

farm mechanization: Proceedings of the International Scientific-and-Practical Conference. Voronezh: Federal State Budgetary Educational Establishment "Voronezh State Agrarian University", 2016. Pp. 192–198.

10. Aldoshin N.V. Sravnitel'naya otsenka kombaynov na uborke belogo lyupina [Comparative assessment of combine harvesters for white lupine har-

vesting] / N.V. Aldoshin // Farm Mechanical Engineer. 2015. Issue 11. Pp. 10–13.

11. Aldoshin N. Damage of white lupine grain during harvesting. Technoforum 2015. "New trends in machinery and technologies for biosystems". Slovakia. Nitra. Slovenska polnohospodarska univerzita v Nitre, 2015. Pp. 14–18.

Received on March 15, 2016

УДК 629.017

ЛОМАКИН СЕРГЕЙ ГЕРАСИМОВИЧ, канд. техн. наук, профессор¹

E-mail: irina17-12-69@mail.ru

ЩИГОЛЕВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ, ст. преподаватель¹

E-mail: sergeysch127@mail.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

К ОЦЕНКЕ ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛЕСНЫХ САМОХОДНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Одним из факторов, влияющих на безопасность работы самоходных сельскохозяйственных машин, является способность сохранять свое устойчивое положение в различных условиях эксплуатации. Эта способность характеризуется углами поперечной и продольной устойчивости. Значительная часть самоходных машин (зерно- и кормоуборочные комбайны, тракторы) не имеет подрессоренных элементов ходовой части, а снижения нагрузки на раму этих машин при движении по неровностям добиваются за счет шарнирной установки на нее моста управляемых колес. При определении углов статической устойчивости машин с шарнирно установленным (качающимся) мостом управляемых колес часто допускается излишнее упрощение расчетной схемы, приводящее к снижению точности анализа. Представили уточненную методику расчета угла поперечной статической устойчивости колесных машин с качающимся мостом управляемых колес. В соответствии с предложенной методикой и методиками, рекомендованными в технической и учебной литературе, определили значения указанного угла для ряда сельскохозяйственных машин. Полученные результаты расчетов по предложенным зависимостям показали их значительное отклонение от значений, полученных при расчете по общепринятым методикам. Сделали выводы о зависимости угла поперечной статической устойчивости машин с качающимся мостом управляемых колес от конструктивных параметров их ходовой части, а также от вертикальной и горизонтальной координат расположения их центра масс.

Ключевые слова: колесная машина, зерноуборочный комбайн, трактор, поперечная устойчивость, ось опрокидывания, качающийся мост управляемых колес, центр масс, предельный угол статической устойчивости.

Введение. Одним из факторов, влияющих на безопасность работы самоходных сельскохозяйственных машин, является способность сохранять свое устойчивое положение в различных условиях эксплуатации. Эта способность характеризуется углами поперечной и продольной устойчивости.

Значительная часть самоходных машин (зерно- и кормоуборочные комбайны, тракторы) не имеет подрессоренных элементов ходовой части, а сниже-

ния нагрузки на раму этих машин при движении по неровностям добиваются за счет шарнирной установки на нее моста управляемых колес.

При теоретическом анализе как динамической, так и статической поперечной устойчивости самоходных колесных и полугусеничных сельскохозяйственных машин (комбайнов зерноуборочных и кормоуборочных, тракторов) с качающимся мостом управляемых колес в учебниках, учебных пособиях и технической литературе [1–4] допускается из-

лишнее упрощение расчетной схемы, приводящее к снижению точности анализа. Прежде всего это касается выбора оси, относительно которой возможно опрокидывание машины на поперечном склоне.

В работах [1–4] за ось возможного поперечного опрокидывания принята линия AD или CE (рис. 1а), проходящая через центры пятен контакта левых или правых переднего и заднего колес с почвой.

В работе [5] осью возможного поперечного опрокидывания считают линии AB' или CB' (рис. 1б), проходящие через центры пятен контакта (A или C) левого или правого колес и проекцию центра шарнира (B) моста управляемых колес на опорную поверхность (B').

Цель исследования – уточнить методику аналитического определения угла поперечной статической устойчивости машин с шарнирно установленным (качающимся) мостом управляемых колес и его зависимость от конструктивных параметров машин.

Материалы и методы. В статье представлена уточненная методика расчета угла поперечной статической устойчивости колесных машин с качающимся мостом управляемых колес.

Результаты и обсуждение. В данной работе за оси, относительно которых возможно опрокидывание машины на поперечном склоне, приняты линии AB или CB (рис. 2), проходящие через центры опорных пятен колес моста, жестко связанного с корпусом (рамой) машины, и центр шарнира балки моста управляемых колес.

Эти оси отклонены от продольной оси машины на угол β , а от опорной поверхности – на угол φ . Величина первого угла (β) в наибольшей мере зависит от колеи ведущих колес и базы ходовой части, а величина второго (φ) – от базы ходовой части и высоты (h_0) расположения центра шарнира балки моста управляемых колес над опорной поверхностью.

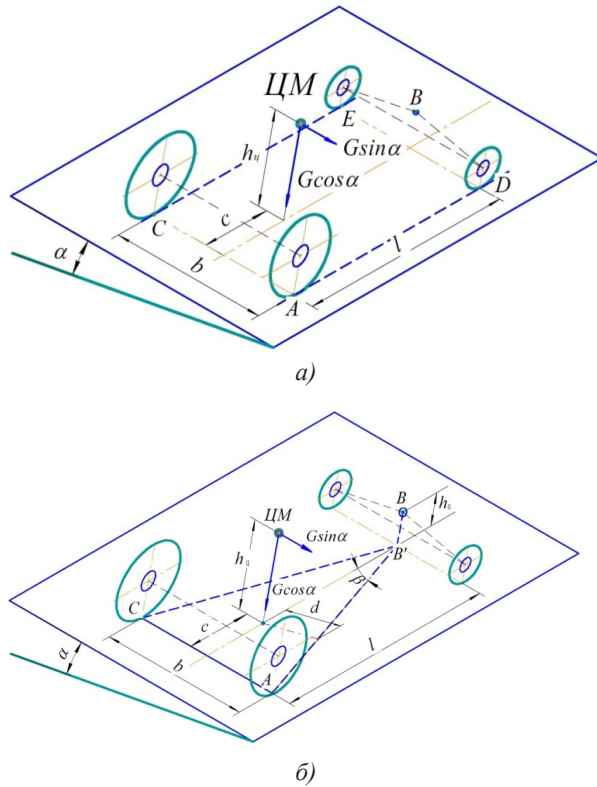


Рис. 1. Схемы сил, действующих на машину, применяемые для расчета угла поперечной статической устойчивости

Тангенсы углов β , β' , φ и φ' , представленных на рисунке 2, находим по зависимостям

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{AM}{MB}, \quad \operatorname{tg} \beta' = \frac{AM}{MB'}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{BB'}{AB'}, \quad \operatorname{tg} \varphi' = \frac{BB'}{MB'}.$$

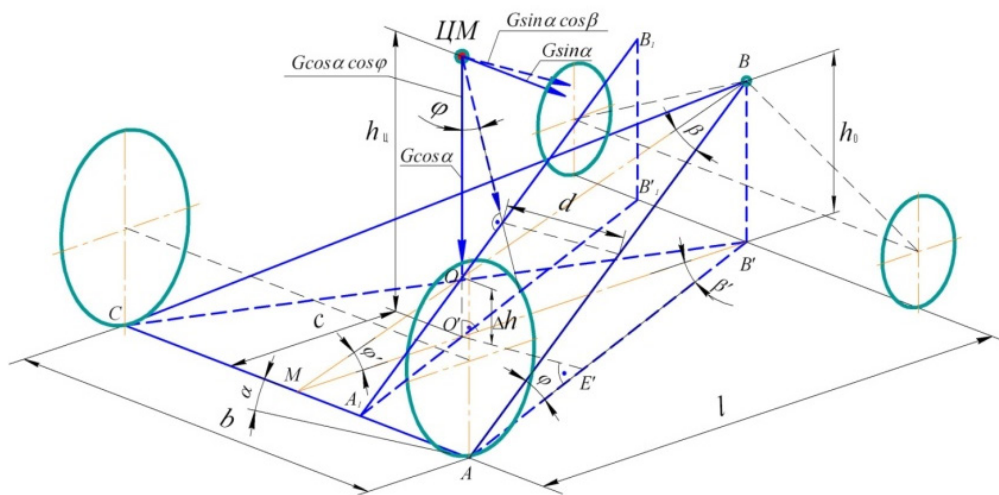


Рис. 2. Схема сил, действующих на машину, предлагаемая для расчета угла поперечной статической устойчивости

В этих зависимостях $2AM = AC = b$ – величина колеи колес ходовой части машины, закрепленных жестко на ее раме, мм; $MB' = l$ – база ходовой части машины, мм; $BB' = h_0$ – высота расположения центра шарнира балки моста управляемых колес над опорной поверхностью, мм.

Величину AB' (проекция отрезка AB на опорную поверхность) найдем по зависимости

$$AB' = \frac{MB'}{\cos\beta'} = \frac{l}{\cos\beta'}$$

Величину отрезка MB определим как

$$MB = \frac{MB'}{\cos\varphi'} = \frac{l}{\cos\varphi'}$$

С учетом рассмотренных соотношений формулы для расчета тангенсов углов β , β' , φ и φ' примут вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\beta &= \frac{b \cdot \cos\varphi'}{2l}, \quad \operatorname{tg}\beta' = \frac{b}{2l}, \\ \operatorname{tg}\varphi &= \frac{h_0 \cdot \cos\beta'}{l}, \quad \operatorname{tg}\varphi' = \frac{h_0}{l}. \end{aligned}$$

Уточнение положения оси, относительно которой возможно поперечное опрокидывание машины на склоне, изменяет расчетную схему поперечной статической устойчивости следующим образом.

На комбайн (трактор) весом G , находящийся на поперечном склоне с углом α в неподвижном состоянии, относительно оси AB (рис. 2) действуют два момента сил:

– поддерживающий устойчивость (препятствующий опрокидыванию) – M_{Π} . Его величина определяется как произведение составляющей $G \cdot \cos\alpha$, перпендикулярной оси AB ($G \cdot \cos\alpha \cdot \cos\varphi$), и плеча d линии действия этой силы относительно оси AB .

$$M_{\Pi} = G \cdot \cos\alpha \cdot \cos\varphi \cdot d;$$

– опрокидывающий – M_0 , вызванный действием составляющей $G \cdot \sin\alpha$, параллельной поверхности склона ($G \cdot \sin\alpha \cdot \cos\beta$). Эта составляющая силы тяжести, действуя относительно оси AB , создает опрокидывающий момент

$$M_0 = G \cdot \sin\alpha \cdot \cos\beta \cdot h_{\Pi}'$$

где h_{Π}' – плечо действия составляющей $G \cdot \sin\alpha \cdot \cos\beta$ относительно оси AB , мм.

Для определения плеч действия d и h_{Π}' , составляющих силы тяжести, выполним дополнительные построения. Через т. O' пересечения геометрической оси машины и линии действия вертикальной составляющей силы тяжести проведем линию, параллельную AB' . На этой прямой построим плоскость $A_1B_1B'_1$, параллельную плоскости ABB' с вершиной A_1 , лежащей на линии AC .

Предельное состояние поперечной статической устойчивости машины на склоне выразим условием равенства моментов:

$$M_{\Pi\text{пред}} = M_{0\text{пред}}$$

В развернутом виде это условие примет вид:

$$G \cdot \cos\alpha_{\text{пред}} \cdot \cos\varphi \cdot d = G \cdot \sin\alpha_{\text{пред}} \cdot \cos\beta \cdot h_{\Pi}'$$

$$\frac{\sin\alpha_{\text{пред}}}{\cos\alpha_{\text{пред}}} = \operatorname{tg}\alpha_{\text{пред}} = \frac{G \cdot d \cdot \cos\varphi}{G \cdot h_{\Pi}' \cdot \cos\beta}$$

$$\operatorname{tg}\alpha_{\text{пред}} = \frac{d \cdot \cos\varphi}{h_{\Pi}' \cdot \cos\beta} \quad (1)$$

Плечо $d = O'E'$ можно найти по зависимости

$$d = O'B' \cdot \sin\beta' = OB \cdot \sin\beta,$$

В свою очередь отрезок OB' равен

$$O'B' = l - c,$$

где c – горизонтальная (продольная) координата центра масс машины от оси моста ведущих колес.

Величину отрезка OB можно определить следующим образом:

$$OB = MB - MO = \frac{l}{\cos\varphi'} - \frac{c}{\cos\varphi'} = \frac{l - c}{\cos\varphi'}$$

С учетом рассмотренных зависимостей получим

$$d = (l - c) \cdot \sin\beta' \quad \text{или} \quad d = \frac{l - c}{\cos\varphi'} \cdot \sin\beta'$$

Плечо h_{Π}' действия опрокидывающей силы из схемы (рис. 3) можно выразить следующим соотношением:

$$h_{\Pi}' = (h_{\Pi} - \Delta h) \cdot \cos\varphi,$$

где h_{Π} – вертикальная координата центра масс машины от опорной поверхности, мм; $\Delta h = OO'$ – расстояние между опорной поверхностью и плоскостью ACB , в которой расположены оси возможного опрокидывания AB и CB , по линии действия вертикальной составляющей силы тяжести, мм; φ – угол наклона осей AB и CB к опорной поверхности.

В принятых на рисунке 3 обозначениях величину Δh можно выразить как

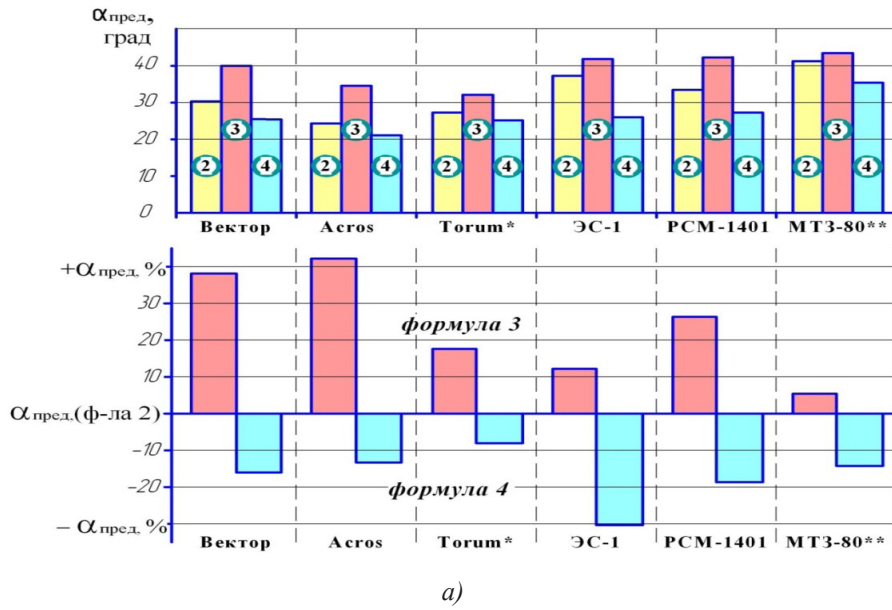
$$\Delta h = OO' = c \cdot \operatorname{tg}\varphi' = \frac{c}{\cos\beta'} \cdot \operatorname{tg}\varphi$$

С учетом полученной зависимости

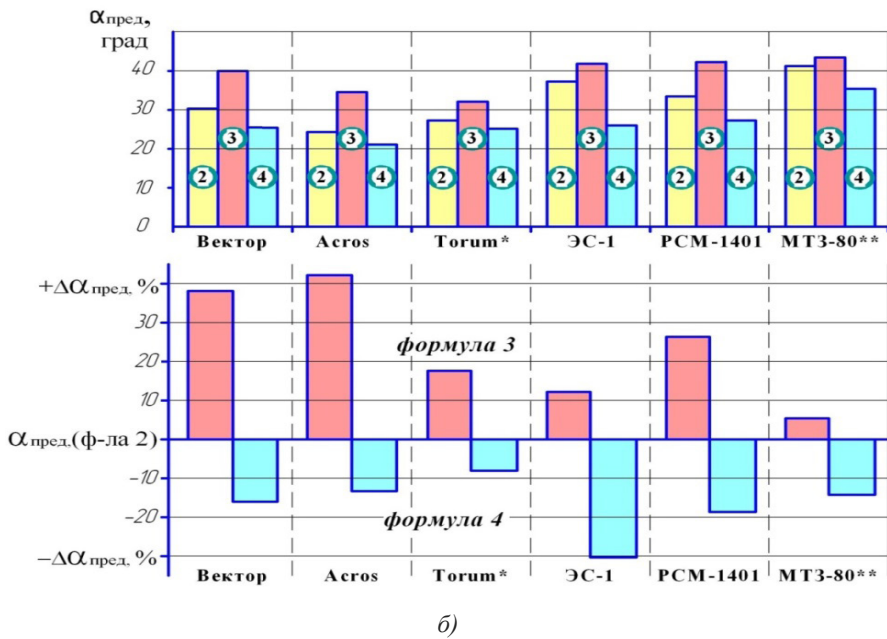
$$h_{\Pi}' = (h_{\Pi} - c \cdot \operatorname{tg}\varphi') = \cos\varphi$$

В развернутом виде выражение для определения предельного угла статической устойчивости примет вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\alpha_{\text{пред}} &= \frac{(l - c) \cdot \sin\beta}{(h_{\Pi} - c \cdot \operatorname{tg}\varphi') \cdot \cos\beta \cdot \cos\varphi'} = \\ &= \frac{(l - c) \cdot \sin\beta}{(h_{\Pi} - c \cdot \operatorname{tg}\varphi') \cdot \cos\beta \cdot \cos\varphi'} \end{aligned}$$



а)



б)

Рис. 3. Диаграммы расчетных значений угла поперечной статической устойчивости ($\alpha_{пред}$), рассчитанного по различным методикам (а), и их отклонений ($\Delta\alpha_{пред}$) от уточненных значений (б)

Поскольку $\frac{\sin\beta}{\cos\beta} = \operatorname{tg}\beta = \frac{AM}{MB} = \frac{b \cdot \cos\varphi'}{2 \cdot l}$; $\operatorname{tg}\varphi' = \frac{h_0}{l}$, то предложенное выражение запишется как

$$\operatorname{tg}\alpha_{пред} = \frac{(l-c) \cdot \sin\beta}{(h_{ц} - c \cdot \operatorname{tg}\varphi') \cdot \cos\beta \cdot \cos\varphi'} = \frac{(l-c) \cdot b \cdot \cos\varphi'}{2 \cdot l(h_{ц} - c \cdot \frac{h_0}{l}) \cdot \cos\varphi'}$$

В окончательном виде формула (1) для определения тангенса угла ($\alpha_{пред}$) поперечной статической устойчивости примет вид:

$$\operatorname{tg}\alpha_{пред} = \frac{(l-c) \cdot b}{2(h_{ц} \cdot l - c \cdot h_0)} \quad (2)$$

Из полученного выражения следует, что предельный угол статической устойчивости зависит от высоты (h_0) расположения центра шарнира подвеса моста управляемых колес над опорной по-

Технические данные машин и расчетные значения угла их поперечной устойчивости

		Вектор	Acros	Torum*	ЭС-1	PCM-1401	МТЗ 80**
Технические данные	l , мм	3 778	4 028	3 820	3 451	3 000	2 390
	b , мм	2 845	3 100	2 948	2 800	2 632	1 800
	$h_{ц}$, мм	1 700	2 252	2 350	1 563	1 448	950
	c , мм	1 630	1 775	965	1 572	1 301	600
	$h_{о}$, мм	730	750	850	1 234	740	720
$\alpha_{пред}$ градус	формула (2)	30,28	24,28	27,29	37,29	33,47	41,23
	формула (3)	39,92	34,54	32,10	41,85	42,27	43,45
	формула (4)	25,44	21,06	25,12	26,00	27,24	35,36
$\Delta\alpha_{пред}$ % от формулы (2)	формула (3)	31,8	42,2	17,6	12,2	26,3	5,4
	формула (4)	-16,0	-13,3	-8,0	-30,3	-18,6	-14,2

* Рисоуборочная модификация с заполненным бункером при выезде из рисового чека на дорогу между картами рисового поля для выгрузки зерна в транспортное средство.

** С установленной колеей $b = 1800$ мм.

верхностью, вертикальной ($h_{ц}$) и горизонтальной (c) координат центра масс машины, величин колеи (b) ведущих колес и продольной базы (l) ходовой части.

Для сравнения определим значения угла $\alpha_{пред}$ в соответствии с методиками расчета, предлагаемыми в литературе [1–5]. В принятых на рисунке 2 обозначениях выражения для определения значения $\text{tg}\alpha_{пред}$ примут, соответственно, вид (3) и (4):

$$\text{tg}\alpha_{пред} = \frac{b}{2h_{ц}}; \quad (3)$$

$$\text{tg}\alpha_{пред} = \frac{l-c}{h_{ц}} \cdot \text{tg}\beta. \quad (4)$$

Значения угла $\alpha_{пред}$, полученные при расчете по выражениям (2–4), и отклонение $\Delta\alpha_{пред}$ %, значений по зависимостям (3) и (4) от уточненных по зависимости (2) для некоторых самоходных машин представлены в таблице и на рисунках 3а, 3б. Технические данные машин, используемые в расчете, взяты из учебных пособий и технической документации [6–8].

Если центр масс машины смещен влево или вправо от ее продольной оси (линия MB), то вели-

чину смещения необходимо учесть при определении плеча (d) действия стабилизирующей составляющей силы тяжести относительно осей возможного опрокидывания (AB и CB), т.е. изменить значение числителя формулы (2).

Выводы

Предлагаемое уточнение расчетной схемы угла ($\alpha_{пред}$) поперечной статической устойчивости позволяет устранить недопустимый разброс расчетных значений этого параметра колесных машин, полученных при использовании общепринятых методик [1–5].

Для трактора МТЗ-80 разброс значений $\alpha_{пред}$ при применении общепринятых методик отличается от предлагаемого расчета почти на 20% (от -13,94 до +5,8%), для рассмотренных самоходных кормо- и зерноуборочных машин – более чем на 55% (комбайн Acros – от -13,3 до +42,2%).

Такая разница в результатах расчетов во многом объясняется тем, что наряду с вертикальной координатой центра масс машины на устойчивость оказывает влияние и его горизонтальная координата, а также расположение оси, относительно которой начинается опрокидывание машины.

Библиографический список

1. Богатырев А.В., Лехтер В.Р. Тракторы и автомобили / Под ред. А.В. Богатырева. М.: КолосС, 2008. 400 с.
2. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили: теория и технологические свойства: Учеб. 2-е изд., перераб. и доп. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. 506 с.
3. Кутьков Г.М., Лехтер В.Р. Теория трактора и автомобиля: Лабораторный практикум. М.: МГАУ, 2012.
4. Мирошниченко А.Н. Основы теории автомо-

биля и трактора: Учебное пособие. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. 490 с.

5. Кленин Н.И., Киселёв С.Н., Левшин А.Г. Сельскохозяйственные машины. М.: КолосС, 2008. 816 с.
6. Ксенович И.П., Амелченко П.А., Степаныук П.Н. Трактор МТЗ-80 и его модификации. М.: Агропромиздат, 1991. 397 с.
7. Ростсельмаш. URL: http://rostselmash.com/products/grain_harvesters.
8. Ростсельмаш. URL: http://rostselmash.com/products/forage_harvesters.

Статья поступила 4.04.2016

ASSESSING LATERAL STABILITY OF WHEELED SELF-PROPELLED FARM MACHINES

SERGEY G. LOMAKIN, PhD (Eng), Professor¹

E-mail: irina17-12-69@mail.ru

SERGEY V. SHCHIGOLEV, Senior Lecturer¹

E-mail: sergeysch127@mail.ru

¹ Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

One of the factors that affect safe operation of self-propelled farm machines is an ability to maintain their stable position in various operating conditions. This ability is characterized by angles of lateral and longitudinal stability. A significant part of self-propelled machines (grain and forage harvesters, tractors) is not provided with sprung chassis components, so loads on the machine frame when driving along uneven surfaces achieve can be reduced by hinging the steerable axle. When determining the static stability angles of machines with a hinged (oscillating) steerable axle the design scheme is often excessively simplified, and this leads to a decrease in the analysis accuracy. The authors offer an updated methodology for calculating the angle of lateral static stability of wheeled vehicles with oscillating steerable axle. In accordance with the proposed methodology and the methods recommended in technical and scientific literature, they have determined the value of the considered angle for a number of farm machines. The obtained calculation results concerning the proposed dependencies have shown significant deviation from the values obtained in the calculation made according to conventional calculation procedures. Finally, the authors have made some conclusions about the dependence of the lateral static stability angle of machines with oscillating steerable axle on the running gear design parameters, as well as vertical and horizontal coordinates of their mass center location.

Key words: wheeled machine, combine harvester, tractor, lateral stability, overturning axis, oscillating steerable axle, mass center, limit angle of static stability.

References

1. Bogatyrev A.V., Lehkter V.R. Traktory i avtomobili [Tractors and automobiles] / Ed. by A.V. Bogatyrev. M.: KolosS, 2008. 400 p.
2. Kutkov G.M. Traktory i avtomobili: teoriya i tekhnologicheskie svoystva [Tractors and automobiles: theory and technological properties]: 2nd ed., revised and extended. M.: INFRA-M, 2014. 506 p.
3. Kutkov G.M., Lehkter V.R. Teoriya traktora i avtomobilya: Laboratornyy praktikum [Automobile and tractor theory: Laboratory workshop]. M.: MSAU 2012.
4. Miroshnichenko A.N. Osnovy teorii avtomobilya i traktora: Uchebnoe posobie [Fundamentals of the

automobile and tractor theory: Textbook]. Tomsk: Publishing House of TSABU, 2014. 490 p.

5. Klenin N.I., Kiselev S.N., Levshin A.G. Sel'skokozyaystvennyye mashiny [Farm machines]. M.: KolosS, 2008. 816 p.
6. Ksenovich I.P., Amelchenko P.A., Stepanyuk P.N. Traktor MTZ-80 i ego modifikatsii [Tractor MTZ-80 and its modifications]. M.: Agropromizdat, 1991. 397 p.
7. Rostselmash. URL: http://rostselmash.com/products/grain_harvesters.
8. Rostselmash. URL: http://rostselmash.com/products/forage_harvesters.

Received on April 4, 2016