

УДК 621.869

*М.И. Жилевич, П.Н. Кишкевич, А.А. Зубрицкий*  
*Белорусский национальный технический университет*

## АНАЛИЗ НАГРУЖЕННОСТИ ГИДРОЦИЛИНДРА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЙ СТРЕЛЫ ПОГРУЗЧИКА

**Аннотация.** Разработана математическая модель для определения взаимного положения звеньев механизма подъема стрелы погрузчика с гидравлическим приводом рабочего оборудования, получены математические зависимости, позволяющие оценить ряд силовых факторов при ее перемещении. Выполнены тестовые расчеты.

**Ключевые слова:** гидроцилиндр, кинематика, нагрузка, погрузчик, стрела, математическое моделирование, анализ.

*M.I. Zhylevich, P.N. Kishkevich, A.A. Zubritski*  
*Belarusian National Technical University*

## LOADING ANALYSIS OF HYDRAULIC CYLINDER IN LIFT MECHANISM OF LOADER TELESCOPIC ARM

**Annotation.** A mathematical model for determination the mutual position of the loader links with the hydraulic drive of the working equipment had been developed. Mathematical dependencies, allowing evaluation of force factors during loader arm moving are obtained. Test calculations are performed.

**Key words:** hydraulic cylinder, cinematics, loading, loader, load arm, math modeling, analysis.

### Введение

Погрузчики с телескопической стрелой и гидравлическим приводом рабочего оборудования в настоящее время находят всё большее применение при выполнении строительных работ и погрузочно-разгрузочных операций в логистических центрах. В таких машинах совмещаются функцио-

нальные возможности вилочного и одноковшового фронтального погрузчиков и самоходного стрелового крана. Они могут работать на ограниченном пространстве, поднимать груз на значительную высоту и оперировать с ним ниже плоскости своей опоры, а также транспортировать грузы на определенное расстояние.

Одним из первых производителей погрузчиков с телескопической стрелой является итальянская компания *Merlo* [1]. Выпуском аналогичной техники занимаются известные мировые компании *Bobcat*, *Caterpillar*, *DIECI*, *JCB*, *Gradall*, *TEREX* и др. Освоено производство таких машин и ОАО «АМКОДОР» (Республика Беларусь) [2].

С целью обеспечения конкурентоспособности проектируемых изделий, сокращения сроков проектирования и экспериментально-доводочных работ, что особенно актуально для рабочего оборудования с гидравлическим приводом, а также с целью оперативного реагирования на потребности заказчиков по грузоподъемности и функциональным возможностям погрузчика требуется развить инновационные методы их моделирования и исследования [3-6].

### 1 Математическая модель

В качестве объекта исследования принята одна из моделей погрузчиков «АМКОДОР». Общий вид монтажа телескопической стрелы на погрузчике представлен на рисунке 1 (точки 3 и 6 соответствуют местам крепления гидроцилиндра подъема стрелы).

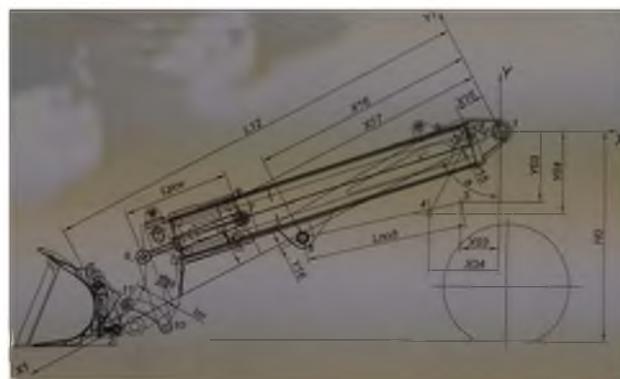


Рисунок 1 – Общий вид механизма подъема стрелы

Расчетная схема, учитывающая кинематические связи механизма, представлена на рисунке 2. Расстояние  $|AD|$  соответствует расстоянию между шарнирами цилиндра подъема (поворота) стрелы. Плечо  $l_{ст}$  приложения силы тяжести груза может изменяться гидроцилиндром выдвижения стрелы, расположенным внутри последней, выполненной в виде короба.

Угол поворота стрелы  $\alpha_c$  по отношению к вертикальной оси вокруг точки *C* (рисунок 2).

$$\alpha_c = DCE + ACB + ACD. \quad (1)$$

Из треугольника *CDE*

$$DCE = \arctg(|DE|/|CE|) = \arctg(x_3/y_3); \quad (2)$$

$$|CD|^2 = |DE|^2 + |CE|^2 = x_3^2 + y_3^2,$$

где  $x_3, y_3$  – координаты расположения шарнира  $D$ .

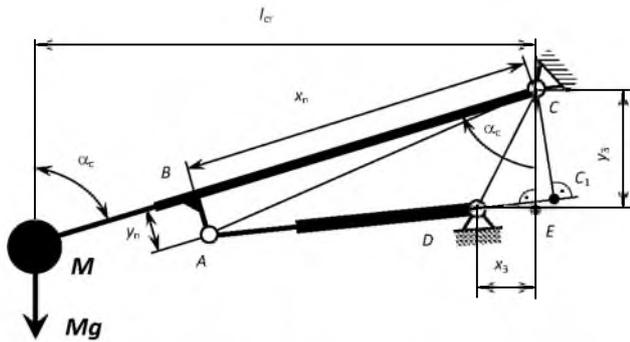


Рисунок 2 – Кинематическая схема рабочего оборудования

Из треугольника  $ABC$  следует:

$$ACB = \arctg(|AB|/|BC|) = \arctg(y_{\Pi}/x_{\Pi}); \quad (3)$$

$$|CD|^2 = |DE|^2 + |CE|^2 = y_{\Pi}^2 + x_{\Pi}^2,$$

где  $x_{\Pi}, y_{\Pi}$  – координаты точки крепления шарнира штока цилиндра поворота стрелы.

Величина угла  $ACD$  будет зависеть от хода штока цилиндра подъема стрелы (в точках  $A$  и  $D$  расположены шарниры цилиндра). Из треугольника  $ACD$

$$\begin{aligned} |AD|^2 &= |AC|^2 + |CD|^2 - 2|AC||CD|\cos(ACD) = \\ &= x_{\Pi}^2 + y_{\Pi}^2 + x_3^2 + y_3^2 - \\ &\quad - 2\sqrt{(x_{\Pi}^2 + y_{\Pi}^2)(x_3^2 + y_3^2)}\cos(ACD). \end{aligned}$$

Можно записать

$$|AD| = L_{\text{под}} + x_{\text{под}},$$

где  $L_{\text{под}}$  – расстояние между шарнирами цилиндра подъема стрелы в начальном положении;

$x_{\text{под}}$  – текущая координата (ход) штока цилиндра подъема стрелы.

Таким образом,

$$ACD = \arccos \left[ \frac{(x_{\Pi}^2 + y_{\Pi}^2 + x_3^2 + y_3^2 - (L_{\text{под}} + x_{\text{под}})^2)}{2\sqrt{(x_{\Pi}^2 + y_{\Pi}^2)(x_3^2 + y_3^2)}} \right]. \quad (4)$$

Подставив выражения (2)...(4) в выражение (1), получим зависимость угла поворота стрелы от положения поршня цилиндра подъема стрелы

$$\begin{aligned} \alpha_c &= \arctg(y_{\Pi}/x_{\Pi}) + \arctg(x_3/y_3) + \\ &+ \arccos \left[ \frac{(x_{\Pi}^2 + y_{\Pi}^2 + x_3^2 + y_3^2 - (L_{\text{под}} + x_{\text{под}})^2)}{2\sqrt{(x_{\Pi}^2 + y_{\Pi}^2)(x_3^2 + y_3^2)}} \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

Данная зависимость позволяет также анализировать влияние координат крепления шарниров на кинематику механизма.

Высота подъема груза относительно горизонтальной оси, проходящей через шарнир  $C$ , определяется по выражению

$$H_{\text{гр}} = L_{\text{стр}} \sin(\alpha_c - \pi/2), \quad (6)$$

дальность выдвижения груза относительно вертикальной оси, проходящей через шарнир  $C$ ,

$$L_{\text{гр}} = L_{\text{стр}} \cos(\alpha_c - \pi/2). \quad (7)$$

Запишем уравнение моментов сил, действующих на стрелу, относительно шарнира  $C$ , причем трением будем пренебрегать

$$M_T = M_{\text{ц}}, \quad (8)$$

где  $M_T$  – момент силы тяжести груза;

$M_{\text{ц}}$  – момент силы давления, развиваемый гидроцилиндром.

$$M_T = M_{\text{г}} g l_{\text{стр}},$$

где  $M_{\text{г}}$  – масса груза (массой стрелы на начальном этапе пренебрегаем);

$g$  – ускорение свободного падения;

$l_{\text{стр}}$  – плечо силы тяжести.

$$l_{\text{стр}} = L_{\text{стр}} \sin(\alpha_c),$$

где  $L_{\text{стр}}$  – длина стрелы (от шарнира  $C$  до центра тяжести груза).

Угол  $\alpha_c$  рассчитывается по выражению (5).

Стрела имеет телескопическую конструкцию, и ее длина может меняться от полностью втянутой  $L_{\text{стр.min}}$  до полностью выдвинутой  $L_{\text{стр.max}}$ . Наиболее нагруженный режим будет при выдвинутой стреле, однако целесообразно анализировать режим нагружения цилиндра подъема и при втянутой стреле.

Момент силы давления, развиваемый гидроцилиндром,

$$M_{\text{ц}} = F_{\text{цп}} l_{\text{цп}},$$

где  $F_{\text{цп}}$  – сила, развиваемая гидроцилиндром;

$l_{\text{цп}}$  – плечо силы давления.

$$F_{\text{цп}} = \pi D_{\text{цп}}^2 p_{\text{цп}} / 4,$$

где  $D_{\text{цп}}$  – диаметр поршня;

$p_{\text{цп}}$  – давление в цилиндре.

Из треугольника  $ACC_1$

$$l_{\text{цп}} = |CC_1| = |AC| \sin(CAC_1) = |AC| \sin(CAD)$$

Из треугольника  $CAD$  по теореме синусов

$$\frac{|CD|}{\sin(CAD)} = \frac{|AD|}{\sin(ACD)},$$

откуда

$$\begin{aligned} \sin(CAD) &= |CD| \sin(ACD) / |AD| = \\ &= \sqrt{x_3^2 + y_3^2} \sin(ACD) / L_{\text{под}} + x_{\text{под}}, \end{aligned}$$

причем величина угла  $ACD$  рассчитывается по выражению (4).

Таким образом, подставив составляющие в уравнение (8), получим

$$M_{Tg} L_{\text{под}} \sin \left[ \arctg(y_{\text{п}} / x_{\text{п}}) + \arctg(x_3 / y_3) + \arccos \left[ \frac{(x_{\text{п}}^2 + y_{\text{п}}^2 + x_3^2 + y_3^2 - (L_{\text{под}} + x_{\text{под}})^2) /}{(2\sqrt{(x_{\text{п}}^2 + y_{\text{п}}^2)(x_3^2 + y_3^2)}} \right] \right] =$$

$$= \frac{\pi D_{\text{цп}}^2}{4(L_{\text{под}} + x_{\text{под}})} p_{\text{цп}} \sqrt{x_{\text{п}}^2 + y_{\text{п}}^2} \sqrt{x_3^2 + y_3^2} \times$$

$$\sin \left( \arccos \left[ \frac{(x_{\text{п}}^2 + y_{\text{п}}^2 + x_3^2 + y_3^2 - (L_{\text{под}} + x_{\text{под}})^2) /}{(2\sqrt{(x_{\text{п}}^2 + y_{\text{п}}^2)(x_3^2 + y_3^2)}} \right] \right) \quad (9)$$

## 2 Расчетные исследования

По разработанной математической модели выполнены тестовые расчеты. В качестве основных исходных данных были приняты ряд параметров, близкие к параметрам одной из моделей погрузчика с телескопической стрелой ОАО «АМКОДОР».

Получены графики изменения высоты подъема и дальности выдвижения груза в зависимости от угла поворота стрелы в выдвинутом и втянутом положении; изменения угла поворота стрелы, высоты подъема и дальности выдвижения от хода штока цилиндра подъема стрелы; давления в гидроцилиндре подъема стрелы от угла ее поворота и высоты подъема груза при заданном диаметре поршня; расчетного (минимального) диаметра поршня гидроцилиндра при заданном давлении в различных положениях стрелы во втянутом и выдвинутом состоянии в зависимости от угла поворота и высоты подъема.

Графики изменения высоты подъема и дальности выдвижения груза в зависимости от угла поворота стрелы в выдвинутом и втянутом положении представлены на рисунке 3.

Используя уравнение (9), можно оценить ряд силовых факторов, в частности, нагрузки на штоки цилиндров, диаметры поршней, давление, необходимое для удержания груза при различном положении звеньев механизма.

Если из уравнения (9) выразить  $p_{\text{цп}}$ , можно рассчитать изменение давления в цилиндре с заданным диаметром поршня  $D_{\text{цп}}$ , обеспечивающее подъем груза массой  $M_r$  при длине стрелы  $L_{\text{стр}}$ , в зависимости от положения поршня  $x_{\text{под}}$  цилиндра подъема стрелы (или от угла поворота стрелы) диаметром поршня  $D_{\text{цп}}$ . На основании полученных зависимостей можно выбрать рабочее давление в системе.

На рисунке 4 представлены графики изменения давления в гидроцилиндре подъема стрелы в зависимости от угла поворота стрелы в выдвинутом и втянутом положении.

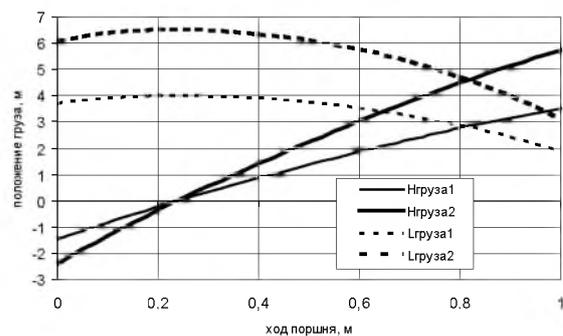


Рисунок 3 – Высота подъема (Нгруза1) и дальность выдвижения (Lгруза1) груза при втянутой стреле, соответственно, Нгруза2, Lгруза2 – при выдвинутой

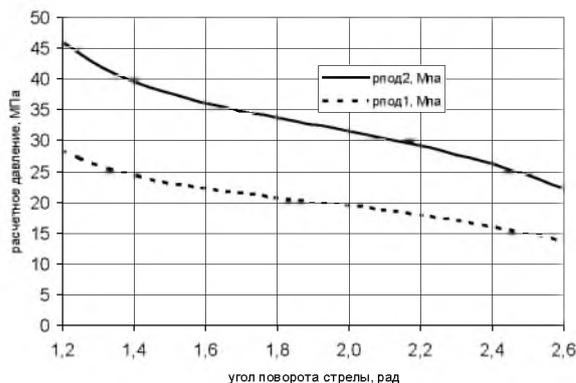


Рисунок 4 – Давление в гидроцилиндре подъема стрелы при заданном диаметре поршня со втянутой (рпод1) и выдвинутой (рпод2) стрелой

Если из уравнения (9) выразить  $D_{\text{цп}}$ , можно рассчитать необходимый диаметр поршня при заданном давлении в системе  $p_{\text{цп}}$  и различных  $M_r$ ,  $L_{\text{стр}}$ ,  $x_{\text{под}}$ . Графики изменения минимального расчетного диаметра поршня при заданном давлении в различных положениях стрелы во втянутом и выдвинутом состоянии в зависимости от угла ее поворота представлены на рисунке 5. По полученным графикам можно выбрать требуемый диаметр поршня цилиндра подъема стрелы или рабочее давление в контуре.

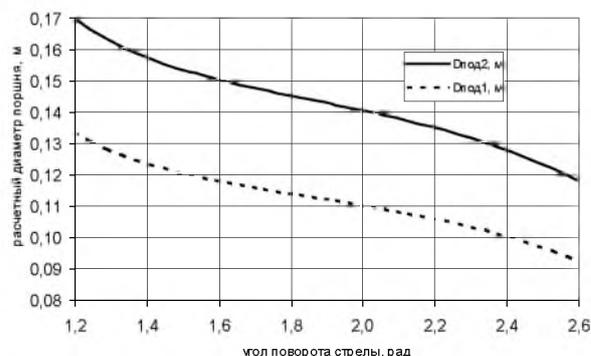


Рисунок 5 – Расчетный диаметр поршня при заданном давлении со втянутой (Dпод1) и выдвинутой (Dпод2) стрелой

## Заключение

Разработанная математическая модель механизма подъема телескопической стрелы погрузчика позволяет анализировать взаимное положение звеньев на различных углах её поворота, необходимый ход цилиндра подъема стрелы для обеспечения заданной высоты подъема груза, высоту подъема груза и дальность его выдвижения в различных положениях цилиндров подъема и выдвижения стрелы, ряд силовых факторов (нагрузки на гидроцилиндр и давление в нем) в зависимости от конструктивных параметров привода и координат крепления шарниров. Путем многовариантного анализа можно выбрать рациональные значения конструктивных параметров и выполнить параметрический синтез привода.

### Список литературы

- 1 Погрузчик телескопический. Характеристики и возможности. URL: <http://stronews.ru/pogruzchik-teleskopicheskij-xarakteristiki-i-vozmozhnosti/>
- 2 Погрузчик с телескопической стрелой Амкодор 527: Руководство по эксплуатации. Минск : ОАО «Амкодор», 2008.
- 3 Навроцкий К. Л. Теория и проектирование ГПП. М. : Машиностроение, 1989. 248 с.
- 4 Автомобили: Специализированный подвижной состав : уч. пособие / М. С. Высоцкий [и др.]; под общ. ред. М. С. Высоцкого, А. И. Гришкевича. Минск : Выш. шк., 1988. 160 с.
- 5 Богдан Н. В., Жилевич М. И., Автушко В. П. Моделирование динамических процессов в гидроприводе подъема стрелы манипулятора погрузочно-транспортной машины // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Харьков, 2001. Вып.129. Ч.2.С.31-52.
- 6 Шевченко В. С., Жилевич М. И. Математическая модель гидростатической передачи тягово-транспортной машины // Промышленная гидравлика и пневматика. 2010. №2. С.76-79.