

МЕХАΝІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА

УДК 621.312.3

М. Д. ПОДСКРЕБКО

ОСОБЕННОСТИ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ПАХОТНЫХ АГРЕГАТОВ

Белорусский государственный аграрный технический университет

(Поступила в редакцию 17.02.2010)

При работе пахотного агрегата изменение физико-механических свойств почвы создает колебания тягового сопротивления плуга, что вызывает изменение скоростного режима двигателя и скорости движения агрегата. Обработка результатов изменения скорости движения пахотного агрегата показала, что в установившемся режиме работы скорость агрегата изменяется по нормальному закону, при этом диапазон изменения скорости возрастает с увеличением крюковой нагрузки. Полученные вероятностные характеристики скорости движения агрегата при работе на разных передачах представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Вероятностные характеристики скорости движения агрегата при работе на разных передачах

Передача	Математическое ожидание (v_p), м/с	Дисперсия ($D[v_p]$)	Среднее квадратическое отклонение ($\sigma[v_p]$)	Доверительный интервал при $P = 0,997$	Абсолютное значение диапазона изменения скорости (Δv_p)
I	1,4616	0,004093	0,064	$1,27 \leq v_p \leq 1,65$	0,38
II	1,6310	0,002376	0,049	$1,48 \leq v_p \leq 1,78$	0,30
III	1,8176	0,006487	0,080	$1,58 \leq v_p \leq 2,06$	0,48
IV	1,9263	0,006185	0,079	$1,69 \leq v_p \leq 2,17$	0,48
V	1,7913	0,20094	0,142	$1,57 \leq v_p \leq 2,21$	0,84

П р и м е ч а н и е. Скорость движения определяли с помощью пятого колеса на длине 250 м. Глубина пахоты – 22–24 см.

Для изучения изменчивости физико-механических свойств почвы на поле были исследованы колебания влажности, твердости, коэффициента трения почвы по стали. Тяговое сопротивление корпуса плуга при скорости $v_p = 1,54$ м/с записывали с помощью динамометрического корпуса конструкции Челябинского института механизации и электрификации сельского хозяйства (ЧИМЭСХ, ныне ЧГАИУ) (рис. 1).

Динамометрический корпус состоит из основания 1, с помощью которого корпус крепится к раме плуга; корпуса 2, который может передвигаться в основании 1, опираясь на шесть рядов шариков 3; основной стойки 5, верхняя часть которой выполнена в виде шейки вала, вращающегося в трех шарикоподшипниках 4. Шариковые подшипники позволяют стойке перемещаться вертикально. На верхнем конце стойки жестко крепится рычаг 6, который шарнирно соединяется с рамой плуга и удерживает стойку от поворота в корпусе 2. Такое крепление стойки к раме обеспечивает ей три степени свободы, что позволяет методом электротензометрирования замерять интересующие силы. Тяговое сопротивление корпуса замеряется кольцевым электродинамометром 7.

Почва представляла выщелочный чернозем среднесуглинистого механического состава. Влажность и твердость определяли в горизонтах 0–10 см; 10–20 см; 20–25 см вдоль борозды через 1 м. Коэффициент трения замеряли на плоских двугранных клиньях с помощью динамо-

метрической вставки трения конструкции автора. Коэффициент трения находили как среднюю величину на длине 5 м при четырех скоростях движения клиньев: 0,40 м/с (1,4 км/ч); 1,28 м/с (4,6 км/ч); 2,3 м/с (8,3 км/ч) и 3,45 м/с (12,4 км/ч), глубина $a = 22$ см.

Динамометрическая вставка трения (рис. 2) состоит из подвижной призмы 1, связанной жестко с мембранным датчиком давления 2 (рис. 3). Конструкция прибора обеспечивает призме две степени свободы.

Перемещение в каждом направлении воспринимается пружинами 3 и 4. На мембране датчика и пружинах наклеиваются тензорезисторы, которые совместно с компенсационными тензорезисторами образуют внешние измерительные полумосты динамометрической вставки. Таким образом, вставка трения позволяет одновременно записывать действующее на нее нормальное давление почвы и обе составляющие силы трения. Мембранный датчик давления закрепляется в подвижной призме гайкой.

Для предотвращения попадания внутрь пыли в специальный паз на клею устанавливается уплотнительное резиновое кольцо. С нижней стороны вставка после монтажа закрывается специальной пластинкой с резиновой прокладкой. На рис. 4 показана установка динамометрических вставок трения на плоских двухгранных клиньях: одна – у лезвия, вторая – у верхнего обреза клина. Проведенные исследования показывают, что зависимость коэффициента трения от нормального давления не однозначная, а определяется еще скоростью движения (рис. 5). Так, при скорости до 2,2 м/с (8 км/ч) и давлении

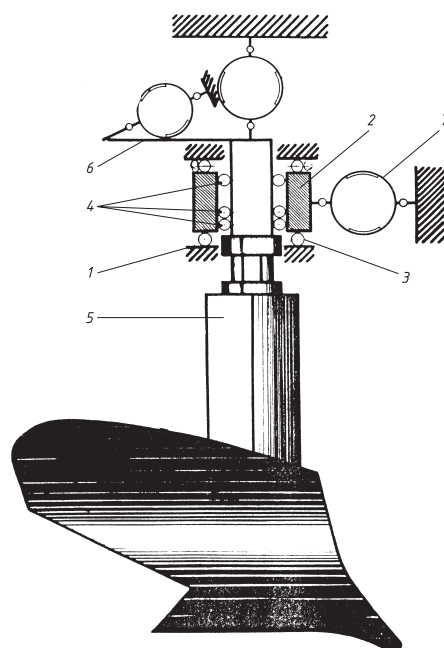


Рис. 1. Схема динамометрического корпуса плуга конструкции ЧИМЭСХ (ныне ЧГАИУ)

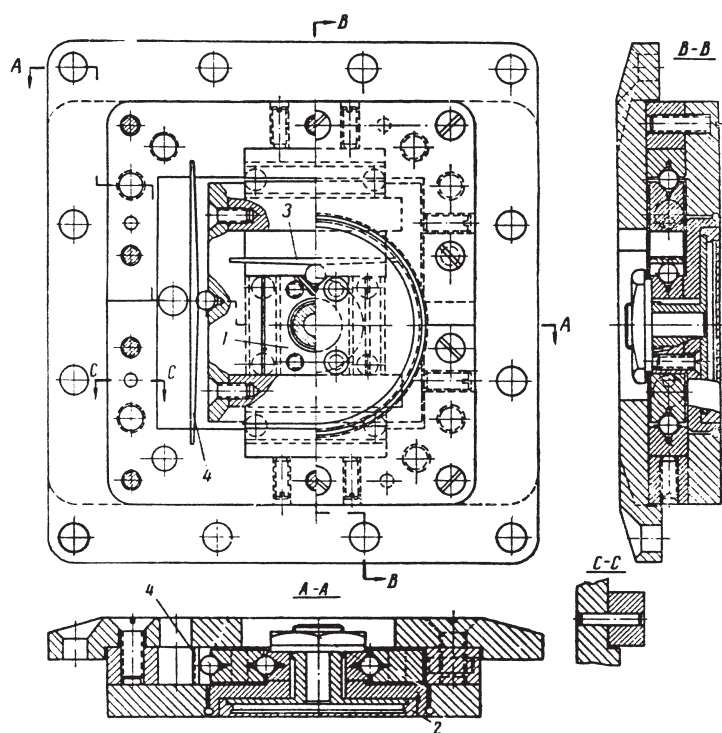


Рис. 2. Динамометрическая вставка трения: 1 – подвижная призма, 2 – датчик давления, 3 и 4 – пружины

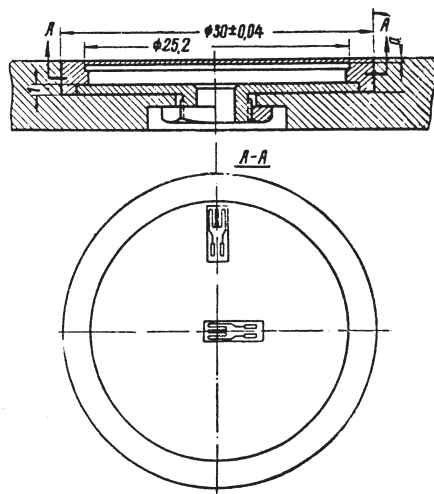


Рис. 3. Мембранный датчик давления

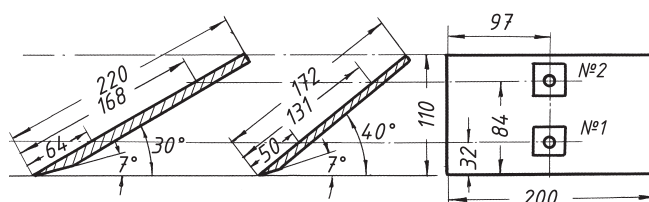


Рис. 4. Двухгранные клинья с указанием расположения динамометрических вставок трения

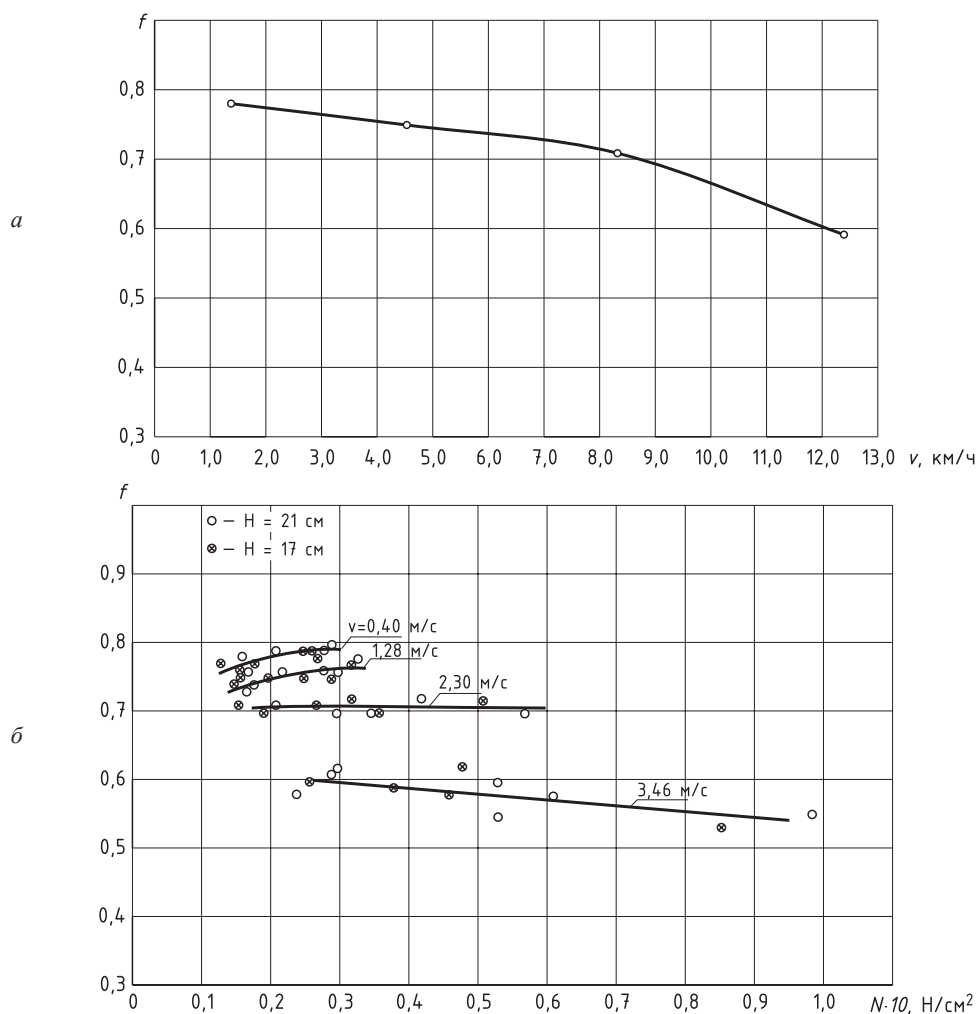


Рис. 5. Изменение коэффициента трения почвы по стали в зависимости от нормального давления (а) и скорости движения (б)

до 4 Н/см^2 коэффициент трения возрастает; при скорости выше $2,2 \text{ м/с}$, начиная от давления $5,0 \text{ Н/см}^2$, он уменьшается. Это особенно заметно при скорости выше $3,0 \text{ м/с}$.

Полученные экспериментальные данные могут иметь следующее объяснение.

Сила трения является результатом молекулярного и механического взаимодействия частиц на фактической площади касания [1]. Силы трения, обусловленные молекулярным притяжением, сцеплением точек контакта, определяются состоянием и свойствами трущихся поверхностей и для данных условий взаимодействия могут считаться постоянными. Изменение общей силы трения будет происходить только за счет механического взаимодействия, обусловленного сдвигами микронеровностей в контактном слое. При движении почвы в контактном слое возникают касательные силы, равные сопротивлению деформации контактного слоя. При увеличении скорости относительного движения почвы в контактном слое будут преобладать пластические (не-

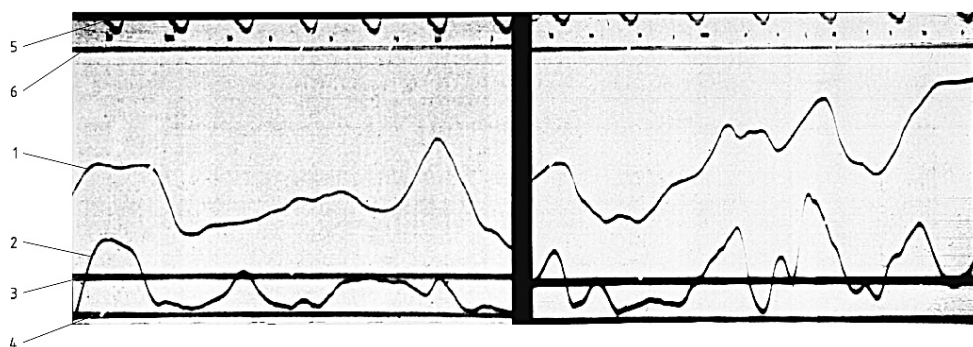


Рис. 6. Запись нормальных давлений и сил трения на осциллографическую пластинку (клин $\varepsilon = 30^\circ$, глубина пахоты – 21 см, скорость пленки – 100 мм/с): 1 – давление на динамометрическую вставку № 1; 2 – сила трения (касательная сила); 3 – нулевая линия для кривой 1, 4 – нулевая линия для кривой 2; 5 – отметки времени; 6 – отметки пути

обратимые) деформации, требующие меньших касательных сил на преодоление механических связей, поэтому коэффициент трения будет уменьшаться. На малых скоростях в контактном слое преобладают упругие (обратимые) деформации, требующие больших касательных сил на преодоление механических связей, тогда коэффициент трения будет увеличиваться.

Второй причиной, оказывающей влияние на уменьшение коэффициента трения почвы с ростом скорости, является сам динамический процесс взаимодействия клина с почвой (рис. 6). Сопротивление клина при движении в почве носит колебательный характер. С ростом скорости колебания сопротивления клина происходят с большей частотой, в связи с чем при увеличении скорости сила трения, а значит и коэффициент трения, должны уменьшаться.

Изменение величины коэффициента трения от удельного давления объясняется изменением поверхности водных пленок в контактном слое. При малых скоростях с ростом давления в контактном слое увеличивается поверхность водных пленок, что вызывает рост упругих деформаций, а значит и сил трения. В этом случае коэффициент трения будет расти. При больших скоростях и значительных давлениях влага в капиллярах окажется закупоренной. В контактном слое будут преобладать пластические деформации, уменьшающие силы трения, что вызовет падение коэффициента трения.

Проведенный анализ, не претендуя на полноту, дает достаточно ясное представление о физической сущности процесса трения при движении почвы по поверхности клина.

Опытные данные зависимости коэффициента трения от скорости были обработаны по методу наименьших квадратов с использованием интерполяционного ряда П. Л. Чебышева и представлены уравнением параболы:

$$f = 0,776 + 0,0155v_p - 0,0207v_p^2 \quad (1)$$

(v_p – скорость движения, м/с).

Одновременно проводилось определение коэффициента трения почвы на приборе академика В. А. Желиговского. Результаты этих замеров представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Значения коэффициентов трения, определенных прибором академика В. А. Желиговского

Номер замера	Коэффициент трения	Номер замера	Коэффициент трения	Номер замера	Коэффициент трения
1	0,82	8	0,89	15	0,78
2	0,90	9	0,87	16	0,81
3	0,93	10	0,79	17	0,89
4	0,82	11	0,78	18	0,77
5	0,79	12	0,81	19	0,68
6	0,70	13	0,86	20	0,74
7	0,81	14	0,76	Среднее	0,81

Сравнивая коэффициенты трения, полученные с помощью вставок трения, с коэффициентом трения, определенным прибором академика В. А. Желиговского, видно, что при малых скоростях эти коэффициенты практически не отличаются. Коэффициент трения, определенный на приборе В. А. Желиговского как среднее арифметическое из 20 замеров, был равен 0,81; коэффициент трения, определенный с помощью динамометрической вставки при скорости 0,4 м/с (1,4 км/ч), равен 0,78. Расхождение составило менее 4%. Отсюда можно сделать вывод, что прибор В. А. Желиговского дает статический коэффициент трения, при пользовании которым следует вносить поправку на скорость. Заменяя в уравнении величину 0,776 через f_0 , которое принимается равным статическому коэффициенту трения, получим уравнение для практических расчетов:

$$f = f_0 + 0,0155v_p - 0,0207v_p^2, \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает зависимость с точностью до 1,2%. Границы колебаний влажности, твердости и коэффициента трения почвы по горизонтам представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Колебания влажности, твердости и коэффициента трения почвы

Горизонты, см	Влажность, %		Твердость, Н/см ²		Коэффициент трения	
	границы колебания	среднее значение	границы колебания	среднее значение	границы колебания	среднее значение
0–10	14,0–21,4	16,8	152–238	200	—	—
10–20	15,2–19,7	17,4	176–292	224	—	—
20–25	16,6–20,9	18,7	196–304	243	0,71–0,90	0,78

П р и м е ч а н и е. Значение коэффициента трения приведено для скорости движения клина 0,4 м/с.

Данные показывают, что влажность, твердость и коэффициент трения на одном и том же поле значительно отклоняются от своих средних значений. Важное значение для совершенствования агрегатов основной обработки почвы имеет связь физико-механических свойств почвы с сопротивлением плугов и загрузкой тракторных двигателей. Так как характеристики физических свойств почвы являются по своей природе случайными, то тяговое сопротивление плуга при работе будет представлять случайную функцию пути.

Для изучения связи между сопротивлением корпуса плуга и изменением твердости и влажности почвы были проведены следующие экспериментальные исследования. По гону трактора натягивали мерную проволоку с расстоянием между шайбами 0,7 м для подачи импульсов на осциллограф при записи тягового сопротивления корпуса плуга.

Против шайб в зоне работы лемеха корпуса (на глубине 0,15–0,22 м при вспашке на глубину 22 см) определяли влажность и твердость почвы. Подача импульсов на осциллограф при записи тягового сопротивления позволяла каждой точке поля поставить в соответствие сопротивление корпуса.

По результатам опытов были построены диаграммы одновременного изменения сопротивления корпуса $R_n(l)$, твердости $T(l)$ и влажности $W(l)$ в функции пути. Используя методы математической статистики и теории корреляции, проверили наличие линейных связей между изучаемыми величинами.

Т а б л и ц а 4. Корреляционная связь между удельным сопротивлением почвы при вспашке, влажностью и твердостью почвы

Показатель	Значение доверительного интервала коэффициента корреляции
$K \rightarrow T$	+0,127 ÷ +0,532
$K \rightarrow W$	–0,324 ÷ +0,106
$T \rightarrow W$	–0,413 ÷ +0,018
$K \rightarrow (TW)$	+0,584 ÷ +0,784

Из табл. 4 следует, что корреляционные связи между удельным сопротивлением почвы и твердостью, между удельным сопротивлением почвы и влажностью являются слабыми; сильная положительная связь существует между удельным сопротивлением почвы и произведением твердости и влажности почвы.

Академик В. П. Горячкин, анализируя диаграммы тягового сопротивления плугов, отмечал, что, несмотря на сложность, они имеют периодически повторяющиеся элементы, поэтому основной задачей их изучения является разложение кривой на отдельные составляющие с разными значениями амплитуд и периодов колебаний [2].

Ю. К. Киртбая выделяет на диаграммах тягового сопротивления два характерных вида колебаний: а) колебания с периодом до 2 м, вызываемые технологическим процессом и условиями движения агрегата; б) колебания с периодом до 12 м, обусловленные периодическим изменением физико-механических свойств почвы [3].

В. И. Анохин рекомендует составляющие нагрузки с периодом $T = 2$ с и менее считать основными колебаниями нагрузки, принимая их степень неравномерности и период за параметры неустановившейся нагрузки, по которым при комплектовании агрегатов необходимо устанавливать степень загрузки двигателя; составляющие с большим периодом изменения рассматривать как длительные изменения нагрузки, вызывающие перегрузку двигателя, преодолеваемую при работе за счет резервирования мощности, т. е. снижения эксплуатационной нагрузки двигателя [4].

Таким образом, тяговое сопротивление плуга при работе, а значит и вращающий момент на валу двигателя, должно рассматриваться как сложные периодические функции, состоящие из нескольких составляющих, представляющих синусоидальные кривые с амплитудой a_i и периодом T_i .

Для определения характеристик колебательных воздействий, оказывающих существенное влияние на работу двигателя, было проведено каноническое разложение кривой тягового сопротивления как случайной функции пути $R_n(l)$ и выделено четыре гармоники (квазипериодических функций) с периодом $T_i \geq 2$ с:

$$R_n(l) = \bar{R}_n(l) + \sum_{i=1}^n a_i \sin\left(\frac{2\pi}{L_i}l + \varphi_i\right) + r_n(l), \quad (3)$$

где $\bar{R}_n(l)$ – математическое ожидание тягового сопротивления на участке; a_i – амплитуда колебаний i -й составляющей; L_i – период колебания по пути i -й составляющей сопротивления; φ_i – начальная фаза i -й составляющей сопротивления; $r_n(l)$ – остаточный член, представляющий высокочастотные колебания с малой интенсивностью.

Применяя метод Лагранжа–Дейля [5], из кривой тягового сопротивления корпуса плуга были выделены четыре отдельные квазипериодические составляющие, принимая период $T_i = \frac{L_i}{v_p}$ ($v_p = 1,54$ м/с):

$$R_n(t) = 4010,2 + 562,2 \sin\left(\frac{2\pi}{18}t - \frac{4}{3}\pi\right) + 465,0 \sin\left(\frac{2\pi}{5}t + \frac{\pi}{5}\right) + \\ + 539,4 \sin\left(\frac{2\pi}{1,3}t + \frac{5}{13}\pi\right) + 558,0 \sin\left(\frac{2\pi}{1}t + 0,7\pi\right) + r_n(t), \quad (4)$$

где $M[r_n(t)] = 0$; $\bar{R}_n(t) = 4010,2$ Н; $D_n[r_n(t)] = 61504$ Н²; $\sigma[r_n(t)] = 248$ Н.

Характеристики выделенных составляющих тягового сопротивления приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5. Составляющие тягового сопротивления плуга

Номер составляющей	Амплитуда (a_i), Н	Период (T_i), с	Фазовый угол (φ_i), °
I	562,2	18	–240
II	465,0	5	+36
III	539,4	1,3	–69
IV	558,0	1,0	+126

Из табл. 5 следует, что перегрузка двигателя может создаваться первой и второй составляющими.

Для объяснения причин, вызывающих появление 1-й и 2-й составляющих тягового сопротивления, определяли влажность и твердость почвы в зоне работы лемехов с интервалом 0,7 м.

В результате обработки диаграмм $W(t)$ и $T(t)$ были выделены в этих функциях следующие квазипериодические составляющие:

$$T(t) = 314,6 + 61,2 \sin\left(\frac{2\pi}{10}t - \frac{3}{20}\pi\right) + 32,8 \sin\left(\frac{2\pi}{0,5}t + \frac{\pi}{5}\right) + \tau(t) \quad (5)$$

$$(M[\tau(t)] = 0; \sigma[\tau(t)] = 18 \text{ Н/см}^2);$$

$$W(t) = 20,24 + 3,37 \sin\left(\frac{2\pi}{10}t + \frac{17}{20}\pi\right) + 1,26 \sin\left(\frac{2\pi}{3}t + \frac{\pi}{6}\right) + W(t) \quad (6)$$

$$(M[W(t)] = 0; \sigma[W(t)] = 1,1\%).$$

Формулы (5), (6) показывают, что в обоих процессах имеются составляющие с одинаковым периодом 10 с, но отсутствуют колебания с периодом 5 с.

Перемножая вторые гармоники в формулах (5) и (6) и учитывая сильную корреляционную связь между тяговым сопротивлением и произведением твердости и влажности (см. табл. 4), после преобразования для функции $[W(t)T(t)]$ в качестве основной гармоники получим составляющую с периодом $T = 5$ с:

$$61,2 \sin\left(\frac{2\pi}{10}t - \frac{3}{20}\pi\right) \cdot 3,37 \sin\left(\frac{2\pi}{10}t + \frac{17}{20}\pi\right) = 103,1 \sin\left(\frac{2\pi}{5}t + \frac{1}{5}\pi\right) - 103,1.$$

Таким образом, вторая составляющая, выделенная в реализации функции $R_n(t)$, обуславливается изменениями основных физико-механических свойств почвы – изменениями влажности и твердости.

Первая составляющая является, вероятно, следствием изменения макрорельефа поля; третья – следствием изменения микрорельефа поля и особенностями движения плуга; четвертая вызывается характером выполняемого технологического процесса.

Момент сопротивления на валу двигателя с учетом передаточного отношения можно представить выражением, аналогичным (3):

$$M_c(t) = \bar{M}_c(t) + \sum_{i=1}^n B_i \sin\left(\frac{2\pi}{T_i}t + \varphi_c\right) + m(t). \quad (7)$$

Необходимо отметить, что в выражении $M_c(t)$ появятся дополнительные составляющие, вызываемые зацеплением шестерен трансмиссии, бортовых редукторов, взаимодействием ходового аппарата трактора с почвой. Однако все эти составляющие будут иметь период значительно меньше 1 с и, следовательно, будут определяться членом $m(t)$.

В условиях эксплуатации загрузка двигателя выбирается так, чтобы при колебаниях момента сопротивления не наблюдалась частая работа двигателя на безрегуляторной ветви скоростной характеристики, приводящая к снижению числа оборотов и ухудшению условий работы двигателя. На пахоте коэффициент возможной перегрузки двигателя имеет значение $\nu = 1,3-1,4$ [6]. Согласно табл. 5, коэффициент возможной перегрузки двигателя за счет микрорельефа поля, характера технологического процесса (составляющие 3 и 4) будет равен 1,27. Изменение микрорельефа и физико-механических свойств почвы (составляющие 1 и 2) увеличивают его до 1,49, т. е. на 17%, примерно на столько же процентов для обеспечения нормальной работы двигателя должен уменьшиться его коэффициент эксплуатационной загрузки.

Опыт использования пахотных агрегатов показывает, что для обеспечения устойчивой работы трактора даже на полях с ровным рельефом коэффициент эксплуатационной загрузки двигателя по мощности не превышает 0,8–0,85 [7].

Постановка на тракторах гидромеханической трансмиссии, автоматически регулирующей скорость движения трактора в соответствии с длительными изменениями крюковой нагрузки, обусловленными первой и второй составляющими тягового сопротивления, улучшает использование мощности двигателя, но вызывает в широких пределах изменение скорости движения, что ведет к снижению производительности и экономичности агрегата, а также качества выполнения технологического процесса.

Существенно уменьшить в крюковой нагрузке влияние составляющих с большим периодом можно или автоматически изменяя параметры рабочих органов плуга в соответствии с изменением свойств почвы и скорости движения при сохранении глубины вспашки постоянной, или используя двухпоточную передачу мощности на почвообрабатывающие машины с активными рабочими органами.

Таким образом, отличительная особенность работы пахотных агрегатов состоит в том, что все факторы, определяющие условия работы агрегатов и выходные параметры, характеризующие энергетику и качество, являются случайными функциями пути (времени), что должно учитываться при создании совершенных конструкций плугов.

Выводы

1. В установившемся режиме работы скорость движения пахотного агрегата изменяется по кормольному закону, при этом диапазон изменения скорости возрастает с увеличением нагрузки.

2. Тяговое сопротивление корпуса плуга записывается с помощью динамометрического корпуса, обеспечивающего стойке три степени свободы, что позволяет методом электротензометрирования замерять интересующие силы.

3. Коэффициент трения замерялся на плоских двугранных клиньях с помощью динамометрической вставки трения, которая позволяет одновременно записывать нормальное давление почвы и составляющие силы трения. Зависимость коэффициента трения от нормального давления не однозначная, а определяется еще скоростью движения. При скорости до 2,2 м/с и давлении 4 Н/см² коэффициент трения возрастает, а при скорости выше 2,2 м/с и давлении 5,0 Н/см² – уменьшается.

4. Исследование влажности, твердости и коэффициента трения на одном и том же поле значительно отклоняется от своих средних значений.

5. Так как физические свойства почвы по своей природе являются случайными, то тяговое сопротивление плуга при работе будет представлять случайную функцию пути.

6. Используя методы математической статистики и теории корреляции, было установлено, что сильная положительная связь существует между удельным сопротивлением почвы и производением твердости и влажности почвы.

7. Для определения характеристик, оказывающих большое влияние на работу двигателя, было проведено каноническое разложение кривой тягового сопротивления и выделено четыре гармошки с периодом больше 2,0 с. Перегрузка двигателя создается первой и второй составляющими. Макрорельеф и физико-механические свойства почвы увеличивают коэффициент возможной перегрузки двигателя на 17%.

Литература

1. Крачельский, М. В. Трение и износ / М. В. Крачельский. – М.: Машгиз, 1962.
2. Горячкин, В. П. Земледельческая механика / В. П. Горячкин. – Колос, 1965. – Т. 1.
3. Киртбая, Ю. К. Исследование динамики тягового сопротивления сельскохозяйственных машин и орудий / Ю. К. Киртбая // Сельхозмашина. – 1952. – № 12.
4. Анохин, В. И. Применение гидротрансформаторов на скоростных гусеничных сельскохозяйственных тракторах / В. И. Анохин. – М.: Машиностроение, 1972.

5. Серебренников, М. Г. Выявление скрытых периодичностей / М. Г. Серебренников. – М.: Наука, 1965.
6. Болтинский, В. Н. Работа тракторного двигателя при неустановившейся нагрузке / В. Н. Болтинский. – М.: Сельхозгиз, 1949.
7. Иофинов, С. А. Оптимизация режимов и автоматизация учета и контроля работы механизированных агрегатов / С. А. Иофинов // Современные проблемы механизации сельского хозяйства. – М., 1965. – Т. 1.
8. Подскребко, М. Д. Влияние скорости на величину нормального давления, удельной силы трения и коэффициента трения, возникающих при работе плоского клина / М. Д. Подскребко, В. И. Виноградов // Повышение рабочих скоростей тракторов и сельскохозяйственных машин: сб. докл. – М.: Машгиз, 1963.
9. Подскребко, М. Д. Применение методов стохастической аппроксимации и случайного баланса для определения оптимальных параметров сельскохозяйственных машин и орудий / М. Д. Подскребко // Труды ЧИМЭСХ. – 1972. – Вып. 57.

M. D. PODSKREBKO

PECULIARITIES OF WORKING CONDITIONS OF PLOWING UNITS

Summary

The article demonstrates the results of research of the range of humidity, hardness, coefficient of soil friction on steel, speed changes of a plowing unit. Canonical decomposition of the draught resistance curve as an accidental function of a trace is stated and four harmonic components with the period of more than 2 seconds are identified. It's shown that engine overload is caused only by the first and the second component of draught resistance due to humidity and hardness changes and changes of field macrorelief.