

УДК 631.3

## УРАВНЕНИЕ СВЯЗИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ТРАКТОРА И ОРУДИЙ В ЭШЕЛОНИРОВАННОМ РАЗНЕСЕННОМ МАШИННО-ТРАКТОРНОМ АГРЕГАТЕ

**А.В. Ващула**, зав. лабораторией  
ГУ «Белорусская МИС»

**Ключевые слова:** эрозия почв, деформация, заиление, уравнение, расход наносов, характеристика потока

### Введение

Тягово-толкающий навесной машинно-тракторный агрегат (МТА) на базе трактора классов тяги 40 и 50 кН можно создать в виде вариантов:

- традиционном – 8-9 корпусов плуга сзади;
- эшелонированном – 3 корпуса на переднем НУ, 5 корпусов сзади;
- гибридном [1] – с полунавесным 7-8-корпусным плугом «Lemken Vari Transit 8», присоединенном к трактору с помощью заднего НУ с регулируемой длиной верхней тяги.

Опорные колеса орудий расположены:

- у традиционного задненавешенного плуга на расстоянии  $l_{пн}=L_{пн}/3$  от оси подвеса,
- у передненавешенного орудия – перед рабочими органами,
- у гибридного орудия – на уровне 5-го корпуса на расстоянии  $l_{пн}=2L_{пн}/3$ .

Ранее были определены общие закономерности взаимодействия поддрессоренного гусеничного трактора отдельно с передненавешенным [2] и задненавешенным орудиями в продольно-вертикальной плоскости. Установлено, что для снижения динамических взаимодействий трактора с навесными орудиями следует использовать специальные НУ и системы стабилизации (например, регулирование длины верхней тяги [3]). Для обеспечения синхронизации работы систем регулирования НУ при работе пахотного агрегата в тягово-толкающем режиме нужно определить уравнения связи перемещений передне- и задненавешенных орудий при переезде макронеровностей рельефа:

По аналогии с выражениями, приведенными в работах [2, 3], запишем уравнения связи для передненавешенных (с индексом П) и задненавешенных (с индексом З) орудий, где в записи без индексов «З» (задненавешенный) и «П» (передненавешенный):

$$K_2^3 \frac{y - q_{пн}^3}{r_{AB}^3 \cos \beta_{AB}^3} + \left( 1 + \frac{K_2^{3,3} I_{АЦУП}}{r_{AB}^3 \cos \beta_{AB}^3} \right) - \psi^3 \left( K_1^3 - \frac{K_2^{3,3} I_{пн}}{r_{AB}^3 \cos \beta_{AB}^3} \right) = 0$$

$$K_2^п \frac{y - q_{пн}^п}{r_{AB}^п \cos \beta_{AB}^п} - \left( 1 - \frac{K_2^{п,п} I_{АЦУП}}{r_{AB}^п \cos \beta_{AB}^п} \right) + \psi^п \left( K_1^п - \frac{K_2^{п,п} I_{пн}}{r_{AB}^п \cos \beta_{AB}^п} \right) = 0$$

$y$  – вертикальные линейные перемещения центра упругости подвески (ЦУП) трак-

тора;  $q_{пл}$  – вертикальные перемещения копирующего колеса орудия на макронеровности;  $r_{AB}$  – длина нижней тяги  $AB$  навесного устройства;  $\alpha_{AB}$  – угол наклона к горизонтали тяги  $AB$ ;  $\varphi$  – дифферент корпуса трактора вокруг ЦУП;  $l_{АЦУП}$  – продольные расстояния от точки  $A$  крепления нижней тяги  $AB$  на тракторе до ЦУП;  $\psi$  – дифферент рамы орудия;  $l_{пл}$  – продольное расстояние от оси подвеса до копирующего колеса.

Кинематические коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$  определяются по формулам:

$$K_1 = \frac{r_{BC} \cos \beta_{CD} + b_{BC}}{r_{AD} \cos \beta_{CD} + b_{AD}}$$

$$K_2 = \frac{r_{AB} \sin \beta_{CD} - b_{AB}}{r_{AD} \cos \beta_{CD} + b_{AD}}$$

где  $r_{BC}$  и  $\alpha_{BC}$  – высота и угол наклона к нормали стойки  $BC$  присоединительного треугольника, соответственно;  $\alpha_{CD}$  – угол наклона к горизонтали верхней тяги  $CD$  навесного устройства;  $r_{AD}$  – расстояние между точками крепления  $A$  и  $D$  тяг на тракторе;  $\alpha_{AD}$  – углы наклона к вертикали звена  $AD$ .

Так как  $\alpha_{AB} \rightarrow 0$ , примем  $\cos \alpha_{AB} = 1$ .

Приведем уравнения к следующему виду:

$$y' - q_{пл}^3 \pm \left( \frac{r_{AB}^3}{K_2^3} + l_{АЦУП}^3 \right) - \psi^3 \left( \frac{K_1^3}{K_2^3} r_{AB}^3 - l_{пл}^3 \right) = 0$$

$$y' - q_{пл}^п = \left( \frac{r_{AB}^п}{K_2^п} - l_{АЦУП}^п \right) + \psi^п \left( \frac{K_1^п}{K_2^п} r_{AB}^п - l_{пл}^п \right) = 0$$

Исключив члены, содержащие  $y$ , запишем уравнение связи в следующем виде:

$$q_{пл}^3 - q_{пл}^п + \left[ l_{АЦУП}^3 - l_{АЦУП}^п \pm \left( \frac{r_{AB}^3}{K_2^3} + \frac{r_{AB}^п}{K_2^п} \right) \right] - \psi^3 \left[ \frac{r_{CB}^3 \cos \beta_{CD}^3 + b_{CB}^3}{\sin \beta_{CD}^3 - b_{AB}^3} + l_{пл}^3 \right] + \psi^п \left[ \frac{r_{CB}^п \cos \beta_{CD}^п + b_{CB}^п}{\sin \beta_{CD}^п - b_{AB}^п} - l_{пл}^п \right] = 0 \quad (1)$$

где в записи без индексов «3» и «п»:

$$\frac{r_{AB}}{K_2} = r_{AD} \frac{\cos \beta_{CD} + b_{AD}}{\sin \beta_{CD} - b_{AB}}$$

Из  $\Delta PAD$  следует, что  $\angle APD = \alpha_{CD} \pm \alpha_{AB}$  и  $\angle ADP = 90^\circ + \alpha_{AD} - \alpha_{CD}$

Тогда

$$\frac{r_{AD} \cos \beta_{CD} - b_{AD}}{\sin \beta_{CD} - b_{AB}} = c_A,$$

где  $r_A$  – расстояние от центра  $P$  до шарнира крепления нижней тяги  $AB$  на тракторе.

Из  $\Delta PBC$  следует, что  $\angle CPB = \alpha_{CD} \pm \alpha_{AB}$  и  $\angle BCP = 90^\circ - \alpha_{CD} \pm \alpha_{CB}$

С учетом теоремы синусов получим:

$$c_{Bp}^{\pi} = r_{CB}^{\pi} \frac{\sin \beta_{CD}^{\pi} + \beta_{CB}^{\pi}}{\sin \beta_{CD}^{\pi} - \beta_{AB}^{\pi}}$$

Уравнение связи (1) справедливо, если процесс движения стационарный, когда неровности рельефа относительно короткие и математическое ожидание случайного профиля поля величина постоянная. Для случая, если МТА движется по макронеровностям рельефа, уравнение (1) перепишем в следующем виде:

$$q_{nn}^3 - q_{nn}^{\pi} + \Delta I_{АЦУП}^3 - I_{АЦУП}^{\pi} = ( + \Delta ) c_{Ap}^{\pi} + c_{Ap}^3 = \omega^3 (c_{Bp}^3 + I_{nn}^3) + \omega^{\pi} (c_{Bp}^{\pi} + I_{nn}^{\pi}) = 0$$

где в записи без индексов «3» (задненавешенный) и «π» (передненавешенный): φ + Δφ – углы дифферента трактора, вызванные, соответственно копированием неровностей и деформацией рессор, ρ<sub>Аπ</sub> – длина луча, соединяющего точку А крепления нижней тяги НУ на тракторе с точкой π – центром вращения тяг НУ, ρ<sub>Вπ</sub> – длина луча, соединяющего точку В оси подвеса с центром вращения π.

Для нахождения  $q_{nn}^3$  и  $q_{nn}^{\pi}$  следует продлить плоскость опорной поверхности вперед и назад и восстановить к ней перпендикуляры из центров контактов копирующих колес орудий.

В начальной стадии примем:

φ=0 (если не рассматривать дифференты Δφ трактора на подвеске),  $q_{nn}^3 = 0$ , ψ<sup>3</sup>=0.

Тогда

$$q_{nn}^{\pi} + \omega^{\pi} \left[ r_{CB}^{\pi} \frac{\sin \beta_{CD}^{\pi} + \beta_{CB}^{\pi}}{\sin \beta_{CD}^{\pi} - \beta_{AB}^{\pi}} - I_{nn}^{\pi} \right] = 0$$

Выразим угол наклона рамы орудия:

$$\omega^{\pi} = \frac{q_{nn}^{\pi}}{c_{Bp}^{\pi} + I_{nn}^{\pi}}$$

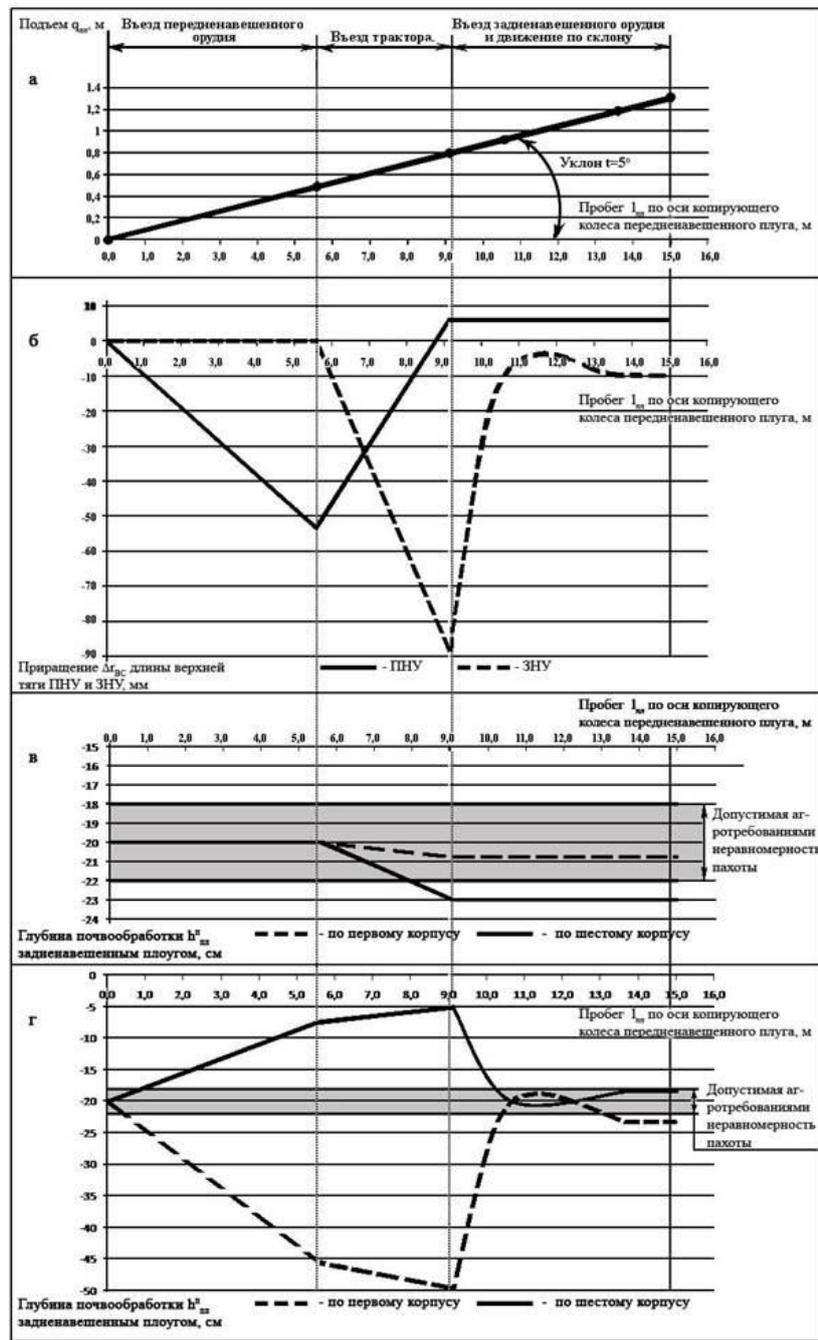
Если  $q_{nn}^{\pi} = 0,1$  м,  $\rho_{A\pi}^{\pi} = 3,16$  м,  $I_{nn}^{\pi} = 3$  м, то ψ<sup>π</sup> = 0,72 град. При въезде на неровность следует уменьшить длину верхней тяги ПНУ и ЗНУ.

В средней стадии примем ψ<sup>π</sup>=φ=i – уклон местности,  $q_{nn}^{\pi} = 0$ , ψ<sup>3</sup> = 0

$$c \left[ I_A^3 - I_A^{\pi} \pm \left( \frac{r_{AB}^3}{K_2^3} + \frac{r_{AB}^{\pi}}{K_2^{\pi}} \right) \right] = \omega^3 c_B^3 + I_{nn}^3 - q_{nn}^3,$$

С учетом изложенного:

$$I_{АЦУП}^3 - I_{АЦУП}^{\pi} \pm ( + \Delta ) c_A^3 + c_A^{\pi} = \omega^3 c_B^3 + I_{nn}^3 = q_{nn}^3,$$



Диапазоны регулирования длины верхних тяг ПНУ и ЗНУ и показатели копируемости разнесенного эшелонированного МТА при въезде на макронеровность рельефа:  
 а – профиль макронеровности; б – приращение  $\Delta l_{\text{вс}}$  длины верхней тяги ПНУ и ЗНУ;  
 в, г – глубина вспашки передненавешенным  $h_{\text{пл}}^{\text{п}}$  и задненавешенным  $h_{\text{пл}}^{\text{з}}$  плугами при въезде на макронеровность без регулирования длины верхней тяги

где  $i\rho_A^3$  – смещение вокруг центра т т.А, нормальное опорной поверхности;  
 $\Delta\phi_{АЦУП}$  – смещение т А, вокруг ЦУП, вызванное дифферентом на подвеске;  
 $\psi^3(\rho_B^3 + l_{nn}^3)$  – смещение оси копирующего колеса орудия вокруг центра т.  
 Тогда угол наклона рамы задненавешенного орудия:

$$\omega^3 = \frac{(c_A + \Delta)c_A^3 - \Delta l_{АЦУП}^3 + q_{nn}^3}{c_B^3 + l_{nn}^3},$$

где  $q_{nn \max} = r_{AB}^3 + l_{nn}^3$

Примем, кроме того,  $\Delta\phi_{РА} \approx \Delta\phi_{АЦУП}$ ,  $\phi = i$ . Тогда угол наклона рамы задненавешенного орудия к корпусу трактора:

$$\psi^3 = i \frac{\rho_A^3 + r_{AB}^3 + l_{nn}^3}{l_{АЦУП}}$$

Величина  $c_A^3 + r_{AB}^3 + l_{nn}^3$  – расстояние от центра т до оси колеса передненавешенного орудия. При въезде на неровность передненавешенного орудия происходит «защемление» верхней тяги ПНУ. При въезде на неровность задненавешенного орудия происходит «защемление» верхней тяги ЗНУ.

В первом случае верхнюю тягу  $CD$  следует укоротить на величину  $\Delta r_{BC}^3 = r_{BC}^3 \operatorname{tg} \psi^3$ ;

Во втором случае верхнюю тягу  $CD$  следует укоротить на величину  $\Delta r_{BC}^3 = r_{BC}^3 \operatorname{tg} \psi^3$

В заключительной стадии  $\psi^3 \neq \psi^3$ ,  $q_{nn}^3 = 0$ ,  $q_{nn}^3 = 0$ ,  $\phi = 0$ .

$$\Delta\phi_{АЦУП}^3 - l_{АЦУП}^3 = \Delta\phi \rho_A^3 + \rho_A^3 = \psi^3(\rho_B^3 + l_{nn}^3) + \psi^3(\rho_B^3 + l_{nn}^3) = 0$$

Откуда

$$\omega^3 = -\Delta \frac{l_{АЦУП}^3 + c_A^3}{c_B^3 + l_{nn}^3}; \quad \omega^3 = \Delta \frac{l_{АЦУП}^3 + c_A^3}{c_B^3 + l_{nn}^3}$$

Если дифферент  $\Delta\phi$  отрицательный (на корму), то дифферент орудия  $\psi^3$  – также отрицательный, а дифферент  $\psi^3$  – положительный.

Дополнительный дифферент  $\Delta\phi$  определяется по формуле:

$$\Delta\phi = \frac{G_T - G_T^H a_0 + a_{ЦУП}(\bar{1} - \cos i) - G_T - G_T^H y_{ЦТ} \sin i}{\sum_{j=1}^{2n} c_j l_{jЦУП}}$$

где  $G_T$  и  $G_T^H$  – полный вес трактора и вес неподрессоренных частей;  $a_0$  – продольное расстояние от середины гусеницы до центра тяжести (ЦТ) трактора;  $a_{ЦУП}$  – продольное расстояние от середины гусеницы до ЦУП трактора;  $y_{ЦТ}$  – высота центра тяжести трактора;  $c_j$  – жесткость рессор подвески;  $l_{jЦУП}$  – продольное расстояние от центра упругости подвески (ЦУП) до  $j$ -катка.

При въезде на спуск «защемления» верхней тяги не происходит. Наоборот, требуется удлинить верхнюю тягу  $CD$  на величину, определяемую по приведенным форму-

## Исходные данные

| Общие характеристики трактора |                        | Параметры НУ         |           |        | Параметры навесных орудий |        |
|-------------------------------|------------------------|----------------------|-----------|--------|---------------------------|--------|
| условное обозначение          | значение:              | условное обозначение | значение: |        |                           |        |
|                               |                        |                      | ПНУ       | ЗНУ    |                           |        |
| $G_T$                         | 109,1 кН               | $r_{AB}$             | 0,72 м    | 1,03 м | $\eta^П$                  | 3      |
| $G^{нТ}$                      | 8,10 кН                | $r_{BC}$             | 0,61 м    | 0,9 м  | $\eta^З$                  | 6      |
| $a_0$                         | 0,17 м                 | $r_{CD}$             | 0,47 м    | 0,9 м  | $L_{пл}^П$                | 3 м    |
| $a_{цуп}$                     | -0,072 м               | $r_{AD}$             | 0,59 м    | 0,68 м | $L_{пл}^З$                | 4,5 м  |
| $u_{цт}$                      | 0,380 м                | $\alpha_{AB}$        | 0°        | 0°     | $\beta_{пл}^П$            | 3 м    |
| $l_{1цуп}$                    | 1,222 м                | $\alpha_{BC}$        | 0°        | 0°     | $\beta_{пл}^З$            | 1,5 м  |
| $l_{2цуп}$                    | 0,634 м                | $\alpha_{CD}$        | 8,9°      | 13,3°  | $h_{пл}$                  | 0,2 м  |
| $l_{3цуп}$                    | 0,072 м                | $\alpha_{AD}$        | 25,5°     | 13,1°  | $L_{пл}^{П1}$             | 0,75 м |
| $l_{4цуп}$                    | -0,49 м                | $K_1$                | 1,24      | 1,43   | $L_{пл}^{П3}$             | 3 м    |
| $l_{5цуп}$                    | -1,078 м               | $K_2$                | 0,23      | 0,34   | $L_{пл}^{З1}$             | 1,5 м  |
| $c_j$                         | $0,45 \cdot 10^3$ кН/м | $l_{АЦУП}$           | 3,16 м    | 1,53 м | $L_{пл}^{З6}$             | 3 м    |

лам: переднего НУ – при въезде на спуск передненавешенного орудия; заднего НУ – при въезде на спуск задненавешенного орудия.

При отсутствии регулирования поворот  $\psi$  рамы сельхозорудия вызывает неравномерность почвообработки по длине сельскохозяйственного орудия:

$$\Delta h_{mn} = L'_{mn} \sin \omega$$

где  $L^k_{пл}$  – расстояние от носка k-того корпуса плуга, по которому оценивается неравномерность, до оси копирующего колеса.

На рисунке приведены результаты расчета приращений  $\Delta r_{BC}$  длины верхних тяг ПНУ и ЗНУ (б) и неравномерности глубины вспашки передненавешенным  $h^П_{пл}$  и задненавешенным  $h^З_{пл}$  плугами при условии отсутствия регулирования длины верхних тяг НУ (в, г) при въезде разнесенного эшелонированного МТА на макронеровность с уклоном  $i=5^\circ$  (а). Исходные данные приведены в таблице.

Расчет проводился из условия, что агрегат при движении по ровной поверхности уравновешен в продольно-вертикальной плоскости,  $q_{пл}=0$ .

**Выводы**

Для обеспечения копируемости неровностей макрорельефа разнесенным эшелонированным навесным агрегатом необходимо использовать регулирование длин верхних тяг переднего и заднего навесных устройств. Так, при подъеме на уклон  $i = 5^\circ$  длину верхней тяги необходимо корректировать: для ПНУ – до 54 мм, для ЗНУ – до 89 мм. При этом предельные коррекции разнесены во времени, что позволяет использовать одну емкость с гидравлической жидкостью для обеих систем регулирования. В случае отсутствия регулирования агрегат не обеспечивает почвообработку в соответствии с агротехническими требованиями (б, в) при въезде на склон. Для предотвращения дифферента при движении непосредственно на уклоне можно предварительно отрегулировать длину

верхних тяг НУ. При  $\alpha = 5^\circ$  верхнюю тягу ПНУ нужно удлинить на 6 мм, а верхнюю тягу ЗНУ – укоротить на 10 мм.

#### **Литература**

1. Испытания плуга Lemken vari Transit 8 «Такой тяжелый и все-таки легкий» // Современная техника и оборудование, осенний выпуск. – 2007. – №3. – С.34-37.
2. Горин, Г.С. Уравновешивание эшелонированного пахотного агрегата на базе гусеничного трактора в продольно-вертикальной плоскости / Г. С. Горин, А. В. Ващула // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2008. – № 1. – С. 89-96.
3. Горин, Г.С. Расчёт усилий в тягах переднего навесного устройства при переезде неровностей рельефа / Г.С. Горин, А. В. Ващула // Мелиорация – 2009. – № 1. – С. 28-39.

#### **Summary**

##### **Vashula A. Equation of Connection of Tractor and Devices Traveling in Echelon-Type Spaced Apart Machine-Tractor Aggregate (MTA)**

Imitation of irregularities of macrorelief by echelon-type, spaced apart, hinged aggregate is provided by length regulation of top links of front and back mounted tools. At this, the limiting corrections are spread in time, that enables one hydraulic liquid vessel to be used for both regulating systems. If regulation is not available, aggregate doesn't provide cultivation according to agrotechnical requirements while traveling to a slope. It is possible to regulate the length of top links in advance to prevent different while traveling on slope. Top link of the front mounted device is to be extended by 6 mm at  $5^\circ$  slope, and top link of back mounted device is to be shortened by 10 mm.

*Поступила 15 мая 2009 г.*