
УДК 629.017

Полянский А.С., Задорожная В.В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СЕКЦИИ ТРАКТОРА С ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННОЙ РАМОЙ ПРИ ОПРОКИДЫВАНИИ

Постановка проблемы. Основные эксплуатационные характеристики устойчивости движения и связанные с ними дорожно-транспортные происшествия определяют эффективность использования техники [1]. На устойчивость движения, как эксплуатационное свойство транспортного средства, влияют различные эксплуатационные факторы: скорость движения, состояние дорожного покрытия, продольные и поперечные уклоны полотна дороги, продольная база, колея колёс, координаты центра масс и другие.

В сельскохозяйственном производстве широко используются тракторы с шарнирно-сочлененной рамой (Т-150К и К-700) для выполнения технологических операций на полях, которые требуют от этих машин продольной, курсовой и поперечной устойчивости [2,3]. На примере трактора Т-150К с шарнирно-сочлененной рамой установлено, что более половины зарегистрированных дорожно-транспортных происшествий приводят к опрокидыванию трактора или машинно-тракторного агрегата [4]. Поэтому исследования устойчивости этих машин на поперечном уклоне с прицепными и навесными орудиями актуальны.

Анализ основных достижений и публикаций. Исследования [1] показывают, что травматизм в сельском хозяйстве и, в частности, количество случаев опрокидывания увеличивается при освоении новых моделей тракторов и внедрении их в эксплуатацию. Например, по тракторам типа Т-150К и К-700 количество зарегистрированных смертельных случаев, связанных с опрокидыванием тракторов, увеличилось почти в два раза при росте парка этих машин всего на 25%.

Вопросам опрокидывания посвящены работы [2,3,5]. Ряд авторов отмечают влияние на процесс опрокидывания критической скорости движения машины, конструктивных параметров трактора, почвенно-дорожных условий и др., но предложенное многообразие критериев и показателей для их оценки имеют низкую точность, усложняет решение практических задач, связанных с обеспечением безопасности движения колёсных машин.

В работе [6] показано, что потеря поперечной устойчивости и опрокидывание трактора характеризуется не только взаимодействием колёс с опорной поверхностью, но и взаимным расположением секций, энергетическим состоянием движущихся секций одной относительно другой, связанных вертикальным шарниром.

Разработанные методики оценки устойчивости [7] позволяют оценить влияние моментов лишь отдельных сил на опрокидывание, но судить о величине критического угла или о безопасном режиме движения трактора можно с большим приближением.

Формулировка целей статьи. Целью данной работы является разработка методики определения кинетической энергии движения секции до ограничительных упоров второй секции трактора с шарнирно-сочлененной рамой при опрокидывании.

Обзор существующих методов исследования движения трактора позволил сформулировать и решить следующие задачи исследований:

1. Определить силы, действующие на секции рамы при движении трактора на уклоне и описать процесс движения секции обладающей меньшей устойчивостью против опрокидывания в поперечной плоскости.

2. Разработать математическую модель для определения кинетической энергии движения секции до ограничительных упоров второй секции трактора с шарнирно-сочлененной рамой при опрокидывании.

Основной материал. Для машин с жесткой рамой параметрами устойчивости являются предельные углы статической устойчивости, при которых обеспечивается устойчивость как в продольном так и поперечном направлениях. Статическая устойчивость трактора с шарнирно-сочлененной рамой определяется минимальным углом склона β , на котором трактор теряет устойчивость при некотором угле складывания δ и угле поворота γ одной секции рамы относительно другой (рис. 1). Потеря устойчивости трактора с шарнирно-сочлененной рамой это сложный процесс движения, наиболее опасный для жизни оператора и требует дальнейших исследований.

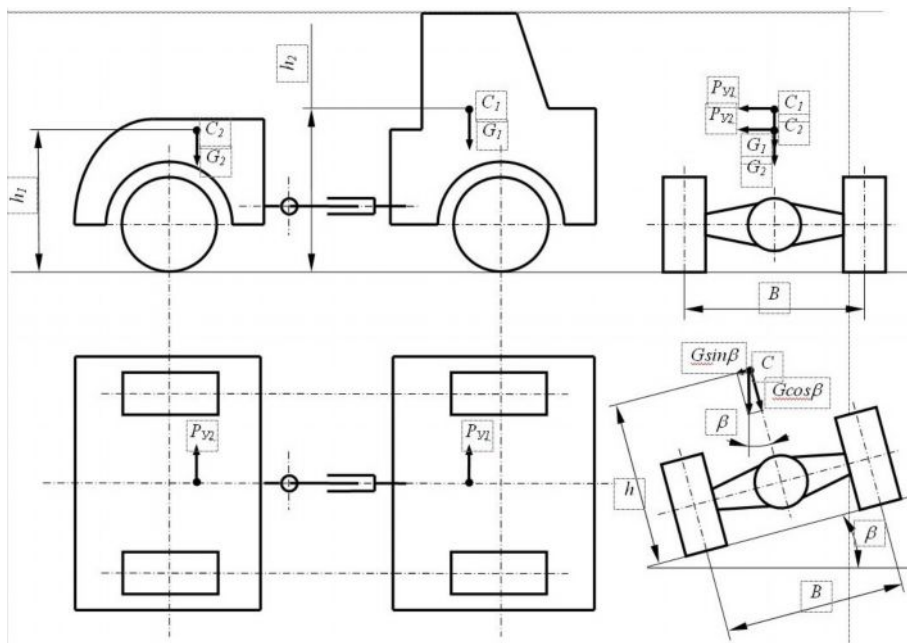


Рисунок 1 - Силы, действующие на трактор на поперечном уклоне

Критическим углом устойчивости следует считать угол уклона, соответствующий первому этапу потери устойчивости, т.е. отрыву одного из колёс трактора, поскольку при отрыве одного колёса ухудшается управляемость и работа на склоне становится невозможной. Ограничение статической устойчивости отрывом одного из ко-

лес снижает значение минимального угла склона β для трактора с шарнирно-сочлененной рамой по сравнению с машиной, имеющей жесткую раму, но при этом закладывается запас по опрокидыванию, который отсутствует при расчете параметров устойчивости машин с жесткой рамой.

С изменением угла складывания δ резко изменяется положение центра масс и нагрузка на колеса. Поэтому критическим углом устойчивости следует считать такой максимальный угол склона, на котором при любом маневрировании трактора, т.е. при любых углах складывания, сохраняется контакт всех его колес с грунтом.

Для получения зависимости, связывающей угол уклона β с углом поворота секции рамы в поперечной плоскости γ_{x1} , получено уравнение движения для секции, обладающей меньшей устойчивостью против опрокидывания в поперечной плоскости:

$$I_{x1} \frac{dw_{x1}}{dt} = m_1 \cdot g \cdot \sin(\beta_i + \gamma_{x1}) h_1 - m_1 \cdot g \cdot \cos(\beta_i + \gamma_{x1}) \cdot \frac{B}{2}, \quad (1)$$

где I_{x1} - момент инерции секции относительно продольной оси, проходящей через центр масс;

w_{x1} - угловая скорость секции в поперечной плоскости;

m_1 - масса секции;

g - ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

β_i - угол поперечного уклона пути;

γ_{x1} - угол поворота секции в поперечной плоскости;

h_1 - высота центра масс секции;

B - колея оси.

Преобразуем выражение (1) таким образом, чтобы выделить угол поворота секции γ_{x1} , получим:

$$\frac{d^2 \gamma_{x1}}{dt^2} = g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \sin(\alpha - \beta - \gamma_{x1}),$$

где
$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\frac{gB}{2i_x^2}}{g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}}}\right) = \arcsin \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4h_1^2}{B^2}}} = \text{arctg} \cdot \frac{2h}{B}$$

$$\frac{d^2 \gamma_{x1}}{dt^2} = g \cdot \frac{h_1}{i_{[11]}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} [\cos \gamma_{x1} \cdot \sin(\alpha - \beta) - \sin \gamma_{x1} \cdot \cos(\alpha - \beta)]$$

$$\frac{d^2 \gamma_{x1}}{dt^2} = g \cdot \frac{h_1}{i_{[11]}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cos \gamma_{x1} \cdot \sin(\alpha - \beta) [1 - \text{tg} \gamma_{x1} \cdot \text{ctg}(\alpha - \beta)]$$

При малых углах поворотах секции $\text{tg} \gamma_{x1} = \gamma_{x1}$

$$\frac{d^2 \gamma_{x1}}{dt^2} = g \cdot \frac{h_1}{i_{[11]}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \sin(\alpha - \beta) [1 - \gamma_x \cdot \text{ctg}(\alpha - \beta)]$$

$$\frac{d^2 \gamma_{x1}}{dt^2} + g \cdot \frac{h_1}{i_{[11]}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cos(\alpha - \beta) \cdot \gamma_{x1} = g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \sin(\alpha - \beta)$$

Получено неоднородное дифференциальное уравнение 2-го порядка, левая часть которого в общем виде описывает движение секции, а правая часть, частный случай – т.е. учитывает определенные параметры рассматриваемой секции. Совместное общее и частное решения этого уравнения позволяют определить время движения секции до ограничительных упоров второй.

Характеристическое уравнение будет иметь вид:

$$K^2 + g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \cos(\alpha - \beta) = 0$$

$$K_{1,2} = \pm i \cdot g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \cos(\alpha - \beta)$$

$$\ddot{\gamma}_{x1} = A \cdot \cos\left\{ \left[g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \cos(\alpha - \beta) \right] \cdot t \right\} + B \cdot \sin\left\{ \left[g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \cos(\alpha - \beta) \right] \cdot t \right\}$$

$$\gamma_{x10} = at^2 + bt + c$$

$$\gamma'_{x10} = 2at + b$$

$$\gamma''_{x10} = 2a$$

$$2a + g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \cos(\alpha - \beta) \cdot (at^2 + bt + c) = g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \sin(\alpha - \beta)$$

Решаем уравнение при условии: $2a = 0; a = 0; b = 0$.

$$2a + g \cdot c \frac{h_1}{i_{x1}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \cos(\alpha - \beta) = g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \sin(\alpha - \beta)$$

$$c = \text{tg}(\alpha - \beta)$$

$$\gamma_{x1} = A \cos\left\{ \left[g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \cos(\alpha - \beta) \right] \cdot t \right\} + B \cdot \sin\left\{ \left[g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \cos(\alpha - \beta) \right] \cdot t + \text{tg}(\alpha - \beta) \right\}$$

Определяем значения коэффициентов А и В, при условии $t=0; \gamma_{x1}=0$, получим:

$$\gamma_{x1} = A + \text{tg}(\alpha - \beta) = 0$$

$$A = -\text{tg}(\alpha - \beta)$$

$$w_{x1} = \frac{d\gamma_{x1}}{dt} = A \cdot g \cdot \frac{h_1}{i_{x1}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2} \cos(\alpha - \beta)} \cdot \sin \left\{ g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2} \cos(\alpha - \beta)} \right\} \\ + B \cdot g \frac{h_1}{i_1^2} \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2} \cos(\alpha - \beta)} \cdot \cos \left\{ g \frac{h_1}{i_1^2} \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2} \cos(\alpha - \beta)} \right\} \cdot t$$

При условии $t=0$ и $w_{x1}=0$ из уравнения

$$0 = B \cdot g \cdot \frac{h_1}{i_{x1}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2} \cos(\alpha - \beta)}$$

Коэффициент $B=0$.

Подставляя полученные A и B , получим значения коэффициентов:

$$\gamma_{x1} = tg(\beta - \alpha) \cdot \cos \left[g \cdot \frac{h_1}{i_{x1}^2} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2} \cos(\beta - \alpha)} \right]$$

очевидно, что при $\gamma_{ч1} = \gamma_{ч1nped}$ $t=t_1$, тогда

$$t_1 = \frac{i_{x1}^2}{gh_1} \left[\frac{\sec(\beta - \alpha)}{\sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}}} \right] \cdot \arccos \left[\frac{\gamma_{x1nped}}{tg(\beta - \alpha)} \right]$$

$$t_1 = \frac{i_{x1}^2}{gh_1} \cdot \frac{\sec(\beta - \alpha)}{\sec \alpha} \cdot \arccos \left[\frac{\gamma_{ч1nped}}{tg(\beta - \alpha)} \right]$$

Зная время движения первой секции до ограничительных упоров, можно определить угловую скорость секции

$$w_{x1nped} = g \cdot \frac{h_1}{i_{x1}^2} \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \sin(\alpha - \beta) \cdot \sin \left[g \frac{h_1}{i_{x1}^2} \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2} \cos(\alpha - \beta)} t \right]$$

$$w_{x1nped} = g \cdot \frac{h_1}{i_{x1}^2} \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \sin(\alpha - \beta) \cdot \sin \left[\arccos \left[\frac{\gamma_{x1nped}}{tg(\beta - \alpha)} \right] \right]$$

$$w_{x1nped} = g \cdot \frac{h_1}{i_{x1}^2} \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \sin(\alpha - \beta) \cdot \sqrt{1 - \frac{\gamma_{1nped}^1}{tg^2(\beta - \alpha)}}$$

$$w_{x1nped} = g \cdot \frac{h_1}{i_{x1}^2} \sqrt{1 + \frac{B^2}{4h_1^2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\gamma_{1nped}^1}{tg^2(\beta - \alpha)}} \cdot \sin(\beta - \alpha)$$

Полученная зависимость для определения угловой скорости секции позволяет определить кинетическую энергию её вращения в поперечной плоскости:

$$W_{кин} = \frac{I_{[1]} \cdot \omega_{x1}^2}{2} = \frac{m_1 \cdot g^2 \cdot h_1^2}{i_{x1}^2} \cdot \left(1 + \frac{B^2}{4h_1^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{x1}^2 n_{пред}}{tg^2(\beta - \alpha)}\right) \cdot \sin^2(\beta - \alpha)$$

Далее, определяя величину подъёма центра масс трактора движущегося по уклону, энергетическим методом определим его динамическую устойчивость.

Выводы.

По результатам исследования сделаны следующие выводы:

1. Установлена связь дополнительного угла поворота горизонтального шарнира между секциями трактора с шарнирно-сочлененной рамой при движении на поперечном уклоне с параметрами его динамической устойчивости.
2. Полученные зависимости позволяют определить кинетическую энергию секции тракторов при опрокидывании.

Литература: 1. Дорошенко Н.А. Обоснование и разработка выбора методов параметров трактора типа Т-150К по показателям плавности хода и устойчивости на транспортных работах. Автореферат дис. канд. техн. наук: 05.05.03.- Харьков, 1990.- 24с. 2. Кірієнко М.М., Полянський О.С., Задорожня В.В., Климчук О.В. Вимоги до статистичних даних про дорожньо-транспортні випадки з тракторами // Вісник ХНТУСГ. Тракторна енергетика в рослинництві. Вип 60. 2007.- С. 101-105. 3. Теория и расчет трактора „Кировец” /Е.А. Шувалов, А.В.Бойков, Б.А. Добряков, М.Г. Пантюхин. Под общей редакцией А.В. Бойкова. – Л., Машиностроение, 1980.-208 с. 4. Методика сбора информации о дорожно-транспортных происшествиях, сопровождающихся опрокидыванием тракторов. –М.: 1982, с. 12. 5. Амельченко П.А., Ксенович И.П., Гуськов В.В., Якубович А.И. Колёсные тракторы для работы на склонах. – М.: Машиностроение, 1978. – 248 с. 6. Боклаг В.М. Анализ общей устойчивости шарнирно-сочленённых машин.: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Харьков, 1964, 22 с. 7. Коновалов В.Ф. Динамическая устойчивость тракторов. – М.: Машиностроение, 1981. – 144 с.

Полянський О.С., Задорожня В.В.

ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ СЕКЦІЇ ТРАКТОРА С ШАРНІРНО-ЗЧЕПЛЕНОЮ РАМОЮ ПІД ЧАС ПЕРЕКИДАННЯ

Встановлений зв'язок додаткового кута повороту горизонтального шарніру між секціями трактора с шарнірно-зчепленою рамою під час руху на поперечному схилі з параметрами його динамічної стійкості. Одержані залежності дозволяють визначити кінетичну енергію секції тракторів під час перекидання

Polyansky A.S., Zadorozhna W.V.

DEFINING KINETIC ENERGY OF TRACTORS WITH ARTICULATED FRAME SECTIONS DURING OVERTURNING

Have been restored dependencies of dynamic stability effects of horizontal joint turn angle between sections of tractor with articulated frame working on cross slope. Findings allow defining of kinetic energy of tractors sections during overturning.
