

# Исследования вертикальной динамики трактора МТЗ-80 и трелевочного тягача на его базе

Канд. техн. наук А. В. ЖУКОВ,  
инж.-ры М. А. КУГЕЙКО,  
П. Ф. РУДНИЦКИЙ, В. А. СИМАНОВИЧ  
(Белорусский технологический ин-т, МТЗ)

При этих исследованиях использовали общую расчетную модель, описание которой приведено в работе [1]. Принятая расчетная схема вертикальных колебаний трактора с пачкой хлыстов, являющаяся ее частным случаем, показана на рис. 1.

Расчетная модель учитывает поддрессоривание переднего моста ( $C_1, K_1, P_{Тр1}$ ) трактора, вертикальную жесткость и демпфирование шин ( $C_{Ш1}, C_{Ш2}, K_{Ш1}, K_{Ш2}$ ), пачки деревьев ( $C_{Х}, K_{Х}$ ), кроны ( $C_{К}, K_{К}$ ), а также продольную жесткость и сопротивление продольным колебаниям тягача ( $C_4, C_5, K_4, K_5$  — характеристики, приведенные к точкам контакта колес с дорогой) и дерева ( $C_{ХК}, K_{ХК}$ ). Масса пачки деревьев распределена в соответствии с условиями, приведенными в работе [2], на три дискретные массы:  $M_2, M_3$  и, включающую массу кроны,  $M_4$  [1]. Поддрессоренная масса трактора обозначена  $M_1$ , массы переднего и заднего мостов  $m_1$  и  $m_2$ . Подвеска трактора принимается нелинейной, воздействие от неровностей дороги ( $q_1, q_2, q_4$ ) — случайным.

Математическая модель [1] составлена с учетом запаздывания воздействия на входы системы, возможности фиксирования отрывов колес от поверхности дороги и пробоев подвески переднего моста.

Динамическая система, соответствующая описанной расчетной модели, содержит шесть степеней свободы, характеризующихся следующими обобщенными координатами:  $z_1, \theta_1, \xi_1, x_1, z_3, z_4$  (см. рис. 1).

Дифференциальные уравнения, описывающие вертикальные и продольные колебания трактора с пачкой деревьев, имеют вид

$$Mz_1 + m_2(z_1 - l_2\theta_1) + M_2[\ddot{z}_1 - (l_2 + l_6)\ddot{\theta}_1] = (F_{СП1} + F_{КП1} + F_{Тр1}) + (F_{Ш2} + F_{КШ2}) - (F_{СХ} + F_{КХ}); \quad (1)$$

$$J_1\ddot{\theta}_1 - l_2m_2(\ddot{z}_1 - l_2\ddot{\theta}_1) - (l_2 + l_6)M_2[\ddot{z}_1 - (l_2 + l_6)\ddot{\theta}_1] + h_1m_1(\ddot{x}_1 + h_1\ddot{\theta}_1) + h_2m_2(\ddot{x}_1 + h_2\ddot{\theta}_1) - h_4M_2(\ddot{x}_1 - h_4\ddot{\theta}_1) = l_1(F_{СП1} + F_{КП1} + F_{Тр1}) - l_2(F_{Ш2} + F_{КШ2}) + \frac{(l_4 - l_6)l_5}{l_4 + l_5 - l_6} \times (F_{СХ} + F_{КХ}) - h_1(F_{С4} + F_{К4}) - h_2(F_{С5} + F_{К5}) + h_4(F_{С6} + F_{К6}); \quad (2)$$

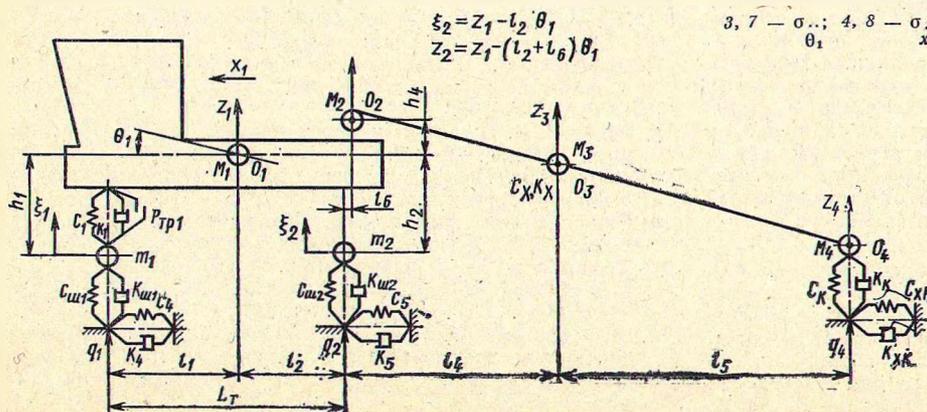
$$m_1\ddot{\xi}_1 = -(F_{СП1} + F_{КП1} + F_{Тр1}) + (F_{Ш1} + F_{КШ1}); \quad (3)$$

$$M_3\ddot{z}_3 = F_{СХ} + F_{КХ}; \quad (4)$$

$$M_4\ddot{z}_4 = (F_{К} + F_{КК}) - \frac{l_4 - l_6}{l_2 + l_5 - l_6} (F_{СХ} + F_{КХ}); \quad (5)$$

$$(M_1 + M_2 + M_3 + M_4)\ddot{x}_1 + m_1(\ddot{x}_1 + h_1\ddot{\theta}_1) + m_2 \times (\ddot{x}_1 + h_2\ddot{\theta}_1) + M_2(\ddot{x}_1 - h_4\ddot{\theta}_1) = -(F_{С4} + F_{К4}) - (F_{С5} + F_{К5}) - (F_{С6} + F_{К6}); \quad (6)$$

РИС. 1. Расчетная схема, эквивалентная колебаниям трелевочного трактора в продольной вертикальной плоскости



где  $F_{СП1}, F_{КП1}, F_{Тр1}$  — вертикальная упругая сила, сила вязкого сопротивления и сухого трения в подвеске переднего моста трактора;  $F_{Ш1}, F_{Ш2}, F_{КШ1}, F_{КШ2}$  — упругие вертикальные силы и вертикальные силы сопротивлений шин соответственно переднего и заднего моста трактора;  $F_{СП1}, F_{Ш2}, F_{КШ1}, F_{КШ2}$  — упругие силы и силы сопротивлений, возникающие при изгибных деформациях соответственно пачки деревьев и их кроны;  $F_{С4}, F_{С5}, F_{С6}, F_{К4}, F_{К5}, F_{К6}$  — упругие продольные силы и продольные силы сопротивлений в точках контакта соответственно колес передней, задней осей и кроны с грунтом.

Математическая модель колебаний трактора МТЗ-80 или трелевочного трактора без пачки хлыстов получается как частный случай общей модели при следующих условиях:

$$z_3 = 0, z_4 = 0, M_2 = 0, M_3 = 0, M_4 = 0.$$

Приведенные при описании математической модели неупругие и демпфирующие силы в общем случае являются нелинейными; при решении задачи они задавались таблично (10—11 точек) по данным проведенных на МТЗ лабораторных измерений.

Задачу решали на ЭВМ «ЕС-1020» методом Рунге-Кутты (шаг счета 0,2 с). Микропрофиль задавали точками с определенным шагом, промежуточные точки определяли с помощью формулы Ньютона.

На печать выдавались процессы по экстремумам, максимальные, минимальные и среднеквадратичные значения перемещений и ускорений элементов системы, фиксировалось также количество пробоев подвески и отрывы колес от поверхности дороги.

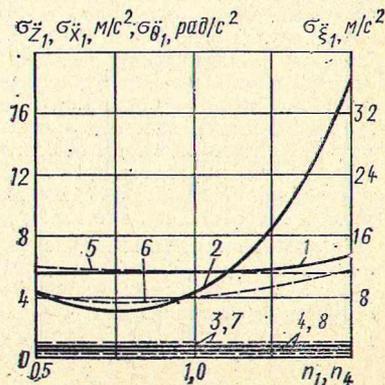
Движение трактора МТЗ-80 моделировалось по полю попереk борозд предыдущей пахоты ( $v = 2 \div 10$  км/ч), по грунтовой дороге ( $v = 5 \div 25$  км/ч), а также по асфальтобетонному шоссе ( $v = 15 \div 30$  км/ч), трелевочного трактора — по грунтовой дороге и песчаному волоку.

Варьировались скорости движения, а также варианты подвески. Варианты подвески образовывались умножением ординат упругих и амортизационных характеристик на коэффициенты  $n_1$  и  $n_4$ . Значения  $n_1$  и  $n_4$ , равные 1, соответствуют исходному варианту подвески трактора (исходный вариант — трактор серийного исполнения с гидроамортизаторами —  $2K_{Д1} = 240$  кгс·с/м).

Из рис. 2 видно, что при изменении упругой и демпфирующей характеристик переднего моста наиболее сильно изменяется характер зависимостей  $\sigma_{\xi_1} = f(n_1); \sigma_{\xi_1} = f(n_4)$  (кривые 2, 6). Значения  $\sigma_{\xi_1}$  (кривая 2) наиболее интенсивно возрастают при  $n_1 > 0,75$ . При  $n_1 = n_4 = 0,75$ , минимальные значения функций  $\sigma_{\xi_1} = f(n_1)$  и  $\sigma_{\xi_1} = f(n_4)$  равны соответственно 6,7 и 6 м/с<sup>2</sup>. При  $n_1 = 1,5$   $\sigma_{\xi_1}$  (кривая 2) увеличивается в 6 раз.

Значения  $\sigma_{z_1}, \sigma_{\theta_1}$  и  $\sigma_{x_1}$  при увеличении  $n_1$  также имеют

РИС. 2. Зависимости среднеквадратичных значений ускорений трактора МТЗ-80 от жесткости подвески (1—4) и вязкого сопротивления (5—8) переднего моста (поле,  $v = 10$  км/ч): 1, 5 —  $\sigma_{z_1}$ ; 2, 6 —  $\sigma_{\xi_1}$ ; 3, 7 —  $\sigma_{\theta_1}$ ; 4, 8 —  $\sigma_{x_1}$



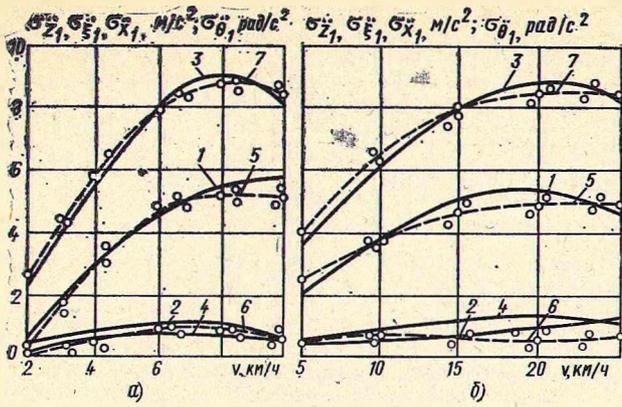


РИС. 3. Зависимости среднеквадратичных значений ускорений трактора МТЗ-80 от скорости при движении по грунтовой дороге (а) и полю (б): 1, 5 —  $\sigma_{z_1}$ ; 2, 6 —  $\sigma_{\xi_1}$ ; 3, 7 —  $\sigma_{\theta_1}$ ; 4 —  $\sigma_{x_1}$ ; — расчет, - - - эксперимент

тенденцию к увеличению. Значение  $\sigma_{z_1}$  при изменении  $n_1$  от 0,5 до 1,5 увеличилось с 5,6 до 6,7 м/с<sup>2</sup>, т. е. на 16,4%.

Аналогично, но более явно изменяются в зависимости от  $n_1$  и  $n_4$  максимальные и минимальные значения параметров колебаний трактора. При изменении  $\eta_1$  от 0,5 до 1,5  $\xi_{1max}$  возрастает от 24 до 54 м/с<sup>2</sup>,  $z_{1max}$  — от 12,6 до 18,5 м/с<sup>2</sup>, т. е. соответственно на 55,6 и 33%. Значения  $z_{1max}$  при увеличении  $n_4$  снижаются.

Представляют интерес данные, характеризующие динамику системы при изменении скоростей движения. При движении по полю (рис. 3, а) кривые, характеризующие изменение параметров колебаний, имеют максимумы, проявляющиеся при скоростях движения 6—8 км/ч, кроме кривой  $\sigma_{z_1} = f(v)$ ,

у которой максимум сдвинут за скорость 10 км/ч. При движении по грунтовой дороге (рис. 3, б) характерный максимум кривых 1—4 проявляется при  $v=20$  км/ч. Указанные скорости движения для рассматриваемых дорожных условий являются резонансными.

Наибольшее влияние изменение скорости на обоих фонах оказывает на ускорения  $\xi_1$  и  $z_1$ ; параметры  $\theta_1$  и  $x_1$  от скорости движения зависят незначительно.

Исследования показали, что общий уровень динамической нагруженности трактора по статистическим показателям выше при движении по полю, а по максимальным — по грунтовой дороге.

Для грунтовой дороги возможны единичные ускорения  $z_1$  и  $\xi_1$ , достигающие до 18,5 и 48 м/с<sup>2</sup> соответственно.

При движении по асфальтобетону со скоростью 30 км/ч как среднеквадратичные, так и максимальные значения параметров колебаний трактора значительно меньше, чем при движении по полю и грунтовой дороге (см. ниже). Максимальные значения  $z_{1max}$  и  $\xi_{1max}$  при скорости 30 км/ч составляют соответственно 4,897 и 6,929 м/с<sup>2</sup>.

	$x_1 \neq 0$	$x_1 = 0$	
$\sigma_{z_1}$ , м/с <sup>2</sup>	1,26	1,193	(5,32)
$z_1$ , м/с <sup>2</sup>			
$z_1 max$ , м/с <sup>2</sup>	4,897	4,899	(0,04)
$z_1 min$ , м/с <sup>2</sup>	3,681	3,774	(2,53)
$\sigma_{\xi_1}$ , рад/с <sup>2</sup>	0,614	0,636	(3,61)
$\theta_1$ , рад/с <sup>2</sup>			
$\theta_1 max$ , рад/с <sup>2</sup>	1,429	1,512	(5,8)
$\theta_1 min$ , рад/с <sup>2</sup>	1,182	1,212	(2,54)
$\sigma_{x_1}$ , м/с <sup>2</sup>	1,85	1,82	(1,62)
$\xi_1$ , м/с <sup>2</sup>			
$\xi_1 max$ , м/с <sup>2</sup>	6,929	7,314	(5,55)
$\xi_1 min$ , м/с <sup>2</sup>	6,904	6,266	(9,24)
$\sigma_{x_1}$ , м/с <sup>2</sup>	0,361		
$x_1$ , м/с <sup>2</sup>			
$x_1 max$ , м/с <sup>2</sup>	0,758		
$x_1 min$ , м/с <sup>2</sup>	0,857		

Примечание. В скобках дано расхождение, %

Из сравнения приведенных данных видно, что продольные силы на параметры колебаний трактора влияют неодинаково.

Различие между значениями  $\sigma_{z_1}$ ,  $\sigma_{\xi_1}$  и  $\sigma_{\theta_1}$  составило соответственно 5,32; 3,61 и 1,62%.

На менее совершенных типах покрытий связь между вертикальными и продольно-горизонтальными колебаниями больше.

Движение трелевочного трактора на базе МТЗ-80 моделировалось по пасечному волоку в диапазоне скоростей от 3 до 10 км/ч. Среднеквадратичные значения ускорений системы по мере увеличения скорости движения возрастают до  $v=9$  км/ч. При  $v > 9$  км/ч наблюдается спад ускорений  $\sigma_{z_1}$ ,  $\sigma_{\xi_1}$ ,  $\sigma_{\theta_1}$  (рис. 4). Для кривых  $\sigma_{z_1}$  и  $\sigma_{\xi_1}$  максимум сдвигается за  $v > 10$  км/ч. Сравнение кривых на рис. 3 и 4 показывает, что изменение скорости движения влияет больше на параметры  $\theta_1$  и  $x_1$  у трелевочного трактора, чем у МТЗ-80.

Наибольшие вертикальные ускорения у трелевочного трактора при скоростях выше 4,5 км/ч имеет передний мост. Максимальные значения вертикальных ускорений поддресорной массы достигают значения 8,8 м/с<sup>2</sup>. Сравнительный анализ динамики тракторов МТЗ-80 и трелевочного трактора показал, что в рассматриваемом диапазоне скоростей наибольшие значения ускорений  $\xi_1$  и  $\sigma_{z_1}$  наблюдаются у трактора МТЗ-80 при движении его по полю и по грунтовой дороге. Как уже указывалось, при движении трактора по асфальтобетонной дороге динамическая нагруженность трактора МТЗ-80 при скорости до 30 км/ч значительно ниже, чем на поле и грунтовой дороге при меньших скоростях движения.

Минимальные значения вертикальных ускорений трелевочного трактора по абсолютной величине при различных значениях коэффициента  $n_1$  выше, чем максимальные, по-видимому, из-за наличия пачки хлыстов, значительно загружающей заднюю часть трактора и особым образом усложняющей процесс колебаний всей системы.

С изменением скорости движения характер кривых изменяется. Если при  $v=3$  км/ч ускорения  $\xi_{1min}$  во всем диапазоне изменения  $n_1$  растут, то при  $v=6; 8; 10$  км/ч кривая  $\xi_{1min} = f(n_1)$  имеет точку перегиба с наименьшим значением  $\xi_{1min}$ . При  $v=6$  км/ч эта точка соответствует значению  $n_1=0,9$ ; при 8 км/ч — 0,72; при 10 км/ч — 1. Величины  $\sigma_{z_1}$  и  $\sigma_{\xi_1}$  при увеличении скорости движения растут при любых значениях  $n_1$  (рис. 5), причем при  $v=6; 8; 10$  км/ч интенсивность возрастания кривых 2, 3, 4 примерно одинакова. При  $v=3$  км/ч значения  $\sigma_{z_1}$  неизменны при изменении  $n_1$  от 0,5

до 1,5. У трелевочного трактора вертикальные ускорения  $z_1$  с увеличением жесткости подвески растут более заметно, чем у трактора МТЗ-80. Влияние коэффициента  $n_1$  на показатели продольно-угловых и продольно-горизонтальных колебаний у трелевочного трактора слабее, чем у МТЗ-80.

Для оценки достоверности разработанной и примененной при исследованиях расчетной модели сравнили расчетно-теоретические данные с экспериментальными. Экспериментальные заезды с различными скоростями производили на

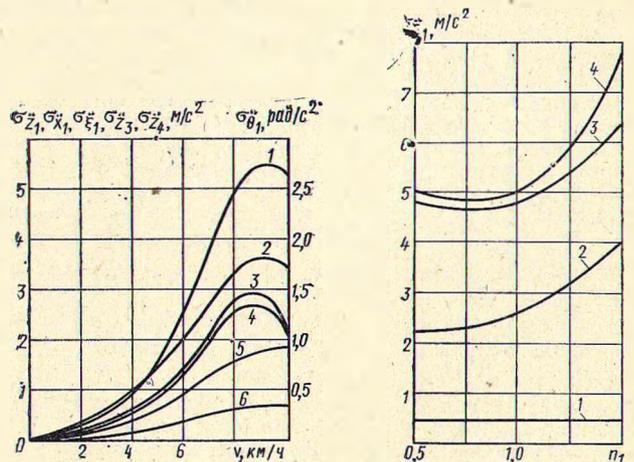


РИС. 4. Зависимости среднеквадратичных значений ускорений трактора МТЗ-80Л от скорости движения (пасечный волок,  $n_1=n_4=1$ ): 1 —  $\sigma_{z_1}$ ; 2 —  $\sigma_{\xi_1}$ ; 3 —  $\sigma_{\theta_1}$ ; 4 —  $\sigma_{x_1}$ ; 5 —  $\sigma_{z_1}$ ; 6 —  $\sigma_{\xi_1}$

РИС. 5. Зависимости  $\sigma_{z_1}$  от коэффициента  $n_1$  при движении трактора МТЗ-80 по пасечному волоку: 1 —  $v=3$  км/ч; 2 — 6; 3 — 8; 4 — 10 км/ч

участках асфальтобетонного шоссе, грунтовых дорогах и полю. Ускорения и угловые перемещения в характерных точках остова трактора измеряли с помощью потенциометрических датчиков МП-21Т и центральной гирвертикали ЦГВ-2. Результаты замеров регистрировались на диаграммной бумаге пятиканального быстродействующего самопишущего прибора НЗ27-5, установленного в подвижной лаборатории. Записывались также скорости движения трактора и проходимый путь.

Приведенные на рис. 3, а, б и в таблице экспериментальные и расчетные значения среднеквадратичных вертикальных и продольно-угловых ускорений корпуса и вертикальных ускорений переднего моста трактора МТЗ-80 указывают на их хорошую сходимость при различных дорожных условиях и скоростях движения: расхождение среднеквадратичных значений ускорений при рабочих скоростях движения не превышало 5—15%.

Как видно из таблицы, при движении трактора МТЗ-80 по асфальтобетонному шоссе со скоростью 15 км/ч расхождение экспериментальных и расчетных значений среднеквадратичных ускорений составляет 1,68—14,58%, со скоростью 30 км/ч — 3,24—15,31%. В отдельных случаях имели место несколько большие отклонения, однако при моделировании сложных многофакторных процессов это неизбежно, если иметь в виду принимаемые допущения и погрешности экспериментальных замеров.

Таким образом, разработанная и проверенная экспериментально расчетная модель может быть использована для оценки вертикальных и продольно-горизонтальных колебаний

Данные	$v$ , км/ч	$\sigma_{z_1}$ , м/с <sup>2</sup>	$\sigma_{\epsilon_1}$ , м/с <sup>2</sup>	$\sigma_{\theta_1}$ , рад/с <sup>2</sup>
Расчетные	15	1,19	1,78	0,48
	30	1,26	1,85	0,614
Экспериментальные	15	1,13—1,17	1,54—1,61	0,41—0,44
	30	1,39—1,34	1,91—1,98	0,52—0,56
Расхождение, %	15	5,04—1,68	13,48—9,55	14,58—8,33
	30	10,32—6,35	3,24—7,03	15,31—8,79

колесных с.-х. и лесных тракторов, оценки важных весовых и размерных параметров, а также выбора параметров подвески и шин.

Проведенный для трактора МТЗ-80 и трелевочного тягача на его базе анализ показал, что имеется возможность улучшения показателей вертикальной динамики этих машин за счет снижения жесткости подвески переднего моста до 0,7—0,85 от жесткости серийной подвески и введения в подвеску гидроамортизаторов с коэффициентом сопротивления 170—200 кгс.с/м.

#### Список литературы

1. Жуков А. В., Чернявский И. Ш., Рудницкий П. Ф. Исследование вертикальной динамики трелевочного трактора Т-157 с помощью ЭЦВМ. — «Лесной журнал», 1976, № 5.
2. Гастев Б. Г., Мельников В. И. Основы динамики лесовозного подвижного состава. М., «Лесная промышленность», 1967.

УДК 631.312.021.3-192

## Влияние износа плужных лемехов на тяговое сопротивление

Канд. техн. наук В. Н. ВИНУКОВ  
(МЛТИ)

Работа почвообрабатывающих машин и орудий сопровождается изменением геометрических параметров режущих элементов [1], что сказывается на энергетических показателях машин и орудий и качестве выполняемых ими работ. Влияние износа режущих элементов на тяговое сопротивление почвообрабатывающих машин и орудий изучалось и ранее. Но при этом не были вскрыты причины, вызывающие изменение тягового сопротивления при износе лемехов и культиваторных лап, а также степень этого изменения в различных условиях работы орудий. В задачу наших исследований входило выяснение общей закономерности изменения удельного сопротивления плугов при изнашивании их рабочих органов.

Известно, что при изнашивании лемехов изменяется геометрия лезвия, уменьшается длина носовой части, ширина остова и общая длина лемеха. В процессе изменения геометрии лезвия постепенно срабатывается фаска на лицевой стороне лемеха, образованная заточкой, а на тыльной стороне его появляется площадка износа (затылочная фаска). При работе корпуса плуга с новым лемехом его носок, обеспечивая забор глубины, прорезает на дне борозды канавку глубиной до 10 мм. На образование такой канавки затрачивается дополнительная работа, которая при равном значении пройденного пути выразится в повышении тягового сопротивления.

Для оценки дополнительного сопротивления носовой части нового лемеха от реакции почвы рассмотрим силы, действующие на носок. Разделим условно лемех на две части: носок и остов. Допускаем, что при уменьшении размеров носовой части остова лемеха не меняет геометрических размеров и, следовательно, не влияет на изменение тягового сопротивления. При установившемся режиме пахоты сила тяги  $P'_x$ , затрачиваемая на продвижение носовой части лемеха, будет уравниваться равнодействующей сил реакции почвы  $R'_x$ , которая равна сумме проекций нормальных и касательных сил на направление перемещения лемеха [2]:

$$R'_x = F \cos \epsilon + N \sin \epsilon, \quad (1)$$

где  $F$  и  $N$  — равнодействующие сил трения и нормального давления;  $\epsilon$  — угол установки лемеха к горизонту.

Равнодействующие  $F$  и  $N$  определим по формулам

$$F = \int_S \tau_1 dS, \quad (2)$$

$$N = \int_S \sigma_1 dS, \quad (3)$$

где  $\tau_1$  — тангенциальные контактные напряжения;  $dS$  — площадь элементарной площадки на поверхности носка лемеха;  $\sigma_1$  — нормальные контактные напряжения.

Тангенциальные напряжения могут быть выражены через нормальные контактные напряжения (3)

$$\tau_1 = \tau_0 + \sigma_1 \operatorname{tg} \varphi \quad \text{или} \quad \tau_1 = \tau_0 + f \sigma, \quad (4)$$

где  $\tau_0$  — коэффициент, учитывающий удельную силу сцепления почв;  $\varphi$  — угол трения;  $f$  — коэффициент трения почвы о сталь.

По мере продвижения почвенного пласта по носовой поверхности лемеха вследствие ослабления связей между частицами почвы снижаются нормальные контактные напряжения на его поверхности. Зависимость нормальных контактных напряжений  $\sigma$  от пути трения  $l$  почвы по поверхности лемеха может быть представлена выражением

$$\sigma_1 = \sigma_0 + bl,$$

где  $\sigma_0$  — значение нормальных контактных напряжений на поверхности носка лемеха в месте стыка его с отвалом;  $b$  — коэффициент, характеризующий степень повышения нормальных контактных напряжений по мере увеличения длины носовой части лемеха. Подставив значение  $\tau_1$  из уравнения (4) в уравнение (2) и заменив величины  $F$  и  $N$  в уравнении (1) их значениями, взятыми из уравнения (2) и (3), запишем

$$R'_x = \cos \epsilon \int_0^S (\tau_0 + f \sigma_1) dS + \sin \epsilon \int_0^S \sigma_1 dS = \cos \epsilon \int_0^l [(\tau_0 + f(\sigma_0 + bl)] Z dl + \sin \epsilon \int_0^l (\sigma_0 + bl) Z dl, \quad (5)$$

где  $dS = Z dl$  ( $Z$  — ширина носовой части лемеха).

Решение уравнения (5) имеет вид

$$R'_x = \left[ \tau_0 \cos \epsilon + \frac{(2\sigma_0 + bl)(f \cos \epsilon + \sin \epsilon)}{2} \right] Zl.$$

Следовательно, равнодействующая сил реакции почвы зависит от длины носовой части. С уменьшением длины  $l$  сопротивление почвы снижается. Аналогичным образом можно показать, что и с уменьшением ширины остова лемеха сопротивление движению его в почве снижается.

Рассмотрим влияние угла заточки лезвия лемеха на тяговое сопротивление. Выпускаемые заводами лемехи для плугов общего назначения имеют угол заточки 25—40°. С учетом угла установки лемеха к дну борозды суммарный угол наклона заточной фаски к горизонту составляет 55—70°.