

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

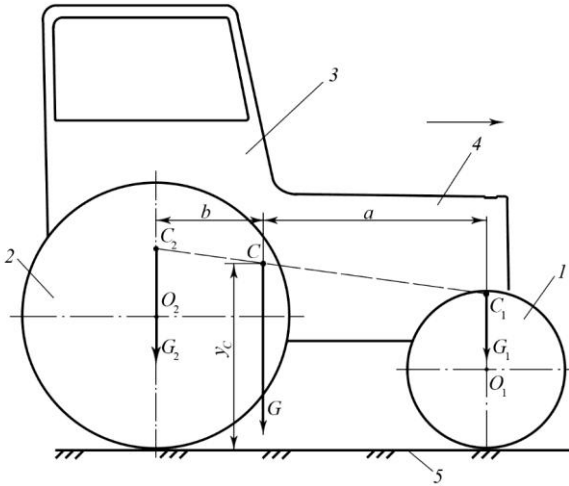


Рис. 1 – Схема чотирьохколесного трактора, находящегося на горизонтальной плоскости (вид сбоку):

- 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.

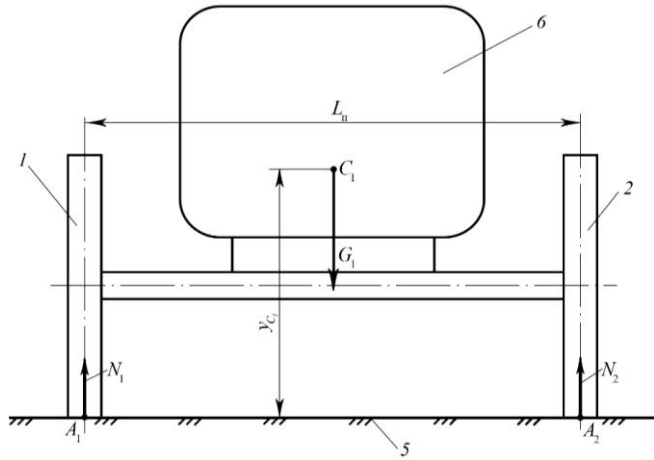


Рис. 2 – Вид ззади на передню частку трактора в вертикальній площині: 1 – ліве переднє колесо; 2 – праве переднє колесо; 5 – ґрунт; 6 – передня частку трактора

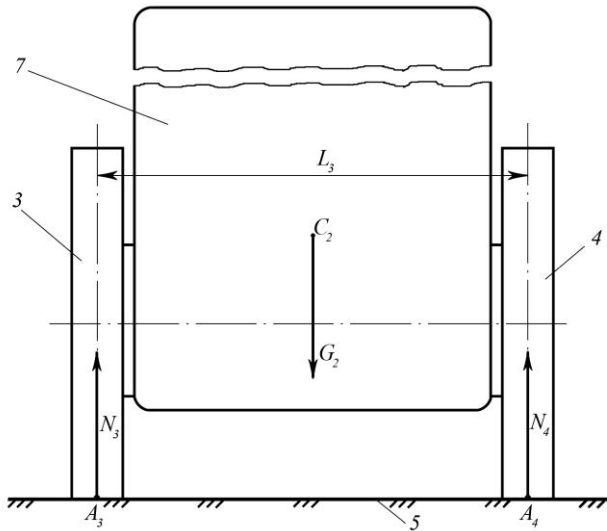


Рис. 3 – Вид ззади на трактор в вертикальній площині: 3 – заднє ліве колесо; 4 – заднє праве колесо; 5 – ґрунт; 7 – кабіна

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  $\alpha$  к горизонтали  $L_1L$ . В этом случае при повороте вокруг точки  $L_1$  передней части машины на угол  $\alpha$  (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  $\delta$  отклонения сил  $R_1$  и  $R_2$  от нормальных сил  $N_1$  и  $N_2$  будут меньше угла трения скольжения при малых углах  $\alpha$  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:

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

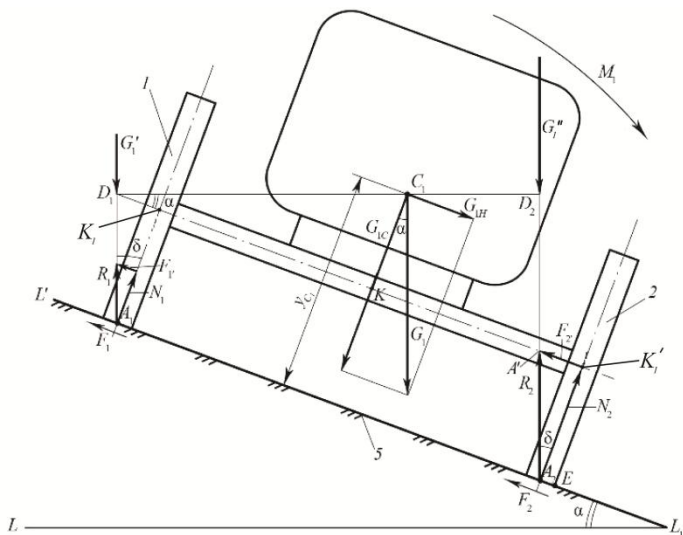


Рис. 4 – Схема передней части трактора на двух колесах после её поворота на угол  $\alpha$  относительно горизонтали  $L_1L$  при нахождении колес на склоне поля и действующие на эту часть трактора силы

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  $\delta$ . Этот угол  $\delta$ , как видно из построений (рис. 4), равен углу  $\alpha$ ; 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  $\alpha$  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  $\delta$  равен углу  $\alpha$  (о чем выше уже сказано), что справедливо в пределах значений угла  $\alpha$ , 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  $\alpha$ .

Если же на склоне под некоторым углом  $\beta$ , направленным в ту же сторону, что и угол  $\alpha$ , 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  $\beta$  к горизонтали. При таком положении поля задняя часть трактора окажется под углом  $\beta$  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:

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

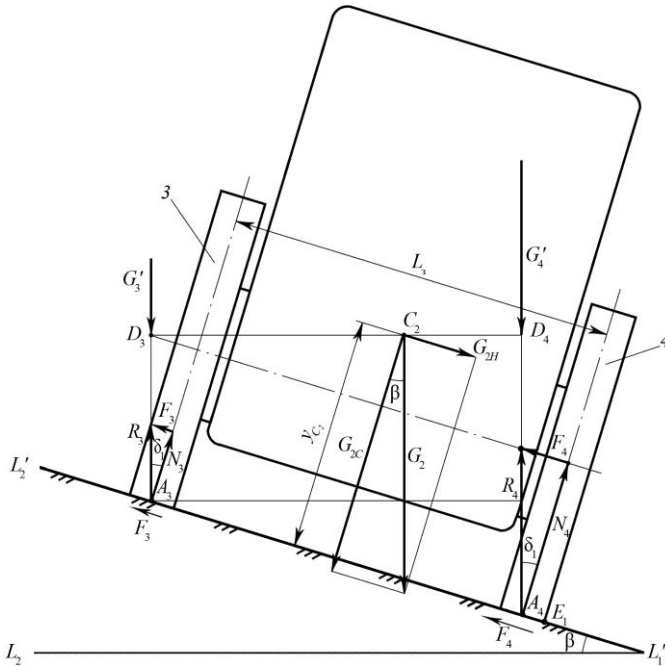


Рис. 5 – Схема задней части трактора на двух опорах после её поворота на склоне на угол  $\beta$  относительно горизонтали  $L_1'L_2'$  и действующие на эту часть трактора силы

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  $\delta_1$ , как это видно из рис. 5, равен углу  $\beta$ . 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  $\beta$  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  $\alpha$  и  $\beta$ , 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  $\beta$  будет  $\alpha$ . Такая схема сил приводится на рис. 6.

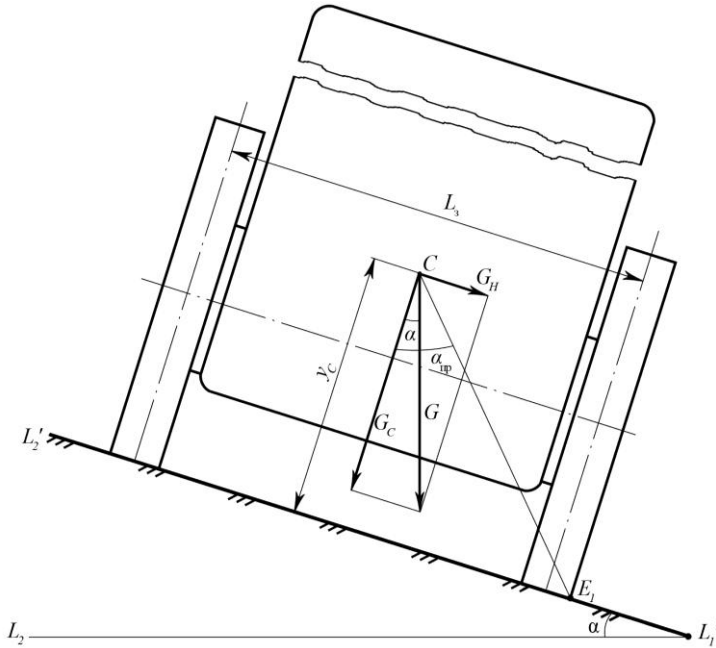


Рис. 6 – Вид сзади на наклоненный в правую сторону трактор и схема сил, действующих на него

Если угол  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  должен быть меньше угла  $\alpha_{\text{пр}}$ , представляющего собой предельное значение угла  $\alpha$ .

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.