

УДК 629.3.015

## ИССЛЕДОВАНИЕ УВОДА ГУСЕНИЧНОГО ПАХОТНОГО ТРАКТОРА

**И.П. Трояновская**, докт. техн. наук, проф.

*Челябинская государственная агроинженерная академия*

*Наведено математичну модель бічного відведення гусеничного трактора під дією нецентрально прикладеного гакового зусилля. Вона являє собою систему, яка включає два рівняння руху на основі одновимірного криволінійного інтеграла і три алгебраїчні рівняння, що описують рівновагу граничного тертя. Адекватність моделі підтверджена натурними експериментами на прикладі трактора Т-10 виробництва Челябінського тракторного заводу.*

**Ключові слова:** *просапний трактор, відведення, зсув, зрушування, нецентрально гакове навантаження.*

**Актуальность.** При пахоте, как наиболее энергозатратной операции, большие усилия сопротивления на плуге часто приводят к самопроизвольному уводу (отклонению) трактора от прямолинейной траектории. Это приводит к тому, что тракторист вынужден через каждые 30 метров дистанции корректировать (выравнивать) движение машины.

Теоретические исследования явления увода могут позволить определить причину и наметить дальнейшие пути его устранения. Наличие адекватной математической модели, позволяющей построить реальную траекторию движения с учетом отклонения от прямолинейного курса, позволит выработать в дальнейшем мероприятия по компенсационному управлению. Такие мероприятия могут быть предусмотрены уже на стадии проектирования трансмиссии.

**Цель** — разработка адекватной математической модели увода пахотного гусеничного трактора под действием внешней внецентренной нагрузки на крюке.

**Математическая модель увода.** Для моделирования рассмотрим гусеничную модификацию сельскохозяйственного трактора, как наиболее часто используемую при операции вспашки. В этом случае пахотный агрегат с плугом представляет собой трактор с внецентренно приложенной крюковой нагрузкой (рис.1).

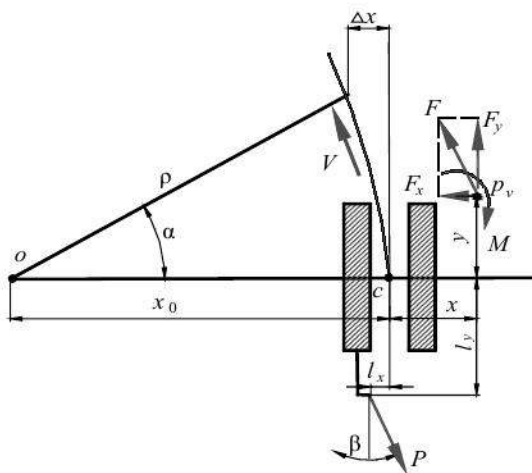


Рис. 1. Схема увода гусеничного трактора

Увод представляє собою сукупність прямолинійного руху під управлінням водія і миттєво вращательний сдвиг машини під дією зовнішнього кривокуткового зусилля [1].

Особливістю сільськогосподарського трактора руху є мала, майже постійна робоча швидкість при пахоті. Тоді рівняння криволінійного руху центра мас трактора можна записати в формі рівнянь [2]:

$$x_c = \int_0^{t_k} V_x dt, \quad y_c = \int_0^{t_k} V_y dt, \quad (1)$$

де  $t$ ,  $t_k$  — теперішнє і кінцеве час процесу,  $V_x = V \sin \alpha$ ,  $V_y = V \cos \alpha$  — проекції швидкості центра мас на нерухомі осі координат.

Ураховуючи, що диференціал дуги  $dS = V dt$  можна записати через радіус кривизни  $\rho$  і теперішній кут  $\alpha$ :  $dS = \rho d\alpha$  [3], то рівняння траєкторії руху (1) набувають вигляду:

$$x_c = \int_0^{t_k} V \sin \left( \int_0^t \frac{V}{\rho} d\tau \right) dt, \quad y_c = \int_0^{t_k} V \cos \left( \int_0^t \frac{V}{\rho} d\tau \right) dt. \quad (2)$$

В рівняннях (2) входить невідомий радіус кривизни  $\rho$ , значення якого повністю визначається зовнішніми силами, викликаючими увод трактора. При

малых скоростях и отсутствии сил инерции, крюковая сила и реакции со стороны грунта можно считать уравновешенной системой сил. Условия равновесия имеют вид [4]:

$$\left. \begin{aligned} \sum X : P \sin \beta - F_x &= 0, \\ \sum Y : -P \cos \beta + F_y &= 0, \\ \sum M_c : l_y P \sin \beta + l_x P \cos \beta + x F_y + y F_x - M &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $P$  — внешняя крюковая нагрузка на плуге,  $\beta$  — угол между крюковой нагрузкой и продольной осью трактора,  $l_x, l_y$  — плечи составляющих крюковой силы  $P$  относительно центра масс,  $F_x, F_y$  — проекции результирующей реакции со стороны грунта на продольную и поперечную ось трактора,  $M$  — результирующий момент трения в контакте гусениц с грунтом (момент сопротивления повороту).

Согласно математической теории трения Ф.А. Опейко [5] при мгновенно вращательном сдвиге силовые факторы в контакте являются функциями координат мгновенному центру сдвига (точка  $P_v$ ). При приведении их к этому центру они имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= q\varphi \iint_{\eta\xi} \frac{y-\eta}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} d\xi d\eta, \\ F_y &= q\varphi \iint_{\eta\xi} \frac{x-\xi}{\sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2}} d\xi d\eta, \\ M &= q\varphi \iint_{\eta\xi} \sqrt{(y-\eta)^2 + (x-\xi)^2} d\xi d\eta, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $x, y$  — координаты мгновенного центра сдвига относительно центра масс,  $\xi, \eta$  — текущие координаты точек контакта гусениц с грунтом,  $q = G / 2Lb$  — нормальное давление в контакте гусеницы с грунтом,  $G, L, b$  — вес трактора, база и ширина гусеницы,  $\varphi$  — удельная касательная сила (переменный коэффициент трения), зависящая от смещения  $s$  в точке контакта (рис.2).

Особенностью увода являются малые (измеряемые миллиметрами) боковые смещения  $s$  точек гусеницы, следовательно, боковая деформация грунта находится в упругой области. Это позволяет воспользоваться следующей

упрощенной формулой зависимости коэффициента трения, где скольжение выражено через координаты мгновенного центра страгивания и радиус кривизны траектории [6]:

$$\varphi = \varphi_{\max} th \left( \frac{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}}{\lambda(\rho+x)} \right), \quad (5)$$

где  $\varphi_{\max}$  — коэффициент сцепления гусеницы с грунтом,  $th$  — гиперболический тангенс,  $\rho$  — радиус кривизны траектории,  $\lambda$  — эмпирический коэффициент, характеризующий упругие свойства грунта.

В результате математическая модель увода представляет собой смешанную систему [7], состоящую из двух дифференциальных (2) и трех алгебраических (3) уравнений, куда входят силовые факторы (4) с учетом переменного коэффициента трения (5).

**Экспериментальные исследования** [7]. Адекватность предложенной математической модели проверялась натурным экспериментом на примере трактора Т-10 производства ЧТЗ. В качестве крюковой нагрузки использовалась опытная самоходная лаборатория, способная создавать различное сопротивление (рис.3).

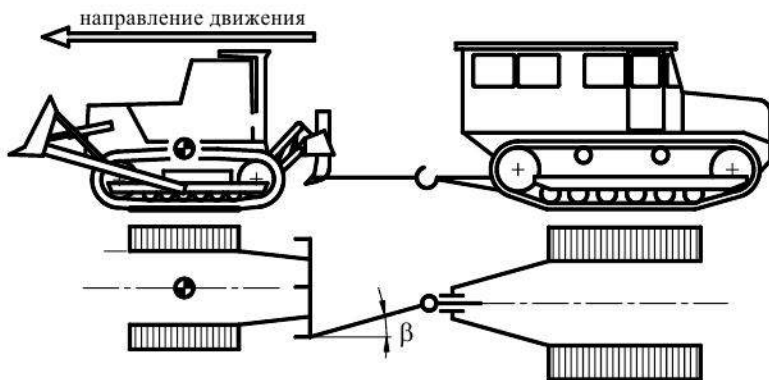


Рис. 3. Схема эксперимента по уводу трактора

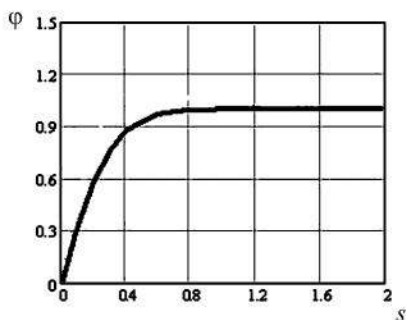


Рис. 2. Зависимость удельной касательной силы  $\varphi$  от смещения  $s$

Опыты проводились на предварительно размеченной дороге при постоянной скорости движения. Трактор двигался прямолинейно (при неизменных управляющих параметрах). Через каждые десять метров пути производился замер бокового отклонения  $\Delta x$  от намеченного прямолинейного направления без остановки движения. Было проведено шесть опытов. В двух из них отклонение отсутствовало, так как сдвигающая сила была меньше предельного значения. В четырех других увод имел место (табл.1). В процессе опытов замерялось внешнее крюковое усилие  $P$  (табл.2)

**Таблица 1.** Экспериментальные значения бокового отклонения  $\Delta x$  (м) на 50 м пути

путь S	опыт 1	опыт 2	опыт 3	опыт 4
0м	0	0	0	0
10м	0,35	0,1	0,2	0,6
20м	0,85	0,43	0,6	1,8
30м	2,25	0,94	1,4	4,55

**Таблица 2.** Экспериментальные значения крюковой силы  $P$ , бокового увода  $\Delta x$  на пути  $S$  за время  $t$

t, сек	опыт 1			опыт 2			опыт 3			опыт 4		
	V=0,25м/с			V=0,455м/с			V=0,42м/с			V=0,32м/с		
	S (м)	P (кН)	$\beta$ (град)	S (м)	P (кН)	$\beta$ (град)	S (м)	P (кН)	$\beta$ (град)	S (м)	P (кН)	$\beta$ (град)
0	0	94,5	-3	0	50,0	0	0	58,2	4,9	0	106,0	5,5
10	2,5	91,4	-1,5	4,6	48,8	0,65	4,2	56,7	4,98	3,2	105,32	5,68
20	5,0	88,2	0	9,1	47,6	1,29	8,4	55,2	5,07	6,4	104,64	5,86
30	7,5	85,1	1,5	13,7	46,4	1,94	12,9	53,8	5,15	9,6	103,95	6,05
40	10,0	81,9	3	18,2	45,2	2,58	16,8	52,3	5,23	12,8	103,27	6,23
50	12,5	78,8	4,5	22,8	44,0	3,23	21,0	50,8	5,32	16,0	102,59	6,41
60	15,0	75,6	6	27,3	42,8	3,87	25,2	49,3	5,4	19,2	101,91	6,59
70	17,5	72,5	7,5	31,85	41,6	4,52	29,4	47,8	5,48	22,4	101,23	6,77
80	20,0	69,3	9	36,4	40,4	5,16	33,6	46,4	5,57	25,6	100,55	6,95
90	22,5	66,2	10,5	41,0	39,2	5,81	37,8	44,9	5,65	28,8	99,86	7,14
100	25,0	63,0	12	45,5	38,0	6,45	42,0	43,4	5,73	32,0	99,18	7,32
110	---	---	---	50,1	36,8	7,1	46,2	41,9	5,82	35,2	98,5	7,5
120	---	---	---	---	---	---	50,4	40,4	5,9	---	---	---

Значение усилия (модуль) записывался на осциллограмму, а направление каната определялось по замеренному углу  $\beta$  (рис. 3).

**Оценка адекватности модели.** Адекватность модели увода гусеничного трактора под действием внецентренно приложенной нагрузки проверялась путем сравнения экспериментальных и расчетных траекторий движения (рис. 4).

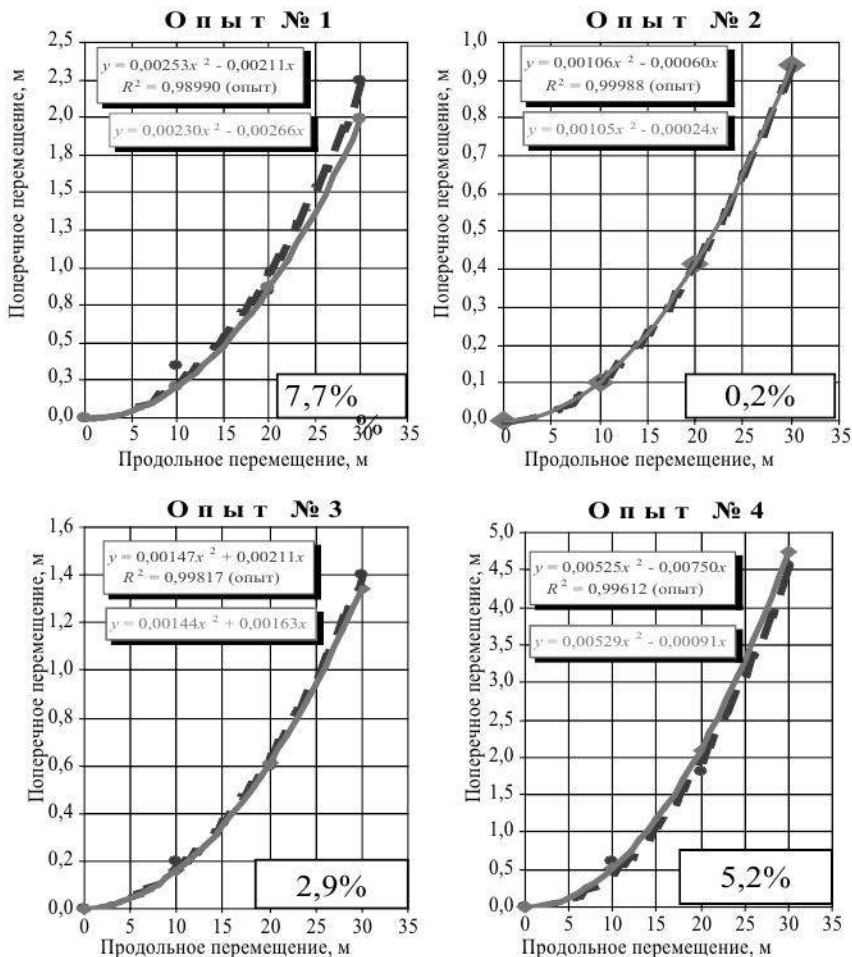


Рис. 4. Траектории увода

Из шести проведенных опытов увод наблюдался всего в четырех случаях. Это объясняется тем, что в двух других сдвигающая сила еще не достигла своего предельного по трению значения. Для четырех опытов увода зависимость радиуса поворота от времени  $\rho(t)$  аппроксимировалась полиномом второго порядка с коэффициентом Пирсона не менее  $R^2 = 0,98$ .

Отклонения экспериментальных значений бокового увода  $Dx$  от расчетных траекторий на длине пути  $S=30$  м не превысило 7,7 %, что соответствует хорошей сходимости экспериментальных и теоретических результатов и подтверждает адекватность составленной модели.

### **Бібліографія**

1. *Апанасик В.Г.* Пассивный поворот гусеничной машины (задача страгивания) / В.Г. Апанасик, Б.М. Позин, И.П. Трояновская / Материалы XLIII научно-технической конференции ЧГАУ «Достижение науки агропромышленному комплексу». — Челябинск: ЧГАУ, 2004. — Ч. 2. — С. 204-208.
2. *Позин Б.М.* Задачи пассивного поворота гусеничной машины (постановка, модель движения) / Б.М. Позин, И.П. Трояновская, В.Г. Апанасик / Вестник ЮурГУ, серия Машиностроение, вып. №10. № 25(97). Челябинск: ЮУрГУ, 2007. — С.70-74.
3. *Бронштейн И.Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. — М.-Л.: ОГИЗ, 1948. — 556 с.
4. *Тарг С.М.* Краткий курс теоретической механики / С.М. Тарг. — М.: Наука, 1973. — 480 с.
5. *Опейко Ф.А.* Математическая теория трения / Ф.А. Опейко. — Минск: АСН БССР, 1971. — 149 с.
6. *Трояновская И.П.* Силовое взаимодействие гусеничного движителя с грунтом на повороте / И.П. Трояновская / Тракторы и сельскохозяйственные машины, 2007. — Вып. № 12. — С.19-20.
7. *Трояновская И.П.* Методология моделирования криволинейного движения тракторных агрегатов / И.П. Трояновская / дис. ... докт. техн. наук: Челябинск: ЮУрГУ, 2011. — 293 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ УВОДА ГУСЕНИЧНОГО ПАХОТНОГО ТРАКТОРА**

*Приведена математическая модель бокового увода гусеничного трактора под воздействием нецентрально приложенного крюкового усилия. Она представляет собой систему, которая включает два уравнения движения на основе одномерного криволинейного интеграла и три алгебраические уравнения, описывающие равновесие граничного трения. Адекватность модели подтверждена натурными экспериментами на примере трактора Т-10 производства Челябинского тракторного завода.*

**Ключевые слова:** пахотный трактор, увод, сдвиг, страгивание, внецентренная крюковая загрузка.

**RESEARCH OF A DEVIATION OF A TRACTOR FROM RECTILINEAR MOVEMENT**

*In clause there is a mathematical model of a deviation of a catarpillar from rectilinear movement under action of effort on a hook.. It represents system which includes two equations of movement on the basis of one-dimensional curvilinear integral and three algebraic equations describing balance of boundary friction. Adequacy of model is confirmed by natural experiments on an example of tractor T-10 of manufacture of the Chelyabinsk tractor factory.*

**Key words:** Tractor for a plowed land, withdrawal, the shift, the displaced loading.