

УДК. 629.114.2

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ АГРЕГАТИРОВАНИЯ ТРАКТОРОВ «БЕЛАРУС» С НАВЕСНЫМ КОРМОУБОРОЧНЫМ КОМБАЙНОМ КНК-3000 «ПОЛЕСЬЕ»

**В. Б. ПОПОВ**

*Учреждение образования Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого,  
Республика Беларусь*

*Анализ возможности агрегатирования тракторов «БЕЛАРУС» с навесным кормоуборочным комбайном КНК-3000 «Полесье» был выполнен на базе плоского аналога механизма навески соответствующего трактора. Представленная здесь методика определения грузоподъемности позволяет оценить возможность агрегатирования (в энергетическом аспекте) любого навесного рабочего орудия или машины с любым другим мобильным энергетическим средством, имеющим идентичный по структуре механизм навески. Разработанный расчет грузоподъемности может быть использован в качестве модуля при параметрической оптимизации как данного, так и идентичных по структуре подъемно-навесных устройств на ранних стадиях их проектирования.*

**Ключевые слова:** колесный трактор, мобильное энергетическое средство, агрегатирование, кормоуборочный комбайн, подъемно-навесное устройство, передаточное число, грузоподъемность, управляемость.

## ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF AGGREGATING "BELARUS" TRACTORS WITH A MOUNTED FORAGE HARVESTER KNK-3000 "POLESIE"

**V. B. POPOV**

*Educational Institution "Sukhoi State Technical University  
of Gomel", the Republic of Belarus*

*Analysis of the possibility of aggregation of tractors "BELARUS" with a mounted feed-harvester combine KNK-3000 "Polesie" was carried out on the basis of a flat analogue of the suspension mechanism of the corresponding tractor. The method of determining the loading capacity presented here allows to evaluate the possibility of aggregating (in the energy aspect) any mounted working tool or machine with any other mobile energy means having an identical suspension mechanism in structure. The developed load calculation can be used as a module for parametric optimization of both this and identical structure of lifting-hinged devices in the early stages of their design.*

**Keywords:** wheeled tractor, mobile energy facility, aggregation, fodder harvester, lifting-hinged device, gear ratio, loading capacity, controllability.

### **Введение**

Выпускаемый ОАО «Гомсельмаш» навесной кормоуборочный комбайн КНК-3000, предназначенный для уборки трав и грубостебельных культур, обычно агрегируется с универсальным энергетическим средством УЭС-2-250А (УЭС-2-280А) в составе кормоуборочного комплекса К-Г-6.



Рис. 1. Комбайн навесной кормоуборочный КНК-3000, агрегируемый с универсальным энергетическим средством УЭС-2-250А (УЭС-2-280А) «Полесье»

Агрегатирование КНК-3000 только с УЭС ограничивает область его распространения и применения [1]. Использование в качестве энергоносителей для КНК-3000 других мобильных энергетических средств (МЭС), в частности, колесных тракторов общего назначения «БЕЛАРУС», позволит навешивать КНК-3000 на тракторы, имеющиеся в хозяйствах в достаточном количестве [2]. Одним из основных требований, связанных с переводом навесной машины из рабочего в транспортное положение, является обеспечение грузоподъемности подъемно-навесного устройства (ПНУ) МЭС. Расчет грузоподъемности ПНУ графоаналитическими методами [3], [4] достаточно трудоемок, поэтому была разработана функциональная математическая модель (ФММ) [5], позволяющая рассчитать выходные параметры ПНУ МЭС, и в том числе его грузоподъемность, аналитически, что в современных учебниках и учебных пособиях не рассматривается [6], [7].

Цель работы – определение запаса грузоподъемности и управляемости тракторов «БЕЛАРУС» при их агрегатировании с навесным кормоуборочным комбайном КНК-3000.

#### **Основная часть**

Наиболее подходящими для агрегатирования с КНК-3000 являются колесные тракторы общего назначения линейки от «БЕЛАРУС-1523» до «БЕЛАРУС-2022». Оба эти трактора оборудованы подъемно-навесными устройствами с грузоподъемностью на оси подвеса 65 кН [8]. С учетом того, что максимальный вес КНК-3000 (навесной измельчитель и жатка для уборки грубостебельных культур) составляет 29,5 кН, использование упомянутых тракторов в качестве энергоносителей для КНК-3000 может быть вполне реальным.

Связь универсальных энергетических средств «Полесье», выпускаемых ОАО «Гомсельмаш», с навесными машинами (НМ) или сельскохозяйственными орудиями поддерживается при помощи подъемно-навесных устройств (ПНУ), состоящих из гидроприводов (ГП) и механизмов навески (МН). При этом МН является основным структурным компонентом ПНУ, определяющим характер взаимодействия МЭС с НМ.

Звенья механизма навески, опирающиеся на раму энергосредства и связанные через шарниры присоединительного треугольника с навешиваемым комбайном, в продольной плоскости образуют замкнутую кинематическую цепь (рис. 2).

Структурный анализ МН состоит в определении степени свободы структурной схемы МН. Запишем выражение для определения подвижности плоского МН (формула Чебышева):

$$W = 3n - 2p_5 - p_4, \quad (1)$$

где  $W$  – степень свободы структурной схемы МН;  $n$  – число подвижных звеньев механизма;  $p_5$ ,  $p_4$  – число кинематических пар соответственно 5-го и 4-го классов.

В результате имеем МН с одной степенью свободы, положение выходного звена (характерная точка  $S_6$ ) которого однозначно связано с изменением обобщенной координаты  $S$ . Таким образом, на плоскости МН идентифицируется восьмизвенный шарнирно-рычажный механизм (рис. 2).

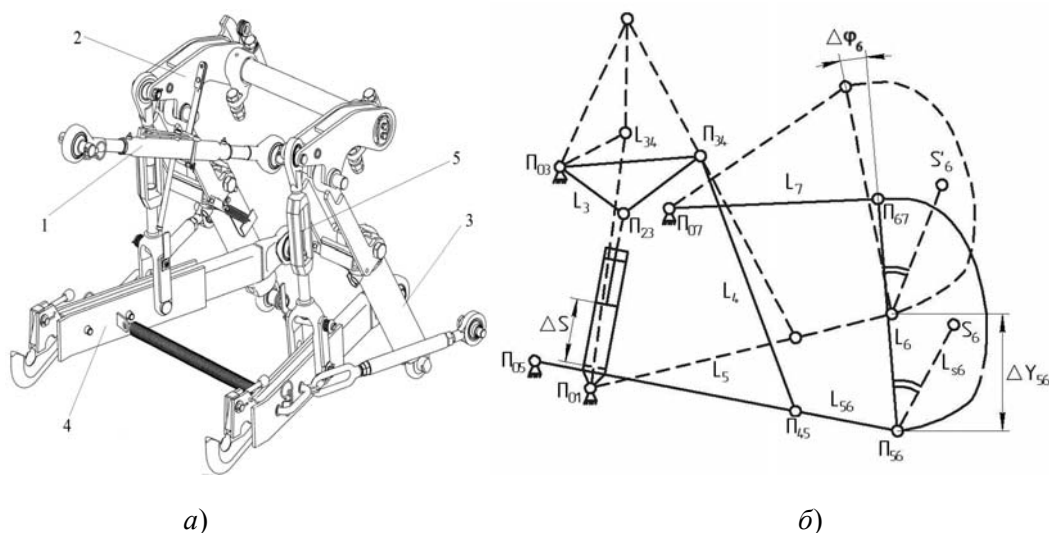


Рис. 2. Механизм навески мобильного энергосредства (а) и его плоский аналог кинематической цепи, включающей механизм навески и навесную машину (б): 1 – тяга верхняя; 2 – рычаг поворотный; 3 – гидроцилиндр; 4 – тяга нижняя; 5 – раскос

Большинство выходных параметров МН определяются в режиме перевода НМ из рабочего положения в транспортное. Геометрический анализ замкнутой кинематической цепи выполняется по методу замкнутых векторных контуров [9], [10].

В результате определяются координаты подвижных шарниров МН и характерных точек замкнутой кинематической цепи, например, координаты оси подвеса МН –  $\Pi_{56}$ :

$$X_{56}(S) = X_{05} + L_{56} \cos \varphi_5(S); \quad Y_{56}(S) = Y_{05} + L_{56} \sin \varphi_5(S), \quad (2)$$

где  $X_{05}$ ,  $Y_{05}$  – координаты неподвижного шарнира  $\Pi_{05}$  на раме УЭС;  $\varphi_i$  – угол, образуемый соответствующим звеном, в правой декартовой системе координат.

Координаты характерной точки – центра тяжести НМ определяются как:

$$X_{S6}(S) = X_{56}(S) + L_{S6} \cos[\varphi_6(S) + \varphi_{S6}]; \quad (3)$$

$$Y_{S6}(S) = Y_{56}(S) + L_{S6} \cdot \sin[\varphi_6(S) + \varphi_{S6}], \quad (4)$$

где  $L_{S_6}$  и  $\varphi_{S_6}$  – характеристики вектора, проведенного от оси подвеса в центр тяжести рабочего орудия.

Аналитические выражения (2)–(4) представляют собой функции положения звеньев для МН и одновременно необходимы для формирования процедур кинематического и силового анализа.

Передаточное число МН представляет собой аналог вертикальной скорости центра тяжести навесной машины [11], зависящий от внутренних параметров МН и координат центра тяжести навесной машины относительно оси подвеса:

$$I_{S_6}(S) = \varphi'_3 U_{53} [L_{S_6} \cos \varphi_5 + U_{65} L_{S_6} \cos(\varphi_6 + \varphi_{S_6})], \quad (5)$$

где  $\varphi'_3(S)$  – аналог угловой скорости поворотного рычага;  $U_{53}$ ,  $U_{65}$  – передаточные отношения, показывающие соотношения угловых скоростей звеньев;  $\varphi_5(S)$ ,  $\varphi_6(S)$  – углы, образуемые аналогами звеньев в правой декартовой системе координат.

Первая часть суммы в выражении (5) представляет собой передаточное число МН на оси подвеса, позволяющее сравнивать между собой потенциальные возможности ПНУ различных МЭС.

Развиваемая на штоке гидроцилиндра сила зависит от давления в его напорной полости  $p_{гц}$ , площади поршня  $F_{п}$  и приведенных к штоку сил трения  $F_{тр}^{np}(S^\circ)$  и инерции  $F_{ин}^{np}(S^\circ)$ :

$$F_{шт} = p_{гц} F_{п} - [F_{тр}^{np}(S) + F_{ин}^{np}(S)]. \quad (6)$$

В результате грузоподъемность ПНУ трактора определяется весом поднимаемой НМ при максимально развиваемой силе  $F_{шт}^{max}$  на штоке гидроцилиндра МН:

$$G_s = \frac{p_{гц}^{max} F_{п} - [F_{тр}^{np}(S^\circ) + F_{ин}^{np}(S^\circ)]}{I_{S_6}(S^\circ)}, \quad (7)$$

где  $S^\circ$  – значение обобщенной координаты, соответствующее максимальному значению передаточного числа МН.

Из выражения (7) следует, что для повышения грузоподъемности ПНУ за счет внутренних параметров МН следует уменьшать максимальное значение передаточного числа  $I_{S_6}(S)$ , величина которого связана с расположением центра тяжести конкретной НМ (КНК-3000). Одновременно, как это следует из выражения (5), рекомендуется уменьшать и передаточное число на оси подвеса, зависящее только от внутренних параметров МН.

Исходные данные [8], необходимые для расчета выходных параметров ПНУ тракторов «БЕЛАРУС» моделей 1523 и 2022, представлены в табл. 1.

## Исходные данные для расчета выходных параметров МН (ПНУ)

Наименование параметра трактора «БЕЛАРУС»		Значение	
		Модель 1523	Модель 2022
Координаты центров шарниров звеньев, расположенные на раме трактора, м	$X_{01}$	0,415	0,405
	$Y_{01}$	0,563	0,874
	$X_{03}$	0,250	0,320
	$Y_{03}$	1,112	1,517
	$X_{05}$	0,135	0,290
	$Y_{05}$	0,480	0,523
	$X_{07}$	0,415	0,525
	$Y_{07}$	0,895	1,103
Угол между звеньями $L_3$ и $L_{34}$ $\Psi_{вд}$ , град		22	18,925
Размеры звеньев механизма навески, м	$L_3$	0,2	0,185
	$L_{34}$	0,325	0,340
	$L_4$	0,616	0,983
	$L_5$	0,480	0,644
	$L_{56}$	0,965	1,045
	$L_7$	0,71–0,81	0,79–0,89
Диапазон изменения обобщенной координаты (ход гидроцилиндра) $S$ , м		0,42–0,67	0,49–0,74
<b>Параметры гидропривода</b>			
Допустимое давление у гидронасоса $P_{гц}$ , МПа		20	20
Диаметр гидроцилиндра $D_{гц}$ , м		0,08	0,09
КПД МН $\eta$		0,80	0,80
<b>Параметры, определяющие управляемость</b>			
Эксплуатационный вес трактора $P_{тр}$ , кН		62,50	72,20
Вес дополнительных грузов $P_{гр}$ , кН		До 10,25	До 10,10
Продольная база трактора $L$ , м		2,76	2,92
Расстояние от центра тяжести трактора до моста управляемых колес $b$ , м		1,62	1,75
Расстояние от моста управляемых колес до центра тяжести дополнительных грузов $a$ , м		0,6	0,7
<b>Параметры навешиваемой машины (КНК-3000)</b>			
Вес навешиваемого комбайна $P_6$ , кН		29,5	
Высота присоединительного треугольника $L_6$ , м		0,595	
Угол наклона присоединительного треугольника в рабочем положении $\phi_{6р}$ , град		90	
Координаты центра тяжести навешиваемого комбайна относительно оси подвеса, м:			
$X_6$		0,957	
$Y_6$		0,156	
Высота оси подвеса в рабочем положении $Y_{56р}$ , м		0,400	

Отметим, что агрегатирование МЭС и НМ возможно только при выполнении совокупности следующих требований:

– расчетная минимальная грузоподъемность ПНУ, определенная при заданных координатах центра тяжести КНК-3000, должна превышать максимальный эксплуатационный вес навесного кормоуборочного комбайна;

– выполнение компоновочных ограничений для КНК-3000, находящегося в транспортном положении ( $\Delta\phi_6 < 15$  град) [12]; при этом управляемость мобильного сельскохозяйственного агрегата должна соответствовать норме [12].

Для подтверждения возможности перевода КНК-3000 из рабочего в транспортное положение был выполнены проверочные расчеты на базе сформированной ФММ. Результаты анализа геометрических, кинематических и силовых параметров механизмов навески МН и ГП подъемно-навесных устройств тракторов «БЕЛАРУС-1523» и «БЕЛАРУС-2022» представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Выходные параметры ПНУ «БЕЛАРУС» 1523

$S$ , м	$Y_{56}$ , м	$\phi_6$ , град	$I_s$ , -**	$G_s$ , кН	$F_g$ , кН	$P_g$ , МПа
0,420*	–	–	–	–	–	–
0,445	0,398	89,890	4,719	41,32	139,21	14,109
0,470	0,472	90,276	4,812	40,35	141,95	14,282
0,495	0,557	90,622	4,821	39,58	142,22	14,310
0,520	0,639	91,273	4,845	37,32	142,93	14,403
0,545	0,718	91,892	4,924	36,76	145,14	14,667
0,570	0,793	92,737	5,023	35,04	148,18	15,038
0,595	0,866	93,687	5,122	34,32	151,09	15,451
0,620	0,936	95,241	5,193	33,71	153,19	15,846
0,645	1,001	98,363	5,196	33,05	153,28	16,81
0,670	1,063	102,64	5,203	32,44	153,49	17,97

*Примечание.*  $S$  – перемещение поршня гидроцилиндра (обобщенная координата);  $Y_{56}$  – вертикальная координата оси подвеса;  $\phi_6$  – угол наклона присоединительного треугольника;  $I_s$  – передаточное число;  $G_s$  – грузоподъемность в центре тяжести навесной машины;  $F_g$  – нагрузка приведенная к гидроцилиндру;  $P_g$  – давление в гидроцилиндре; \* – подсоединение КНК-3000 выполняется, когда высота оси подвеса  $Y_{56}$  составляет 0,4 м; \*\* – безразмерная величина.

Для трактора «БЕЛАРУС-1523» расчет показал (табл. 2), что грузоподъемность его ПНУ составила  $C_s = 32,44$  кН (запас грузоподъемности соответственно  $\Delta C_s = 10,05$  %).

Таблица 3

Выходные параметры ПНУ «БЕЛАРУС-2022»

$S$ , м	$Y_{56}$ , м	$\phi_6$ , град	$I_s$ , -**	$G_s$ , кН	$F_g$ , кН	$P_g$ , МПа
0,490*	–	–	–	–	–	–
0,515	0,396	89,279	3,925	57,70	115,79	13,964
0,54	0,456	89,170	3,959	55,72	116,77	13,850

Окончание табл. 3

$S$ , м	$Y_{56}$ , м	$\phi_6$ , град	$I_s$ , -**	$G_s$ , кН	$F_g$ , кН	$P_g$ , МПа
0,565	0,510	89,207	4,011	53,39	118,32	13,852
0,59	0,584	89,382	4,075	51,30	120,211	13,917
0,615	0,657	89,700	4,148	49,92	122,37	14,026
0,64	0,730	90,173	4,231	47,26	124,81	14,174
0,665	0,802	90,821	4,326	45,31	127,62	14,364
0,69	0,874	91,675	4,439	42,60	130,95	14,605
0,715	0,945	92,782	4,575	40,93	134,96	14,920
0,74	1,015	94,207	4,748	39,71	140,07	15,345

\*Подсоединение КНК-3000 выполняется, когда высота оси подвеса  $Y_{56}$  составляет 0,490 м.

\*\*Безразмерная величина.

Для трактора «БЕЛАРУС-2022» расчет показал (табл. 3), что грузоподъемность его ПНУ составила  $C_s = 39,71$  кН ( и запас грузоподъемности соответственно  $\Delta C_s = 34,6$  %).

Минимальные грузоподъемности ПНУ «БЕЛАРУС-1523» и «БЕЛАРУС-2022», определенные в центре тяжести комбайна КНК-3000, превышают его максимальный эксплуатационный вес. Таким образом, процесс подъема и перевода КНК-3000 в транспортное положение для обоих тракторов в энергетическом аспекте обеспечен.

Изменение угла наклона высоты присоединительного треугольника  $L_6$  КНК-3000 по отношению к трактору «БЕЛАРУС-1523» в транспортном положении ( $\Delta\phi_6 = 12,75$  град) обеспечивает удовлетворение компоновочных ограничений.

Изменение угла наклона КНК-3000 по отношению к трактору «БЕЛАРУС-2022» в транспортном положении ( $\Delta\phi_6 = 4,928$  град) по аналогии с предыдущим обеспечивает удовлетворение компоновочных ограничений.

Распределение веса МТА с КНК-3000 в транспортном положении по мостам ведущих и управляемых колес тракторов «БЕЛАРУС» моделей 1523 и 2022 представлено ниже в табл. 4 и 5.

Таблица 4

**Распределение веса МТА с КНК-3000 в транспортном положении  
по мостам ведущих и управляемых колес для трактора БЕЛАРУС-1523**

$S$ , м	0,667	0,668	0,669	0,67	0,671	0,672	0,673
$R_y$ , %	20,822	20,85	20,879	<b>23,918</b>	20,937	20,967	20,997
$R_v$ , %	79,178	79,15	79,121	<b>76,082</b>	79,063	79,033	79,003

*Примечание.*  $R_y$  – вес трактора приходящийся на управляемые колеса, выраженный в процентах;  $R_v$  – вес трактора приходящийся на ведущие колеса, выраженный в процентах.

Поскольку на управляемые колеса трактора «БЕЛАРУС-1523», входящего в состав МТА с КНК-3000 в транспортном положении, приходится более 20 % его веса (табл. 4), то необходимая управляемость обеспечивается.

Таблица 5

**Распределение веса МТА с КНК-3000 в транспортном положении по мостам ведущих и управляемых колес для трактора «БЕЛАРУС-2022»**

<b>S, м</b>	0,737	0,738	0,739	0,74	0,741	0,742	0,743
<b>R<sub>γ</sub>, %</b>	26,022	26,551	27,278	<b>27,649</b>	27,837	27,767	28,097
<b>R<sub>β</sub>, %</b>	73,978	73,449	72,722	<b>72,351</b>	72,163	72,233	71,903

Поскольку на управляемые колеса МТА с КНК-3000 в транспортном положении приходится более 20 % его веса (табл. 5), то необходимая управляемость МТА обеспечивается [12].

**Заключение**

Из двух проанализированных на базе сформированной ФММ ПНУ тракторов «БЕЛАРУС-1523» и «БЕЛАРУС-2022» устойчиво агрегируется с КНК-3000 последняя модель. Для агрегатирования с моделью 1523 необходима дополнительная корректировка параметров его МН.

Следует отметить, что приведенный здесь подход аналитического определения грузоподъемности и управляемости ПНУ и МТА позволяет оценить возможность агрегатирования в энергетическом аспекте любой навесной машины или рабочего орудия с любым другим МЭС, имеющим идентичный по структуре МН.

Представленные дополнения к ФММ могут быть использованы в составе базового модуля анализа выходных параметров при параметрической оптимизации как данного, так и идентичных по структуре ПНУ на ранних стадиях их проектирования или модернизации.

**Литература**

1. Марченко, О. С. Комплексы уборочных и почвообрабатывающих машин и комбинированных агрегатов на базе универсальных мобильных энергосредств мощностью 200–450 л. с. / О. С. Марченко // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. тез. докл. II Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 4–5 окт. 2018 г. / Науч.-техн. центр комбайностроения. – Гомель, 2018. – С. 93–98.
2. Шуринов, В. А. Основы агрегатирования универсального мобильного энергетического средства с адаптерами различного назначения / В. А. Шуринов. – Гомель : Ин-т механики металлополимер. систем НАН Беларуси, 1999. – 392 с. : ил.
3. Амельченко, П. А. Агрегатирование тракторов «Беларусь» : учеб. пособие / П. А. Амельченко, Б. Я. Шнейсер, Н. Г. Шатуня. – Минск : Ураджай, 1993. – 302 с.
4. Тракторы. Ч. III. Конструирование и расчет / В. В. Гуськов [и др.]. – Минск : Выш. шк., 1981. – 383 с.
5. Попов, В. Б. Функциональная математическая модель анализа подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов // Механика – 2011 : сб. науч. тр. V Белорус. конгресса по теорет. и приклад. механике, Минск, 2011 г. / Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси ; редкол.: М. С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 169–176.



6. Шарипов, В. М. Конструирование и расчет тракторов : учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» / В. М. Шарипов. – М. : Машиностроение, 2004. – 592 с. : ил.
7. Многоцелевые гусеничные и колесные машины. Теория : учеб. пособие / В. П. Бойков [и др.] ; под общ. ред. В. П. Бойкова. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М., 2012. – 543 с. : ил. – (Высш. образование).
8. Тракторы «БЕЛАРУС» / Мин. трактор. завод. – 2013. – 138 с. – Режим доступа: <http://www.belarustractor.com>.
9. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – М. : Машиностроение, 1988. – 640 с.
10. Попов, В. Б. Математическое моделирование подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 251 с. : ил.
11. Попов, В. Б. Аналитические выражения кинематических передаточных функций механизмов навески энергоносителей / В. Б. Попов // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2000. – № 2. – С. 25–29.
12. ГОСТ 10677–2001. Устройство навесное заднее сельскохозяйственных тракторов классов 0,6–8. Типы, основные параметры и размеры. – Введ. 01.01.04. – Минск : Изд-во стандартов, 2002. – 8 с. – (Межгос. стандарт).

*Дата получения 23.11.2021 г.*