

УДК 631.512

Г. С. ГОРИН¹, А. А. СИЛЬЧЕНКО², Г. Ф. БЕТЕНЯ³, С. Н. РОГОЖИНСКИЙ³

РАСЧЕТ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ ПРИ ПОЧВООБРАБОТКЕ ПЛУГОМ

¹Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

²Государственный комитет по науке и технологиям,
г. Минск, Республика Беларусь

³Белорусский государственный аграрный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: tnrc-bgatu@mail.ru

(Поступила в редакцию 10.12.2013)

При решении названной задачи большинство исследователей ограничивается анализом составляющих, входящих в обобщенную зависимость В. П. Горячкина. Это не позволяет моделировать процессы, происходящие в контакте. Как следствие, из подобных расчетов не вытекают конкретные рекомендации по выбору деталей плуга, лемеха, отвала, полевой доски и их покрытий.

Цель данного расчета – изучение возможности снижения энергозатрат, повышения износостойкости названных деталей плуга путем выбора ширины корпусов плуга, а также нанесения на них покрытий для снижения, в частности коэффициента трения.

1. Расчетные схемы. Для названного анализа составляющие снижения энергозатрат используются элементы нетрадиционной методики, предложенные в работах [5, 6], представленные на рис. 1–3.

В отличие от принятых кинематических схем [6, 7] предложены расчетные схемы, учитывающие деформации пласта. В поперечной плоскости рассматриваются четыре положения отдельной части пласта:

– в начальном положении I рассматривается параллелепипед с шириной b и высотой a . Центр параллелепипеда находится в точке 2 (рис. 1);

– в положение II параллелепипед приходит, поворачиваясь на угол Ψ_{I-II} вокруг крайней точки B , при этом центр тяжести параллелепипеда (точка 2) оказывается над точкой B . При повороте пласта почва испытывает деформации изгиба, сдвига, сжатия и растяжения (рис. 2, а). Высоту подъема центра тяжести пласта принимаем с учетом осадки;

– в положение III параллелепипед приходит, поворачиваясь вокруг крайней точки B'' (рис. 2, б) на угол Ψ_{II-III} , при этом центр масс окажется над точкой B'' и поднимется с учетом деформаций на высоту;

– в положение IV центр пласта приходит на расстоянии l_{2k} , на котором энергия разгона пласта поглощается, т. е. пласт тормозится.

В процессе перемещения носка лемеха возникает сила трения, вызывающая в почве напряжение сдвига $\sigma_{сд}$, вблизи полевого обреза возникают напряжения смятия $\sigma_{см}$, растяжения $\sigma_{р}$, среза $\sigma_{ср}$ и сдвига $\sigma_{сд}$ в разных плоскостях (рис. 3). Быстрое разрушение почвы сдерживает армирование поверхностных слоев корнями.

Методика предусматривает расчет составляющих энергозатрат при вспашке пласта почвы объемом $V_{пл} = 1 \text{ м}^3$ на глубину $a = 0,20$ м и ширину $b = 0,35$ м. Для обработки объема $V_{пл} = 1 \text{ м}^3$ почвы корпус с названными параметрами должен продвигаться на расстояние $S_p = 14,28$ м. При скорости $V = 2$ м/с время движения составит $t_p = 7,14$ с.

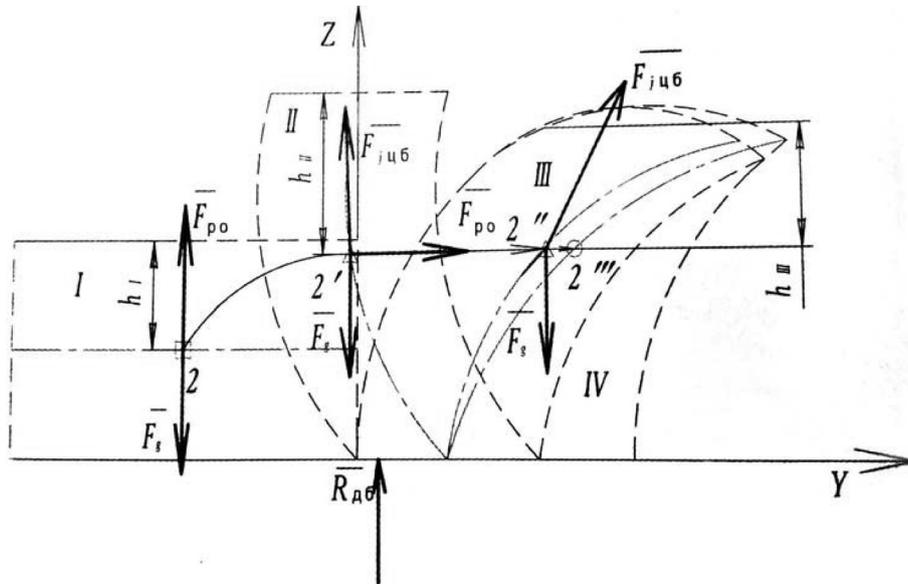


Рис. 1. Схема к расчету перемещений отделенного пласта почвы

В зоне контакта лемеха с почвой нормально опорной поверхности плужной борозды приложена часть общего веса плуга $G_{пл}^II = K_{пл}^II G_{пл}$ и части веса пласта почвы – обрабатываемая G_p и приподнимаемая в массиве G_M (рядом с плугом). Между обрабатываемым и приподнимаемым $BCHF$ пластами находится боковая площадь среза BF (см. рис. 3). Срез происходит в вертикальном направлении

$$\tau_{ср} = G_M / S = \frac{g\rho(S_{BCHF} + S_{СЕН})}{a},$$

где $S_{BCHF} = ab_{кон}^II$, $S_{СЕН} = \alpha^2 \sin \varphi_{п-п}$.

Напряжения среза почвы относительно малы. Они не превышают предела прочности $\tau_{ср} = 40$ кПа, тем более что почва армирована корнями растений. Растяжение почвы происходит в треугольнике ΔBFH с углом $\psi_{пл}$ при вершине. Сдвиг почвы в продольной плоскости происходит в горизонтальном направлении и по линиям сдвига, направленным по нормальям к поверхности лемеха с учетом образования на носке лемеха ядра уплотнения [3] и трения в контакте.

Силу внедрения лемеха в почву с учетом силы трения определим по формуле:

$$F_{внедр} = F_{лем} + F_{тр},$$

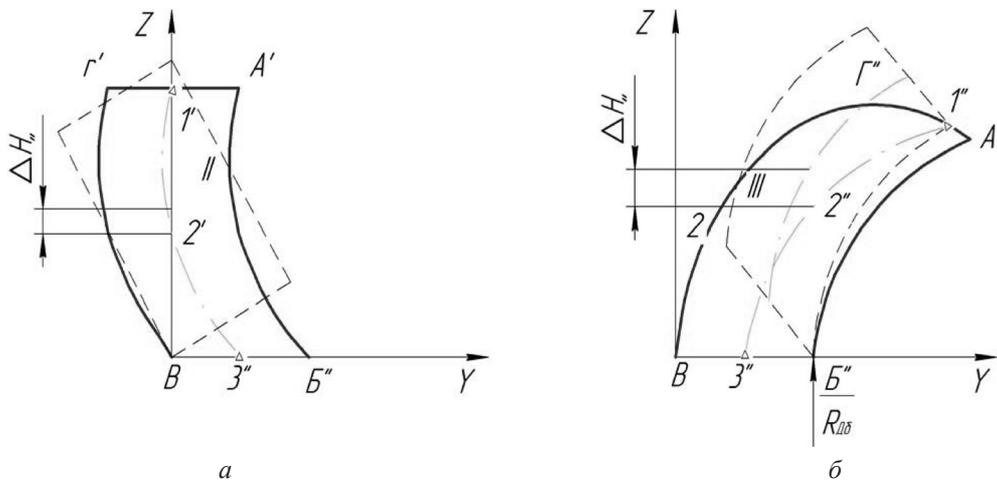


Рис. 2. Расчетные схемы деформаций пласта: а – центр тяжести пласта находится над точкой B; б – центр тяжести пласта находится над точкой B''

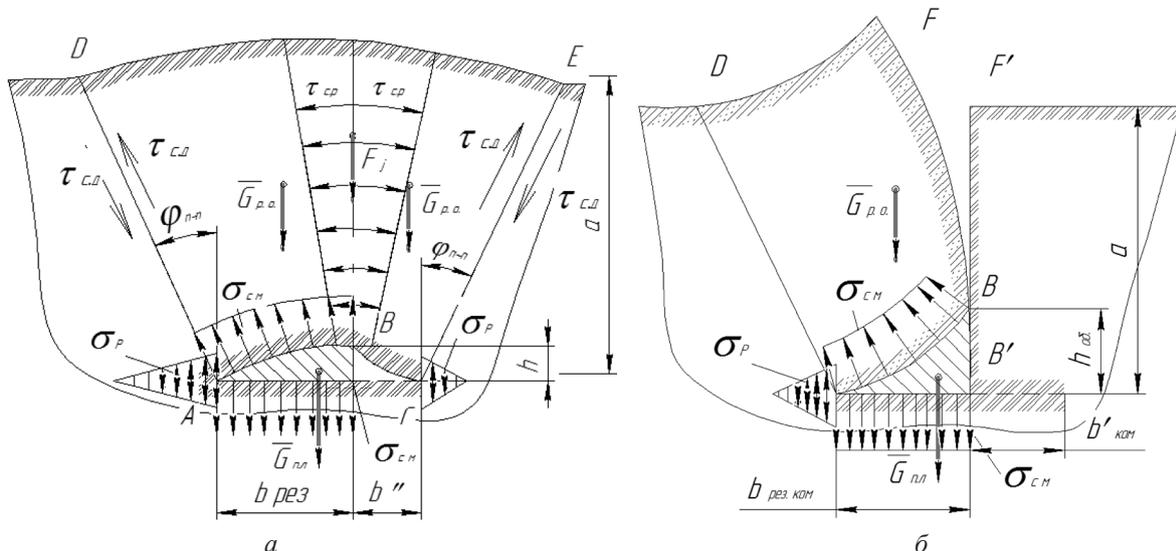


Рис. 3. Расчетные схемы сил, напряжений и деформаций пласта лемехом в поперечной плоскости: а – пласт не отделен от полевого обреза; б – пласт отделен от полевого обреза

$$F_{\text{лем}} = \sigma_{\text{см}} S_{\text{лем}},$$

$$F_{\text{тр}} = \varphi_{\text{пл}} K_{\text{пл}}^{\text{л}} (G_{\text{ро}} + G_{\text{м}} + G_{\text{пл}}),$$

где $\varphi_{\text{пл}}$ – коэффициент трения плуга, примем равным коэффициенту трения стали по почве $\varphi_{\text{пл}} = 0,5$ [3].

Площадь щели лемеха примем равной:

$$S_{\text{лем}} = \frac{hb_{\text{лем}}}{2} = \frac{0,065 \cdot 0,10}{2} = 3,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Остальные расчеты провели в соответствии с алгоритмом, приведенным в табл. 3, 4.

К пласту приложены силы (рис. 4): F_g – объемная сила тяжести; $F_{\text{ро}}$ – поверхностно распределенная сила; $F_{\text{цб}}$ – центробежная сила инерции; $R_{\text{гб}}$ – поверхностно распределенная реакция дна борозд; $R_{\text{п}}$ – поверхностно распределенная реакция предыдущего пласта; $F_{\text{жторм}}$ – объемная сила инерции пласта.

Составляющие веса почвы, приложенные к корпусу:

– оборачиваемой,

$$G_{\text{ро}} = g\nu\rho K_{\text{ро}} \frac{l_{\text{п}}}{S_{\text{р}}},$$

– приподнимаемой в массиве,

$$G_{\text{м}} = g\nu\rho K_{\text{м}} \frac{l_{\text{л}}}{S_{\text{р}}}.$$

Здесь $K_{\text{р}}$ и $K_{\text{м}}$ – коэффициенты, учитывающие доли в общей ширине захвата (табл. 3) пластов:

– оборачиваемого,

$$K_{\text{ро}} = \frac{b_{\text{рез}} + 0,5a \sin \varphi_{\text{мн}}}{b},$$

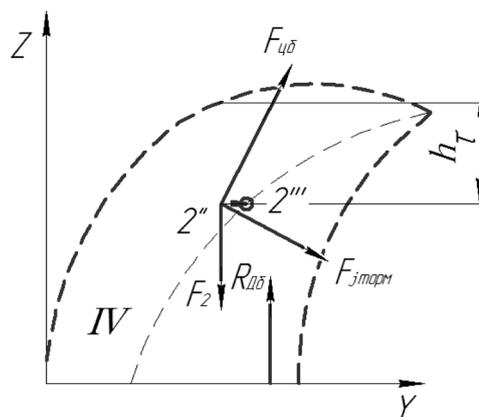


Рис. 4. Схема к расчету центробежных сил при перемещении пласта

– приподнимаемого в массиве,

$$K_M = \frac{b_{\text{рез}}'' + 0,5a \sin \varphi_{\text{пл}}}{b}$$

где $\frac{l_{\text{л}}}{S_{\text{р}}}$ – коэффициент, учитывающий долю длины лемеха в общей длине пахоты, $S_{\text{р}} = 14,28$ м.

2. Исходные данные для расчета. Для проведения расчета возьмем следующие параметры: почва – суглинок дерново-подзолистый, плотность почвы $\rho = 1600$ кг/м³. Пределы прочности почвы, МПа: на сдвиг $\tau_{\text{сд}} = 0,04$, на смятие $\sigma_{\text{всм}} = 0,08$, на растяжение $\sigma_{\text{р}} = 0,01$. Коэффициенты трения почвы: по почве $\psi_{\text{пл}} = 1$, почвы по стали $\varphi = 0,5$. В табл. 1 приведены рассчитанные значения кинематики поворота пласта почвы для различных вариантов исполнения корпусов плуга, необходимые для последующих расчетов.

Т а б л и ц а 1. **Параметры сравниваемых корпусов и пласта почвы**

Параметры плуга	Корпуса		
	1	2	3
1. Ширина захвата корпуса (b), м	0,35	0,30	0,50
2. Доля всего плуга, приходящегося на корпус ($G_{\text{пл}}$), кН	2,0	1,7	7,0
3. Перемещение ($l_{\text{н}}$) почвы по носку лемеха до момента разделения пласта, м	0,18	0,18	0,18
4. Подъем почвы на полевом обрезах ($\Delta h_{\text{об}}$), м	0,065	0,065	0,065
5. Ширина щели в массиве под лемехом ($b_{\text{рез}}$), м	0,105	0,10	0,15
6. Ширина щели в массиве (b''), м	0,100	0,095	0,14
7. Средний радиус вращения пласта, м, $\rho_{\text{ср}} = \sqrt{\rho_2^2 + (0,6a)^2}$	0,29	0,37	0,538
8. Длина траектории контакта почвы с поверхностью рабочего органа ($l_{\text{ро}}$), м	0,55	0,556	0,854
9. Углы поворота пласта между положениями, рад $\Psi_{\text{I-II}} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{a}{b}$ $\Psi_{\text{II-III}} = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{b/2}{a}$	0–1,05 0–0,95	0–1,12 0–0,95	0–1,37 0–0,90
10. Совокупный угол поворота пласта (Ψ), рад	2	2,09	2,27
11. Средний угол α между векторами сил тяжести и воздействия органов, рад, $\alpha = 1,54\Psi$	3,08	3,22	3,49
12. Расстояние (l_2), пройденное частицей 2 из положения III в положение IV, м	0,03	0,03	0,03
13. Высоты подъема центра пласта при перемещениях, м: из положения I в положение II ΔH из положения II в положение III ΔH	0,03 0,053	0,032 0,062	0,120 0,0385
14. Центробежное ускорение пласта почвы (W_{τ}), м/с ²	2,31	1,474	0,793
15. Радиус поворота центра пласта, м: – R_2' из положения I в положение II, $R_2' = K'b/2$, где K' – поправочный коэффициент (см. рис. 3), $K' = 0,874$; – R_2'' из положения II в положение III, $R_2'' = K''a/2$, где K'' – поправочный коэффициент (см. рис. 4), $K'' = 1,77$	0,153 0,177	0,130 0,197	0,2185 0,177

3. Алгоритмы и результаты расчета.

В табл. 2 приведены рассчитанные значения удельных затрат энергии на оборот пласта почвы, преодоление трения пласта о поверхность рабочих органов для различных вариантов корпусов.

Т а б л и ц а 2. Расчет удельных затрат энергии на оборот пласта почвы, Дж/м³

Составляющие затрат энергии	Формула для расчета	Корпус		
		обычный		оборотный
		$a_1 = 0,20$ м; $b_1 = 0,35$ м	$a_2 = 0,22$ м; $b_2 = 0,30$ м	$a_3 = 0,20$ м; $b_3 = 0,50$ м
<i>Затраты энергии на оборот пласта, Дж/м³</i>				
Вес пласта, Н	$F_g = g\rho V_{пл}$	15680		
Длина траектории поворота пласта, м	$S_{po} = \rho_{cp}(\Psi_{I-II} + \Psi_{II-III})$	0,55	0,556	0,427
Время его поворота, с	$t_{po} = \frac{S_{po}}{V}$, $v = 2$ м/с	0,275	0,278	0,2135
Среднее значение поверхностно-распределенной силы F_{po} , Н	$F_{po} = m_{пл}(2 + g \cos 1,5\varphi)$	13810,5	–	–
Удельная работа оборота пласта: из положения I в положение II из положения II в положение I	$E_{I-II}^{об} = m_{пл} R_2' \int_{\psi=\psi I}^{\psi=\psi I-II} (2 + g \cos \psi) d\psi$ $E_{II-III}^{об} = mg R_2'' \varphi \Big _0^{0,95}$ $E_{II-III}^{об} = m_{пл} R_2'' \int_{\psi=\psi I-II}^{\psi=\psi II-III} (2 + g \cos \psi) d\psi$	2113 270	1795 303,7	3937 255,8
<i>Затраты энергии на разгон пласта на участке II–III при условии равенства затратам на торможение на участке III–IV, Дж/м³</i>				
Удельная работа, сила инерции пласта при торможении, Н j_T , м/с ² время, с	$E_{разг} = F_j l_{2кон}$ $F_j = m j_m$ $J_m = \frac{l_2}{t_T}$ $t_r = \frac{l_2}{V}$	715 23825 1,5 0,015		
<i>Затраты энергии на преодоление трения пласта о поверхность рабочих органов, Дж/м³</i>				
Угловая скорость поворота пласта в продольно-вертикальной плоскости, с ⁻¹	$\omega_{cp} = \frac{\varphi_{cob}}{t_{po}}$	7,27	7,52	5,03
Средняя центробежная сила, Н	$F_{ц} = m_{пл} \rho_{cp} \omega_{cp}^2$	24523	23585	12695
Средневзвешенная нормальная сила, N ($K = 0,82$)	$N = F_{ц} K$	20101	19340	10410
Сила трения пласта, Н	$F_{трпл} = N \mu$	10050	9670	5205
Удельная работа на преодоление силы трения пласта, Дж/м ³	$E_{I-IV}^{тр} = F_{трпл} l_{po}$	5528	5752	3781
<i>Затраты энергии на пластическую деформацию, смятие и сдвиг пласта, приравняв ее к потере потенциальной энергии, Дж/м³</i>				
При повороте из положения I в положение II	$E_{I-II}^g = mg \Delta H_{I-II}$	470	501,76	1881
При повороте из положения II в положение III	$E_{II-III}^g = mg \Delta H_{II-III}$	830	972,16	606,8
На растяжение пласта центробежной силой на участке III–IV, где центробежная сила, Н	$E_{III-IV}^g = F_{ц} l_2$, где $F_{ц} = m \omega_{кон}^2 R_2''$	518 14805	526,5 17550	214,956 7165,2
<i>Суммарные затраты энергии, Дж/м³</i>				
На деформацию пласта с учетом поправочного коэффициента $K_y = 1,2$, учитывающего упругие деформации и неучтенные затраты энергии на деформации изгиба, Дж/м ³	$E_{деф} = K_y [E^{об} + E^{разг} + E^{тр} + E^D]$	12523	12076	13670

В табл. 3 приведены рассчитанные значения удельных затрат энергии на внедрение лемеха, формирование уплотненного ядра на носке и трение, подъем отделенной части пласта почвы, преодоление силы инерции отделенной части пласта и суммарная удельная энергия резания и подъема пласта для различных вариантов корпусов.

Т а б л и ц а 3. Расчет затрат энергии на резание почвы лемехом плуга, Дж/м³

Составляющие затрат энергии	Формулы для расчета	Корпус		
		обычный		оборотный
		$a_1 = 0,20$ м; $b_1 = 0,35$ м	$a_2 = 0,22$ м; $b_2 = 0,30$ м	$a_3 = 0,20$ м; $b_3 = 0,50$ м
1. Энергозатраты на внедрение лемеха и формирование уплотненного ядра на носке и трение, где части веса, H : оборачиваемого пласта, приподнимаемого в массиве, плуга, приходящаяся на носок	$E_{\text{внедр}} = F_{\text{внедр}} S_p$ $S_p = l / ab$ $F_{\text{внедр}} = F_{\text{лем}} + F_{\text{тр}}$ $F_{\text{тр}} = \varphi K_{\text{пл}}^{\text{л}} (G_{\text{ро}} + G_{\text{м}} + G_{\text{пл}})$ $F_{\text{лем}} = \sigma_{\text{см}} S_{\text{лем}}$ $G_{\text{ро}} = K_{\text{ро}} m_{\text{пл}} g V_{\text{пл}} \frac{l_{\text{л}}}{S_p}$ $K_{\text{ро}} = \frac{b_{\text{рез}} + 0,5a \sin \varphi_{\text{мн}}}{b}$ $G_{\text{м}} = K_{\text{м}} m_{\text{пл}} g V_{\text{пл}} \frac{l_{\text{л}}}{S_p}$ $K_{\text{м}} = \frac{b_{\text{рез}}'' + 0,5a \sin \varphi_{\text{мн}}}{b}$ $\frac{l_{\text{лем}}}{S_p}$ $G_{\text{пл}}^{\text{л}} = K_{\text{пл}}^{\text{л}} G_{\text{пл}}$	7975 14,28 2215 240 320 108,9 0,540 106,04 0,526 0,0126 220	7893,1 15,15 1938,6 221 300 122,04 0,642 120 0,625 0,012 187	9190 10,0 9190 399 520 134,78 0,468 129,02 0,448 0,018 660
2. Энергозатраты на подъем отделенной части пласта почвы $\Delta h_{\text{об}} = 0,065$ м	$E_{\text{под}}^{\text{отд}} = K_{\text{ро}} G_{\text{почв}}^{\text{пов}} \Delta h_{\text{об}}$	416	654	477
3. Энергозатраты на подъем отделенной части массива пласта	$E_{\text{под}}^{\text{м}} = K_{\text{м}} G_{\text{почв}}^{\text{пов}} \Delta h_{\text{об}}$	401,4	637	456,6
4. Энергозатраты на преодоление силы инерции отделенной части пласта, где: сила инерции, H ускорение, м/с ² время взаимодействия, с	$E_j = P_j S$ $P_j^{\text{отд}} = K_{\text{ро}} G_{\text{почв}}^{\text{пов}} j / g$ $j = \frac{2h_{\text{об}}}{V}$ $\Delta t = \frac{l_{\text{л}}}{V}$	1841,5 128,9 1,5 0,09	2334 154,08 1,5 0,09	1123 112,3 1,5 0,09
5. Остальные неучтенные потери на деформацию пласта, $K_{\text{л}} = 0,2$	$E_{\text{осг}} = K_{\text{л}} [E_{\text{внедр}} + E_{\text{под}}^{\text{отд}} + E_{\text{под}}^{\text{м}} + E_j]$	2127	2304	2249
Суммарная удельная энергия резания и подъема пласта, Дж	$E_{\text{лем}}^{\Sigma}$	12760	13821	13495

Из табл. 1–3 следует, что при равной глубине пахоты у корпуса с шириной захвата $b = 0,50$ м (по сравнению с корпусом $c = 0,35$ м) больше энергозатраты на поворот пласта, но меньше энергозатраты на преодоление трения с поверхностью корпуса.

4. Анализ составляющих энергозатрат на трение. В табл. 4 приведены рассчитанные значения составляющих энергозатрат на трение лемеха и корпуса (по элементам и суммарные) при

различных вариантах глубины почвообработки и ширины корпусов, а также КПД при различных коэффициентах трения.

Т а б л и ц а 4. Составляющие энергозатрат на трение при разных коэффициентах трения, Дж/м³

Показатель	Глубина почвообработки (а) и ширина (b) корпуса		
	$a_1 = 0,20$ м; $b_1 = 0,35$ м	$a_2 = 0,22$ м; $b_2 = 0,30$ м	$a_3 = 0,20$ м; $b_3 = 0,50$ м
<i>Составляющие энергозатрат на трение лемеха при коэффициенте трения $\varphi_{пл} = 0,5$</i>			
$E_{лем}^{тр}$	5468	5862	5859
$E_{лем}^{\Sigma}$	12760	13821	13459
$E_{лем}^{тр}/E_{лем}^{\Sigma}$	0,428	0,424	0,434
<i>Составляющие энергозатрат на трение корпуса при коэффициенте трения $\varphi_{пл} = 0,5$</i>			
$E_{деф}^{тр}$	5528	5752	5781
$E_{деф}^{\Sigma}$	12523	12076	13670
$E_{деф}^{тр}/E_{деф}^{\Sigma}$	0,44	0,476	0,276
<i>Суммарные составляющие энергозатрат на трение лемеха и корпуса при коэффициенте трения $\varphi_{пл} = 0,5$</i>			
$E_{лем}^{тр} + E_{деф}^{тр}$	10996	11614	9640
$E_{лем}^{\Sigma} + E_{деф}^{\Sigma}$	25283	25887	27165
$K_{тр} = E_{лем}^{тр} + E_{деф}^{тр} / E_{лем}^{\Sigma} + E_{деф}^{\Sigma}$	0,435	0,449	0,355
$\eta_{тр} = 1 - K_{тр}$	0,565	0,551	0,645
<i>Суммарные составляющие энергозатрат на трение лемеха и корпуса при коэффициенте трения $\varphi_{пл} = 0,25$</i>			
$E_{лем}^{\Sigma} + E_{деф}^{\Sigma}$	19785	20080	22345
$E_{деф}^{тр} + E_{лем}^{тр}$	5498	5807	22345
$K_{тр} = E_{лем}^{тр} + E_{деф}^{тр} / E_{лем}^{\Sigma} + E_{деф}^{\Sigma}$	0,277	0,289	0,215
$\eta_{тр} = 1 - K_{тр}$	0,773	0,721	0,785

Таким образом, КПД $\eta_{тр}$, учитывающий потери на трение, составляет:

– при коэффициенте трения $\varphi_{пл} = 0,50$ КПД, учитывающий потери на трение, корпуса ($b = 0,50$) $\eta_{тр} = 0,625$, а корпуса ($b = 0,35$) $\eta_{тр} = 0,565$;

– при коэффициенте трения $\varphi_{пл} = 0,25$ КПД, учитывающий потери на трение, корпуса ($b = 0,50$) $\eta_{тр} = 0,785$, а корпуса ($b = 0,35$) $\eta_{тр} = 0,773$.

5. Расчет КПД плуга. При расчете КПД плуга выделим силовые потери, связанные с учетом преодоления сил трения $\Delta P_{кр}$.

Энергозатраты, связанные с внедрением лемеха, подъемом отделенной части массива пласта, преодолением сил инерции, оборотом и деформацией пласта и т.д. будем считать полезными. Тяговое сопротивление $P_{кр}$ – это мера энергетических затрат на преодоление 1 м пути плугом,

$$P_{кр} = \frac{E}{S_p}$$

Помимо модуля каждая сила характеризуется точкой приложения и направлением. Выделим удельные энергозатраты, Дж/м³, связанные с преодолением сил трения рабочего органа, полевой доски и опорного колеса (табл. 5).

Полученные значения $P_{кр}$ – реальны для одного корпуса плуга. Соответственно, при коэффициенте трения $\varphi_{пл} = 0,5$ составляющую КПД плуга, учитывающую потери на трение, рассчитываем следующим образом:

$$\eta_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{кр}} - F_{\text{пл}}^{\text{тр}}}{P_{\text{кр}}}$$

Т а б л и ц а 5. Расчет составляющих силы тягового сопротивления плуга Н

Составляющие	Формула	Корпус		
		обычный		оборотный
		$a_1 = 0,20 \text{ м};$ $b_1 = 0,35 \text{ м}$	$a_2 = 0,22 \text{ м};$ $b_2 = 0,30 \text{ м}$	$a_3 = 0,20 \text{ м};$ $b_3 = 0,50 \text{ м}$
Сила сопротивления рабочего органа: сила тягового сопротивления $P_{\text{кр}}, \text{ Н}$	$\Delta P_{\text{кр}} = \frac{E_{\text{лем}}^{\Sigma} + E_{\text{деф}}^{\Sigma}}{S_p}$	1765/1388	1709/1325	2716/2235
боковая сила, действующая на полевую доску, H	$P_{\text{б}} = \frac{\Delta P_{\text{кр}}}{3}$	588/462	569/442	906/745
сила трения полевой доски, H	$F_{\text{д}} = \varphi_{\text{пл}} P_{\text{б}}$	294/231	285/221	453/373
Сумма		2647/2081	2564/1988	4075/3353
Сопротивление перекачиванию опорного колеса	$P_{\text{пл}} = f_{\text{пл}} K_{\text{пл}}^{\text{н}} G_{\text{пл}}$ $f_{\text{пл}} = 0,10$	220	170	770
Общее тяговое сопротивление	$P_{\text{кр}} = \Delta P_{\text{кр}} + F_{\text{д}} + P_{\text{пл}}$	2867/2301	2734/2158	4845/4123
Сила трения плуга, Н	$F_{\text{пл}}^{\text{тр}} = F_{\text{лем}}^{\text{тр}} + F_{\text{деф}}^{\text{тр}} + F_{\text{д}}^{\text{тр}}$	770/385	766/383	964/482
Разность сил трения, Н	$\Delta F_{\text{пл}}^{\text{тр}}$	385	383	482
Соотношение	$K_{\text{тр}} = F_{\text{пл}}^{\text{тр}} / P_{\text{кр}}$	0,268/0,167	0,28/0,177	0,236/0,117
КПД, учитывающий потери на трение	$\eta_{\text{тр}} = 1 - K_{\text{тр}}$	0,732/0,833	0,78/0,823	0,764/0,89
КПД приведенный, учитывающий снижение потерь на трение	$\eta_{\text{тр}}^{\text{пр}} = 1 - \frac{F_{\text{пл}}^{\text{тр}}}{P_{\text{кр}} + F_{\text{пл}}^{\text{тр}}}$	0,857	0,849	0,895

Если удастся путем нанесения покрытий на трущиеся детали корпуса уменьшить коэффициент трения металла плуга с почвой до $\varphi_{\text{пл}} = 0,25$, получим снижение силы трения $\Delta F_{\text{пл}}^{\text{тр}} = 0,385 - 0,482$ кН и приведенный КПД плуга, учитывающий потери на трение:

$$\eta_{\text{тр}}^{\text{пр}} = \frac{P_{\text{кр}} - F_{\text{пл}}^{\text{тр}}}{P_{\text{кр}} + F_{\text{пл}}^{\text{тр}}}$$

Приведенный КПД, учитывающий снижение потерь на трение плуга, достигает 0,850–0,895 вместо 0,732–0,764.

Выводы

1. Потери на трение с почвой деталей корпусов плуга достигают 0,355–0,435 от тягового сопротивления рабочего органа, а КПД, учитывающий потери на трение, – 0,732–0,764. Если бы за счет применения покрытий трущихся деталей плуга удалось снизить коэффициент трения до $\varphi_{\text{пл}} = 0,25$, то КПД плуга можно было бы увеличить до 0,85–0,89.

2. В структуре общих энергозатрат на трение доля потерь на трение деталей корпуса с почвой составляет: отвала – 41,1 %, лемеха – 29,5 %, полевой доски – 29,3 %.

3. Суммарные удельные энергозатраты широкого корпуса ($b = 0,50$ м) на оборот пласта почвы больше, а на трение, наоборот, меньше, чем у обычного ($b = 0,35$ м). Эти данные согласуются

с результатами экспериментальных исследований пахотных корпусов различной ширины, выполненных Ф. П. Цыгановым в 1965–1970 гг. в ЦНИИМЭСХ Нечерноземной зоны СССР. Экспериментальные исследования (более дорогостоящие) привязаны к агротехническим срокам и несут погрешности, связанные с нестабильностью характеристик почвы и изготовления орудия.

Литература

1. Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. / под ред. К. В. Фролова [и др.]. Т. 4–16: Сельскохозяйственные машины и оборудование / ред.-сост. И. П. Ксенович ; отв. ред. М. М. Фирсов. – Москва: Машиностроение, – 2002. – 720 с.
2. *Sousek, R.* Maschinen und Geräte Für Bodenbearbeitung, Düngung und Aussaat / R. Sousek, G. Pippig. – 1. Aufl. – Berlin : Verl. Technik, – 1990. – 432 s.
3. *Токушев, Ж. Е.* Аналитическое определение давления на почву клиновидного рабочего органа / Ж. Е. Токушев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2003. – №4. – С. 34–35.
4. *Сидоров, С. А.* Условия резания почвы лезвием с образующимся уплотненным ядром / С. А. Сидоров // Техника в сельском хозяйстве. – 2008. – № 5. – С. 8–11.
5. *Николаев, В. А.* Анализ затрат энергии на резание почвы носком и полевым обрезом лемеха плуга при вспашке / В. А. Николаев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2009. – № 11. – С. 22–25.
6. *Николаев, В. А.* Затраты энергии на оборот пласта почвы / В. А. Николаев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2010. – № 4. – С. 30–33.
7. *Ветохин, В. И.* О динамике формы поверхности рабочих органов почворыхлителей / В. И. Ветохин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2010. – № 6. – С. 30–35.

G. S. GORIN

CALCULATION OF ENERGY CONSUMPTION COMPONENTS UNDER PLOUGH TILLAGE

Summary

The article states the computational schemes and the results of energy consumption calculation connected with the movements of a plough in soil. Friction losses of plough details with soil and their connection with tribotechnical characteristics of friction surface are established.