

УДК 631.303

© Г.А. Хайлис, д.т.н.

Уманский национальный университет садоводства

© В.А. Шейченко, д.т.н., И.А. Дудников, к.т.н.

Полтавская государственная аграрная академия

© И.С. Мурованый, к.т.н., Н.Н. Толстушко, к.т.н.

Луцкий национальный технический университет

© В.В. Шевчук, к.т.н.

Уманский национальный университет садоводства

АНАЛИЗ ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ТРАКТОР СИЛ ПРИ ЕГО РАБОТЕ НА СКЛОНЕ ПОЛЯ

В статье рассмотрены работа трактора на склонах полей и пути улучшения его устойчивости.

ТРАКТОР, СКЛОН, ПОЛЕ, УСТОЙЧИВОСТЬ, КОЛЕСО, УГОЛ, СИЛА, ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ.

Постановка проблемы. Работа тракторов в полевых условиях зависит от размеров полей, наличия на них склонов, а также от конструктивных особенностей трактора и машин, с которыми он агрегируется. Влияют на работу агрегата и углы наклона склонов полей к горизонту. Все это подлежит исследованию с целью добиться улучшения работы этих машин и повышения их устойчивости.

Анализ последних исследований и публикаций. По работе трактора и агрегируемых с ним машин на склонах полей проведены исследования [1-7], однако устойчивость их работы исследована недостаточно. Так, недостаточно исследовано влияние параметров трактора и особенностей расположения склонов полей на устойчивость работы агрегата.

Цель исследования – проанализировать возможные положения работающего трактора на склонах полей и определить пути повышения его устойчивости и недопущения его смещения и опрокидывания.

Результаты исследования. На рис. 1 представлена схема четырехколесного трактора при его расположении на горизонтальной плоскости. Силу тяжести трактора обозначим G , приложена эта сила в центре тяжести C , положение которого находится экспериментально. Силу G можно разложить на две вертикальные составляющие G_1 и G_2 , из которых линия действия силы G_1 проходит через точку C_1 и переднюю ось O_1 , а линия действия силы G_2 проходит через точку C_2 и

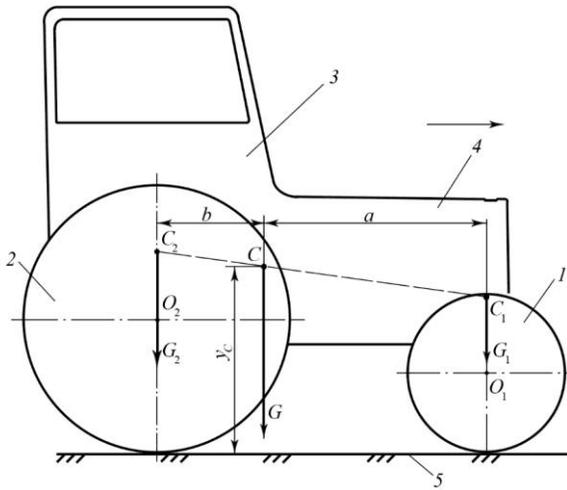


Рис. 1 – Схема чотирьохколесного трактора, находящегося на горизонтальной плоскости (вид сбоку):

- 1 – переднее правое колесо; 2 – заднее правое колесо;
3 – кабина; 4 – передняя часть трактора; 5 – почва

заднюю ось O_2 . Считаем, что центр C находится в средней продольной вертикальной плоскости трактора. Расстояние CC_1 по горизонтали обозначим a , а расстояние CC_2 также по горизонтали обозначим b . Тогда в соответствии с законами теоретической механики о разложении силы на две, ей параллельные, мы можем записать, что

$$G_1 a = G_2 b. \quad (1)$$

С другой стороны

$$G_1 + G_2 = G. \quad (2)$$

Из равенств (1) и (2) следует, что $G_1 = G - G_2$. Тогда проведя необходимые расчеты получим:

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= G \cdot b / a + b ; \\ G_2 &= G \cdot a / a + b . \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Из изложенного следует, что силу G можно заменить суммой сил G_1 и G_2 , из которых G_1 приложена в точке C_1 , а сила G_2 приложена в точке C_2 . Так действуют силы при нахождении трактора на горизонтальной плоскости.

Схемы нахождения передней и задней частей трактора на горизонтальных плоскостях представлены на рис. 2 и 3.

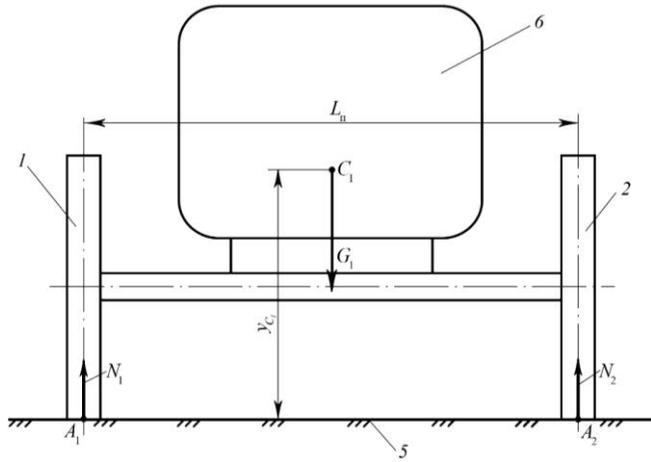


Рис. 2 – Вид ззади на передню частку трактора в вертикальній площині: 1 – ліве переднє колесо; 2 – праве переднє колесо; 5 – ґрунт; 6 – передня частку трактора

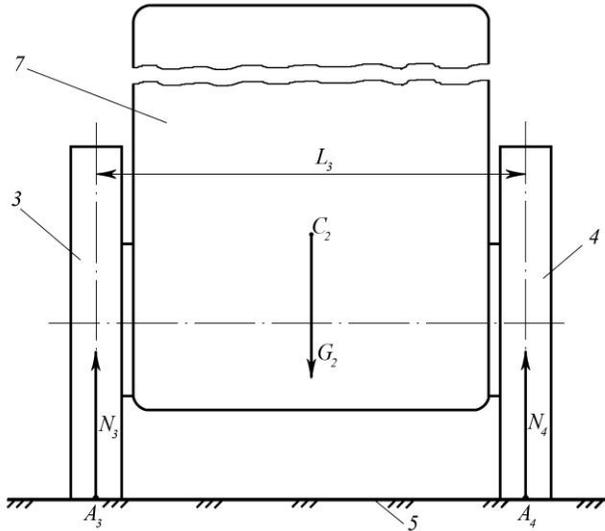


Рис. 3 – Вид ззади на трактор в вертикальній площині: 3 – заднє ліве колесо; 4 – заднє праве колесо; 5 – ґрунт; 7 – кабіна

Из рис. 2 видно, что на горизонтальной плоскости передние управляемые колеса давят на землю с силой G_1 , а силы реакции почвы на левое и правое колёса N_1 (в точке A_1) и N_2 (в точке A_2) равны каждая:

$$N_1 = N_2 = G_1/2. \quad (4)$$

Действие силы G_2 на оба задних колеса на горизонтальной плоскости (рис. 3) приводит к тому, что силы реакции почвы N_3 на обод левого колеса и N_4 на обод правого колеса действуют снизу-вверх по середине обода (т.е. перпендикулярно вверх); при этом сила N_3 приложена в точке A_3 , а сила N_4 приложена в точке A_4 . Итак, имеем:

$$N_3 = N_4 = G_2/2. \quad (5)$$

Силы N_1 , N_2 , N_3 и N_4 , как это видно из рис. 2 и 3, приняты направленными вверх по середине обода каждого из колес, начиная с нижних точек A_1 , A_2 , A_3 и A_4 .

А теперь посмотрим, что произойдет с машиной, если она окажется на поле с уклоном в какую-либо сторону. Пусть это будет уклон в правую сторону. Такая схема представлена на рис. 4. Поле здесь находится под углом α к горизонтали L_1L . В этом случае при повороте вокруг точки L_1 передней части машины на угол α (рис. 4) соответственно изменятся и силы. При этом положение центра тяжести передней части трактора относительно самого трактора не изменится; этот центр останется в том же положении C_1 , если внутри трактора не произойдет перемещение каких-либо частей и не изменится сила G_1 . Новое положение передней части трактора показано на рис. 4, к нему по-прежнему приложена вертикально действующая сила G_1 , которая по величине такая же, как сила G_1 на рис. 1 и 2, но для большей ясности в проводимых построениях и расчетах вектор этой силы (G_1) на рис. 4 увеличен в два раза в сравнении с его изображением на рис. 1 и 2. Только этим отличается вектор силы G_1 на рис. 4 в сравнении с силой G_1 на рис. 1 и 2.

Углы δ отклонения сил R_1 и R_2 от нормальных сил N_1 и N_2 будут меньше угла трения скольжения при малых углах α наклона поверхности поля к горизонтали.

В результате поворота машины и ее становления перпендикулярно плоскости L_1L' сила G_1 будет давить перпендикулярно плоскости L_1L' с силой G_{1C} и параллельно наклонной плоскости L_1L' с силой G_{1H} , т.е. сила G_1 на рис. 4 представлена разложенной на составляющие G_{1C} и G_{1H} , равные:

$$\left. \begin{aligned} G_{1C} &= G_1 \cos \alpha; \\ G_{1H} &= G_1 \sin \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

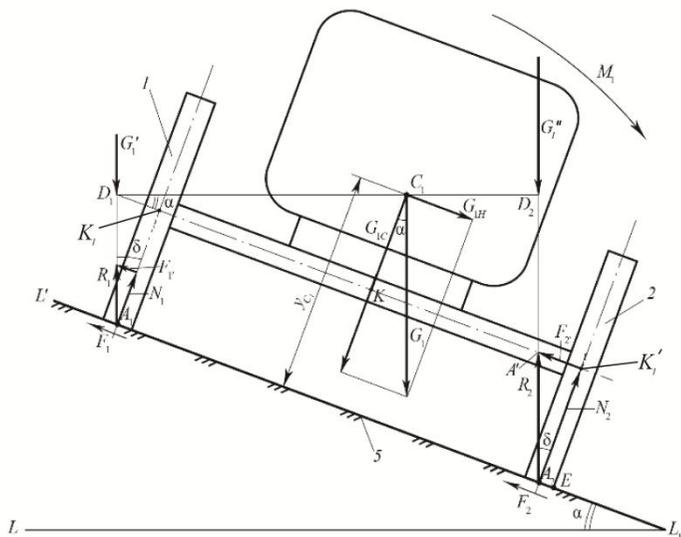


Рис. 4 – Схема передней части трактора на двух колесах после её поворота на угол α относительно горизонтали L_1L при нахождении колес на склоне поля и действующие на эту часть трактора силы

Под действием составляющей G_{1C} передняя часть трактора прижимается к поверхности поля L_1L' , а под действием составляющей G_{1H} трактор стремится сдвигаться вправо и вниз, преодолевая при этом сопротивление трению, которое создается почвой в местах соприкосновения с ней передних колес трактора. Таким образом, при повороте передней части трактора ее колеса будут давить на линию L_1L' почвы с силой G_{1C} , параллельно же поверхности L_1L' на переднюю часть трактора будет давить сила G_{1H} .

Для того, чтобы под действием силы G_{1H} не произошло смещение колес вправо, нужно, чтобы сумма сил трения покоя обоих колес о почву была больше силы G_{1H} . Обозначим максимальную силу трения покоя переднего левого колеса о почву F_{1max} , а максимальную силу трения покоя переднего правого колеса о почву F_{2max} ; тогда условие нескользжения передней части трактора вправо и вниз будет:

$$G_{1H} < F_{1max} + F_{2max}, \quad (7)$$

где F_{1max} – максимальное значение силы трения покоя левого колеса при попытке сдвинуть его вниз и вправо, а F_{2max} – максимальное значение силы трения покоя правого колеса при попытке сдвинуть его вниз и вправо.

Сила F_{1max} равна $f_{1max} \cdot N_1$, где f_{1max} – максимальное значение коэффициента трения покоя обода колеса 1 о почву, а N_1 – нормальная сила реакции почвы на колесо 1. Точно также сила F_{2max} равна $f_{2max} \cdot N_2$, где N_2 – нормальная сила реакции почвы на колесо 2. Подставляя эти данные в (7), получим:

$$f_{1max} \cdot N_1 + f_{2max} \cdot N_2 > G_{1H}. \quad (8)$$

Под действием составляющей силы G_{1H} создается момент M_1 с плечом u_{C1} ; момент этот стремится опрокинуть переднюю часть трактора вокруг опорной точки E правого колеса (рис. 4). Этот момент равен:

$$M_1 = G_{1H} \cdot u_{C1}, \quad (9)$$

где u_{C1} – расстояние от центра C_1 до плоскости L_1L' (рис. 4).

На рис. 4 показано разложение силы G_1 на её составляющие G'_1 и G''_1 , линии действия которых параллельны силе G_1 и проходят через средние нижние точки A_1 и A_2 колес. Составляющие G'_1 и G''_1 находятся из равенств:

$$\left. \begin{aligned} G'_1(D_1C_1) &= G''_1(D_2C_1); \\ G_1 &= G'_1 + G''_1, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где D_1C_1 и D_2C_1 – расстояния D_1C_1 и D_2C_1 .

Расстояния D_1C_1 и D_2C_1 представлены на рис. 4 и получаются в результате разложения силы G_1 на две параллельные ей силы G'_1 и G''_1 , проходящие через средние нижние точки A_1 и A_2 колес, т.е. считаем, что сила G_1 тяжести передней части трактора передается на оба колеса и почву через их средние точки A_1 и A_2 . Линия $D_1C_1D_2$ горизонтальна, а линии D_1A_1 и D_2A_2 действия сил G'_1 и G''_1 вертикальны. С учетом этих соображений составлены равенства (10), в которых два неизвестных: D_1C_1 и D_2C_1 . Эти неизвестные находятся решением уравнений (10).

На действия сил G'_1 и G''_1 почва отвечает силами реакции R_1 и R_2 , приложенных в точках A_1 и A_2 и отклоненными от нормалей к поверхности касания на угол δ . Этот угол δ , как видно из построений (рис. 4), равен углу α ; получился этот угол из-за того, что кроме реакций N_1 и N_2 , почва действует на обода колес с силами F_1 и F_2 .

Обозначим через L_n расстояние между средними нижними точками A_1 и A_2 передних колес трактора (рис. 2). Это же расстояние на рис. 4 отклонено от горизонтали L_1L на угол α вверх. Тогда расстояние D_1D_2 на рис. 4 равно:

$$D_1D_2 = (A_1A_2) \cos \alpha = L_n \cos \alpha. \quad (11)$$

Так как силы G'_1 , G_1 и G''_1 параллельны, то угол δ равен углу α (о чем выше уже сказано), что справедливо в пределах значений угла α , при которых силы трения F_1 и F_2 [рис. 4 и неравенство (7)] не больше максимальных значений этих сил трения.

Обозначим точку пересечения линии $D_1KK'_1$ со средней линией обода левого колеса, проходящей через точку A_1 , буквой K_1 , а точку пересечения линии $D_1KK'_1$ с линией вектора R_2 через A' . Тогда линия D_1A' равна $r_n \operatorname{tg} \alpha + K_1K + KA'$, где r_n – радиус переднего левого колеса, а $K_1K + KA'$ равно $A_1A_2 - r_n \operatorname{tg} \alpha = L_n - r_n \operatorname{tg} \alpha$.

Расстояние D_1C_1 равно $D_1K / \cos \alpha$, а расстояние $D_1D_2 = L_n \cos \alpha$.

Точно также можно найти, что

$$D_1C_1 = r_n \operatorname{tg} \alpha + L_n / 2 \quad / \cos \alpha. \quad (12)$$

Тогда D_2C_1 равно:

$$D_2C_1 = D_1D_2 - D_1C_1 = L_n \cos \alpha - r_n \operatorname{tg} \alpha + L_n / 2 \quad / \cos \alpha. \quad (13)$$

Так будет поворачиваться передняя часть трактора, если она окажется на склоне под углом α .

Если же на склоне под некоторым углом β , направленным в ту же сторону, что и угол α , окажется задняя часть трактора, то с ней произойдут изменения, которые представлены на рис. 5; объяснения по всем этим изменениям приводятся ниже.

В данном случае (рис. 5) горизонтальная линия поля обозначена L'_1L_2 , а склон поля находится под углом β к горизонтали. При таком положении поля задняя часть трактора окажется под углом β к горизонтали, но положение центра тяжести C_2 относительно трактора не изменится и центр этот останется в своем положении C_2 , если внутри трактора не произойдет перемещение каких-либо частей. Изменение произошло лишь по части изображения вектора силы G_2 . Это вектор G_2 также, как на рис. 4 вектор G_1 , увеличен в два раза в сравнении с вектором на рис. 3 с целью добиться большей ясности в проводимых построениях.

В результате поворота силы G_2 и её становления перпендикулярно плоскости $L'_1L'_2$ (рис. 5) сила эта будет давить перпендикулярно этой плоскости $L'_1L'_2$ с силой G_{2C} и параллельно наклонной плоскости $L'_1L'_2$ с силой G_{2H} , т.е. сила G_2 стала разложенной на составляющие G_{2C} и G_{2H} , равные:

$$\left. \begin{aligned} G_{2C} &= G_2 \cos \beta; \\ G_{2H} &= G_2 \sin \beta. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

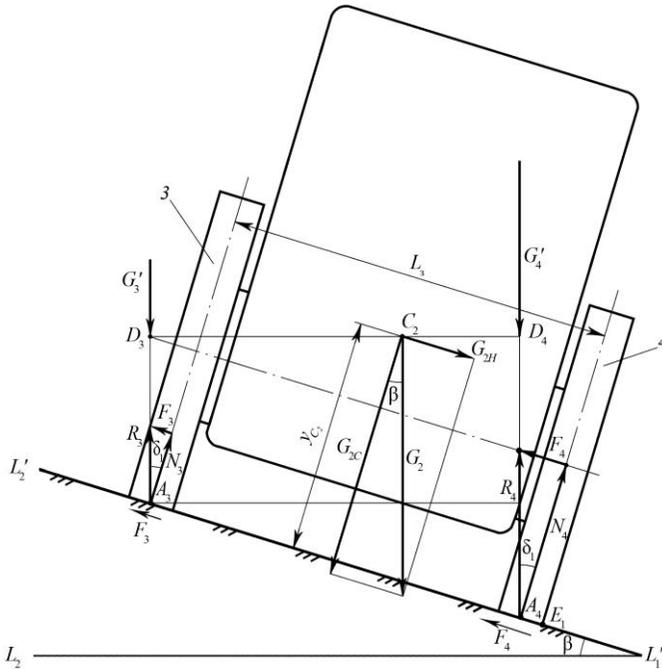


Рис. 5 – Схема задней части трактора на двух опорах после её поворота на склоне на угол β относительно горизонтали $L_1'L_2$ и действующие на эту часть трактора силы

Под действием составляющей G_{2C} задняя часть трактора прижимается к поверхности поля $L_1'L_2$, а под действием составляющей G_{2H} трактор стремится сдвигаться вправо и вниз, преодолевая при этом сопротивление трению, которое создается почвой в местах соприкосновения с ней задних колес трактора. Таким образом, при повороте задней части трактора её колеса будут давить на линию $L_1'L_2$ почвы с силой G_{2C} , параллельно же поверхности почвы $L_1'L_2$ на заднюю часть трактора будет оказано давление с силой G_{2H} .

Для того, чтобы под действием силы G_{2H} не произошло смещение задних колес трактора вправо, нужно, чтобы сумма максимальных сил трения покоя обоих задних колес трактора о почву, была больше силы G_{2H} . Обозначим максимальную силу трения покоя заднего левого колеса трактора о почву F_{3max} , а максимальную силу трения покоя заднего правого колеса трактора о почву обозначим F_{4max} ;

тогда условие нескольжения задних колес трактора вправо и вниз будет:

$$G_{2H} < F_{3max} + F_{4max}. \quad (15)$$

Сила F_{3max} равна $f_{nmax} \cdot N_3$, где f_{nmax} – максимальное значение коэффициента трения покоя колеса о почву, а N_3 – нормальная сила реакции почвы на колесо 3. Точно также сила F_{4max} равна $f_{nmax} \cdot N_4$, где N_4 – нормальная сила реакции почвы на колесо 4. Тогда неравенство (15) представим следующим образом:

$$f_{nmax} (N_3 + N_4) > G_{2H}. \quad (16)$$

Под действием составляющей силы G_{2H} создается момент M_2 с плечом y_{C2} ; момент этот стремится опрокинуть заднюю часть трактора вокруг опорной точки E_1 правого колеса (рис. 5). Этот момент равен:

$$M_2 = G_{2H} y_{C2}. \quad (17)$$

На рис. 5 показано разложение силы G_2 на её составляющие G'_3 и G'_4 , линии действия которых параллельны силе G_2 ; проходят эти силы через нижние средние точки A_3 и A_4 колес. Составляющие G'_3 и G'_4 находятся из равенств:

$$\left. \begin{aligned} G'_3 (D_3 C_2) &= G'_4 (D_4 C_2); \\ G_2 &= G'_3 + G'_4, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

где $D_3 C_2$ и $D_4 C_2$ – расстояния $D_3 C_2$ и $D_4 C_2$.

Угол δ_1 , как это видно из рис. 5, равен углу β . Расстояния $D_3 D_4$, $D_3 C_2$ и $D_4 C_2$ определяются по таким же формулам, как формулы (11), (12) и (13), но в эти формулы вместо расстояния $L_{п}$ подставляется расстояние L_3 между серединами задних колес (рис. 3 и 5). Расстояние L_3 может быть равно $L_{п}$, но часто оно больше расстояния $L_{п}$.

Так будет поворачиваться задняя часть трактора, если она окажется на склоне под углом β к горизонтали.

Применяя изложенные выше данные по работе передней и задней частей трактора к случаю их совместной работы, с целью проверки его устойчивости, получим, что при такой работе трактор будет прижиматься к склону поля с силой G_C , равной сумме сил $G_{1C} + G_{2C}$, и стягиваться вдоль склона поля вниз и вправо с силой G_H , равной сумме сил $G_{1H} + G_{2H}$ (рис. 6).

При одинаковых углах α и β , т.е. при $\alpha = \beta$, сумма сил $G_{1C} + G_{2C}$ равна $G_1 \cos \alpha + G_2 \cos \alpha$, т.е. $(G_1 + G_2) \cos \alpha$ или $G \cos \alpha$. Точно так же, при $\beta = \alpha$, $G_{1H} + G_{2H} = G_1 \sin \alpha + G_2 \sin \alpha = G \sin \alpha$. Это значит, что схема сил на рис. 5 может относиться ко всему трактору, если вместо C_2 будет C , вместо G_2 будет G , вместо G_{2H} будет G_H , вместо G_{2C} будет G_C , вместо y_{C2} будет y_C , а вместо β будет α . Такая схема сил приводится на рис. 6.

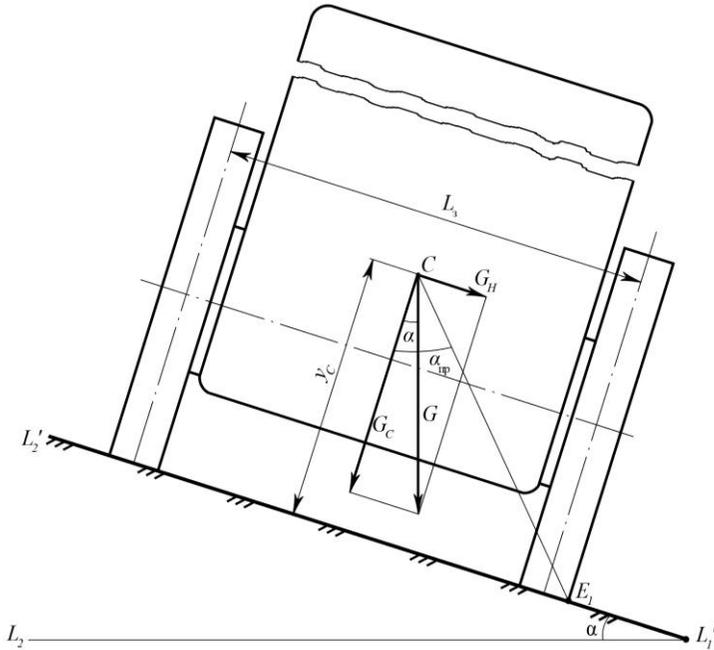


Рис. 6 – Вид сзади на наклоненный в правую сторону трактор и схема сил, действующих на него

Если угол α мал и меньше угла трения покоя, то для всего трактора составляющая сила G_H будет определяться по формуле:

$$G_H = G \sin \alpha. \quad (19)$$

В этом случае данная сила G_H недостаточна для сдвига трактора вправо и он будет устойчиво работать на склоне. При увеличении угла α будет возрастать составляющая сила G_H и может наступить момент, когда трактор будет сдвигаться вправо и вниз по линии $L'_2L'_1$. Это будет тогда, как уже указывалось, когда угол α станет больше угла трения покоя колес трактора о почву (рис. 6).

Анализ данного явления показал также, что чем меньше расстояния L_n и L_3 , тем больше опасность опрокидывания трактора на склонах при его перемещении поперек склона.

Одновременно с возрастанием силы G_H при росте угла α будет меняться положение вектора G , нижний конец которого будет приближаться к нижнему правому концу E_1 правого колеса. Если вектор G достигнет такого положения и его линия действия окажется

правее точки E_1 , опрокидывание трактора вправо окажется неизбежным. Такого положения допустить нельзя, т.е. угол α должен быть меньше угла $\alpha_{\text{пр}}$, представляющего собой предельное значение угла α .

Тангенс угла $\alpha_{\text{пр}}$ равен $L_3/2 + b_1/2 / y_C$, где b_1 – ширина обода правого заднего колеса трактора, а y_C – высота центра тяжести трактора. Тогда из равенства $tg\alpha_{\text{пр}} = L_3 + b_1 / 2y_C$ находим:

$$\alpha_{\text{пр}} = \arctg \frac{L_3 + b_1}{2y_C} . \quad (20)$$

Выводы. Так будут развиваться события, если не учитывать, что к трактору может быть присоединена сзади сельскохозяйственная машина или транспортная тележка (в агрегате с которыми он работает). В этом случае надо еще учитывать влияние прицепной машины на устойчивость агрегата. При всех прочих равных условиях устойчивость трактора будет тем больше, чем больше у него расстояния $L_{\text{п}}$ и L_3 .

Литература

1. Львов Е.Д. Теория трактора. – М.: Машгиз, 1960. – 252 с.
2. Тракторы: Теория / В.В. Гуськов, Н.Н. Велев, Ю.Е. Атаманов и др. под ред. В.В. Гуськова – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
3. Чудаков Д.А. Основы теории трактора и автомобиля. – М.: Сельхозиздат, 1962. – 312 с.
4. Пришляк В.М. Проблеми землеробства та методологічні аспекти дослідження автоматизації процесів на схилах / В.М. Пришляк // Науковий вісник НУБіП України. – К.: НУБіП, 2010. – Вип. 144. – Ч. 5. – С. 134-142.
5. Кириенко М.Н. Моделирование параметров динамической устойчивости по уравнению опрокидывания в поперечной плоскости / М.Н. Кириенко, А.С. Полянский, В.В. Задорожный // Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенко. – Харків, 2011. – Вир. 107. – Том 2. – С. 22-24.
6. Смолінський С.В. Теоретичне обґрунтування умови поперечної стійкості зернозбирального комбайна під час роботи на схилах / С.В. Смолінський // Механізація та електрифікація сільського господарства. Міжвідомчий тематичний науковий збірник. – Вип. 98. – Том 1. – Глеваха, 2013. – С. 306-313.
7. Усенко М.В. Обґрунтування вдосконалення робочих органів малогабаритних машин для вирощування однорічних культур на схилах / М.В. Усенко // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 2014. – № 1. – С. 121-128.