R_{κ_2} осей трактора

$$M_{\text{возм}} = R_{\delta_1} \cdot a + R_{\kappa_1} \cdot h_1 + R_{\kappa_2} \cdot h_2 + P_{крx} \cdot h_{np}, \quad (3)$$

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

$$K_{уст} = \frac{M_{\text{стаб}}}{M_{\text{возм}}} = \frac{R_{\delta_2} \cdot b}{R_{\delta_1} \cdot a + R_{\kappa_1} \cdot h_1 + R_{\kappa_2} \cdot h_2 + P_{крx} \cdot h_{np}}. \quad (6)$$

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:

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

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

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

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

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

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 $P_{kpx} = 0$, $P_{kpz} = 0$.

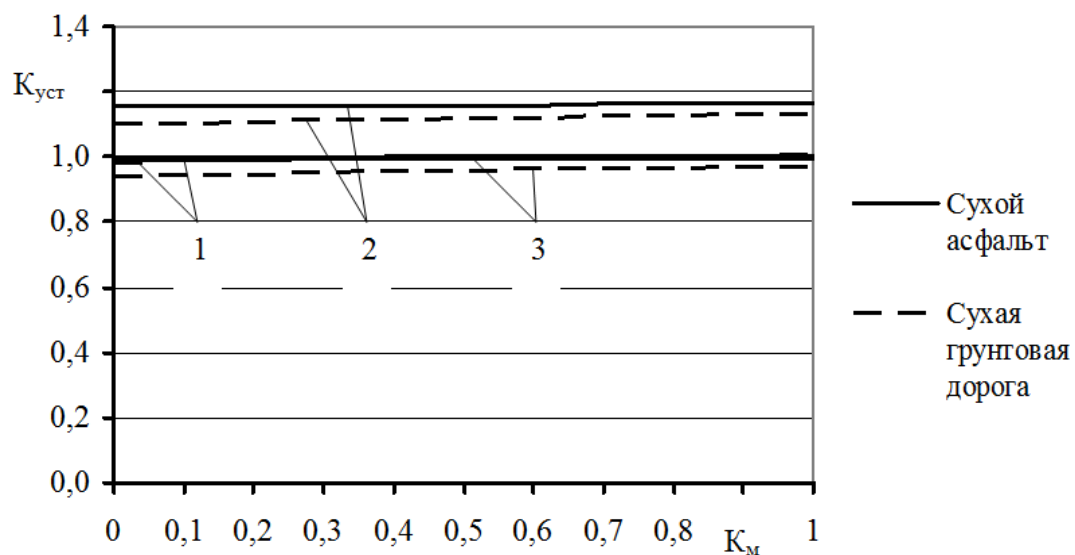
Проведем оценку устойчивости тракторного поезда на базе шарнирно-сочлененного трактора с номинальным тяговым усилием 35 кН и прицепов (одноосного и двухосного) при следующих данных: $h_1=0,12$ м, $h_2=0,33$ м, $h_{np}=1,1$ м, $m_{np}=3000$ кг, $P_{крз\ 2осн}=100$ Н, $P_{крз\ 1осн}=3500$ Н, $V=2,8$ м/с, $\eta_{mp}=0,9$. 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 (принимается равным свободному), мм	r_o	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 $K_{уст} \geq 1$.



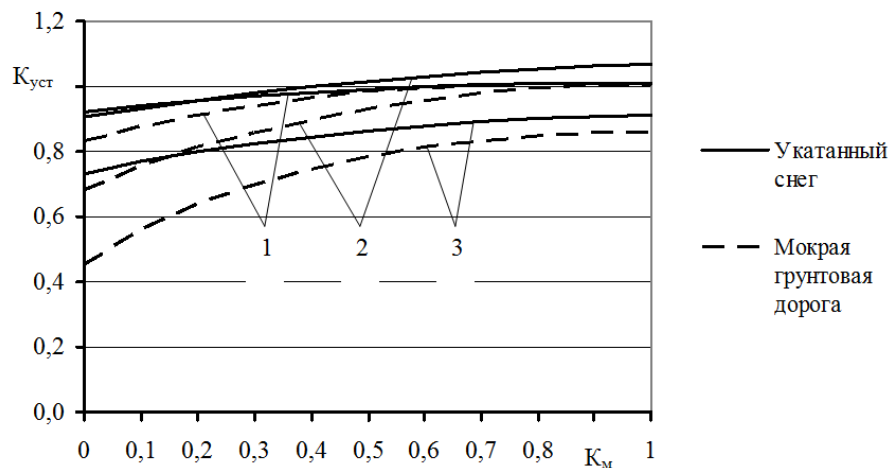


Рисунок 2 – Залежності коефіцієнта устойчивості $K_{уст}$ шарнірно-сочлененого трактора і тракторного поїзда від коефіцієнта розподілу загального крутячого моменту K_M в різних дорожніх умовах (1 – без причепа, 2 – з одноосним причепом, 3 – з двохосним причепом)

Ісходя з результатів проведеного дослідження можна зробити висновок про те, що на сухому асфальті і сухій ґрунтовій дорозі тип приводу не має суттєвого значення. На мокрої ґрунтовій дорозі і укатаному снігу при $K_M = 1$ величина $K_{уст}$ має більш високі значення, ніж при $K_M = 0$. Це означає, що шарнірно-сочленений трактор і тракторний поїзд, маючи тільки один передній ведучий мост більш устойчиві, ніж в разі одного заднього ведучого моста.

Висновки. Отримані аналітичні вирази для коефіцієнта устойчивості шарнірно-сочлененого колесного трактора і тракторного поїзда при повороті дозволяють оцінювати їх устойчивость проти заносу при різному розподілі крутячих моментів між мостами. Аналіз залежностей коефіцієнта устойчивості $K_{уст}$ шарнірно-сочлененого трактора і тракторного поїзда від коефіцієнта розподілу загального крутячого моменту K_M при повороті в різних дорожніх умовах показав: на сухому асфальті і сухій ґрунтовій дорозі тип приводу не має суттєвого значення; для укатаного снігу і мокрої ґрунтової дороги при включенні тільки одного переднього ведучого моста трактора забезпечуються більш високі значення $K_{уст}$, ніж при включенні тільки одного заднього ведучого моста. При включенні двох ведучих мостів $K_{уст}$ більше, ніж при включенні одного заднього ведучого моста, але менше, ніж при включенні одного переднього ведучого моста. Для шарнірно-сочлененого трактора з номінальним тяговим зусиллям 35 кН і тракторного поїзда при повороті при включенні тільки одного переднього ведучого моста $K_{уст} > 1$ для всіх розглянутих дорожніх умов, крім руху з двохосним причепом. Для руху по мокрої ґрунтовій дорозі з одноосним причепом необхідно розподілення $K_M \geq 0,8$, а для руху по ґрунтовій дорозі і укатаному снігу з двохосним причепом – баластування задньої секції трактора.

Список літератури: 1. Ясеневич В.Е. Дослідження тракторного поїзда, причеп якого має ведучу ось / В.Е. Ясеневич // Дослідження роботи тракторного поїзда в сільськогосподарському виробництві. 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. Забелышинский З.Э. Курсовая устойчивость тракторного поезда при различном распределении крутящих моментов между мостами / З.Э. Забелышинский, 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. Забелышинский З.Э. Влияние распределения нормальных реакций между осями колесного трактора на его эксплуатационные свойства / З.Э. Забелышинский, 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 mezhdu 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 mezhdu 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