

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ СТРЕЛЫ ДВУХЗВЕННОГО АВТОГИДРОПОДЪЕМНИКА

К.т.н. А.Г. Гурко, Н.В. Розенфельд, Ю.А. Доля, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*В рамках решения проблемы проектирования системы управления автогидроподъемником обеспечивающей перемещение его рабочего оборудования по наиболее рациональной траектории при ограничении ускорений, получено аналитическое решение задачи определения положения узловых точек двухзвенного механизма автогидроподъемника. Адекватность полученных результатов подтверждена экспериментально.*

*У рамках вирішення проблеми проектування системи керування автогідропідійомником, що забезпечує переміщення його робочого обладнання за найбільш раціональною траєкторією при обмеженні прискорень, одержано аналітичне розв'язання задачі визначення положення вузлових точок дволанкового механізму автогідропідійомника. Адекватність одержаних результатів підтверджено експериментально.*

*Within the framework of the issue of a hydaladder control system design, which provides the working equipment movement along the most efficient trajectory under accelerations limitation the analytical solution of the problem of the nodal points' position determination of a two-link hydaladder has been obtained. The adequacy of the results has been confirmed experimentally.*

**Ключевые слова:** автогидроподъемник, двухзвенный механизм, зона обслуживания, аналитическое решение

## Введение

Для проведения различного рода высотных работ (электромонтажные и монтажные работы, обслуживание и ремонт фасадов, светофоров, дорожных знаков, проведение спасательных операций, содержание лесопарковых зон, установка рекламных баннеров и т.д.) применяются специальные автогидроподъемники (АГП), которые можно рассматривать как универсальный вид специальной техники [1].

Главными преимуществами АГП являются мобильность, простота управления, универсальность.

В то же время АГП относятся к оборудованию повышенной опасности, так как от траектории и плавности перемещения люльки, зависит жизнь находящихся в ней рабочих.

## Постановка задачи

Непостоянный характер режима работы АГП, обусловленный частым переключением исполнительных гидроцилиндров, приводит к появлению динамических нагрузок, возникающих в следствие высоких амплитуд колебаний давления в гидроприводе и ускорений приводных механизмов. Причем нередко от этих колебаний вырывает поворотный круг из опорной рамы, выгибается верхняя секция стрелы или проваливается нижнее крепление гидроцилиндра подъема нижней

секции стрелы [2]. Таким образом возникает проблема обеспечения перемещения стрелы АГП по наиболее рациональной траектории при ограничении ускорений. Ее решение возможно только за счет внедрения системы автоматического управления (САУ).

На первом этапе проектирования такой САУ необходимо получить зависимости, связывающие значения величин и положение механизма АГП. Эти данные требуются для обеспечения перемещения рабочего оборудования по наиболее рациональной траектории при ограничении ускорений. Целесообразно иметь аналитическое решение задачи определения положения узловых точек механизма автогидроподъемника.

## Анализ публикаций

Как показал анализ литературы решению задач эффективной и безопасной эксплуатации АГП, за счет обеспечения плавности перемещения секций стрелы уделено недостаточно внимания. В [3] рассмотрена САУ движением АГП, определены желаемые законы изменения обобщенных координат и их скоростей при перемещении звеньев АГП из одного положения в другое, а управление движением стрелы АГП осуществляется ПД-регулятором.

В то же время достаточно обстоятельно рассмотрены аналогичные задачи для других видов строительной техники. В частности, исследования проф. Ловейкина В.С. и его учеников [4, 5, 6] посвящены уменьшению динамических нагрузок на рабочее оборудование кранов-манипуляторов.

В монографии [7] выполнен анализ строительного манипулятора, к которому можно отнести и АГП, как сложной динамической системы, состоящей из механической подсистемы, подсистемы гидропривода и подсистемы управления, а также рассмотрены алгоритмы работы системы автоматизированного моделирования оптимальной траектории рабочего органа строительного манипулятора. Однако при этом упор делался на автоматизацию проектирования машин, а вопросы управления рабочим процессом не рассматривались. В [8] разработана система снижения динамических нагрузок и гашения колебаний при движении стрелы лесного манипулятора.

Таким образом, анализ публикаций позволяет утверждать, что исследования, направленные на сокращение времени выполнения рабочих операций АГП при снижении динамических нагрузок за счет ограничения ускорений, являются актуальными. Для этого сначала необходимо определить возможные положения стрелы АГП. Решение указанной задачи является целью данной работы.

**Построение зоны обслуживания АГП**

В качестве примера рассматривался двухсекционный АГП (рис.1) с поворотными звеньями, находящийся на учебно-научной производственной базе (УНПБ) ХНАДУ.

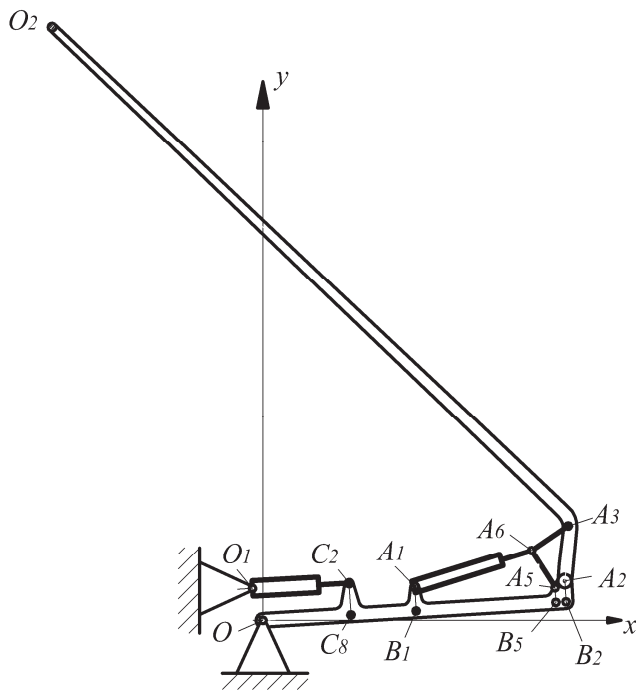


Рис.1. Схема экспериментального АГП

По результатам замеров были определены координаты точек присоединения гидроцилиндров (точки  $C_2$  и  $A_1$ ), а также координаты точек  $A_2$ ,  $A_5$  и  $A_3$  в системе координат, связанных с нижней секцией стрелы. Были также измерены расстояния между точками  $A_2$ ,  $A_3$  и  $O_2$  на верхней секции стрелы.

По полученным данным произведен расчет положений механизма для пяти значений длины гидроцилиндра  $O_1C_2$  управления нижней секцией (от 770 до 910 мм с шагом 35 мм) и пяти значений длины гидроцилиндра  $A_1A_6$  управления верхней секцией стрелы (от 1020 до 1400 мм с шагом 95 мм).

В качестве исходных данных были приняты постоянные величины:

- координаты шарниров, находящихся в нижней секции подъемника в связанной с этой секцией системе координат;
- горизонтальная и вертикальная координата шарнира крепления гидроцилиндра подъема колена к раме машины;
- расстояния  $C_2C_8$  и  $OC_8$ ,  $A_1B_1$  и  $OB_1$ ,  $A_5B_5$ ,  $OB_5$ ,  $A_2B_2$  и  $OB_2$ .

Полагалось также, что с помощью аутригеров рама подъемника установлена в горизонтальное положение. Координаты точки  $C_2$  были определены из треугольника  $OC_1C_2$  (см. рис.1):

$$OO_1 = \sqrt{xO_1^2 + yO_1^2}; \quad (1)$$

$$OC_2 = \sqrt{OC_8^2 + C_2C_8^2}; \quad (2)$$

$$O_1OC_2 = \arccos\left(\frac{OO_1^2 + OC_2^2 - O_1C_2^2}{2 \cdot OO_1 \cdot OC_2}\right). \quad (3)$$

По координатам точек  $O$  и  $O_1$  находился угол наклона стороны  $OO_1$  к горизонту

$$O_1Ox = \arctg\left(\frac{xO_1}{yO_1}\right). \quad (4)$$

Угол  $C_2OC_8$  при всех положениях механизма оставался постоянным

$$C_2OC_8 = \arctg\left(\frac{C_2C_8}{OC_8}\right). \quad (5)$$

Это позволило найти угол  $\alpha$  наклона нижней секции стрелы к горизонту

$$\alpha = O_1Ox - (O_1OC_2 + C_2OC_8). \quad (6)$$

Величины  $OA_1$ ,  $OA_2$  и  $OA_5$  определялись как гипотенузы треугольников  $OA_1B_1$ ,  $OA_2B_2$  и  $OA_5B_5$ :

$$OA_1 = \sqrt{OB_1^2 + A_1B_1^2}; \quad (7)$$

$$OA_2 = \sqrt{OB_2^2 + A_2B_2^2}; \quad (8)$$

$$OA_5 = \sqrt{OB_5^2 + A_5B_5^2}. \quad (9)$$

После этого были вычислены значения углов  $A_1OB_1$ ,  $A_2OB_2$ ,  $A_5OB_5$ :

$$A_1OB_1 = \arctg\left(\frac{A_1B_1}{OB_1}\right); \quad (10)$$

$$A_2OB_2 = a \tan\left(\frac{A_2B_2}{OB_2}\right); \quad (11)$$

$$A_5OB_5 = a \tan\left(\frac{A_5B_5}{OB_5}\right). \quad (12)$$

Углы  $C_2Ox$ ,  $A_1Ox$ ,  $A_2Ox$ ,  $A_5Ox$  определялись по зависимостям

$$C_2Ox = C_2OC_8 + \alpha; \quad (13)$$

$$A_1Ox = A_1OB_1 + \alpha; \quad (14)$$

$$A_2Ox = A_2OB_2 + \alpha; \quad (15)$$

$$A_5Ox = A_5OB_5 + \alpha. \quad (16)$$

Это дало возможность вычислить координаты точек  $C_2$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_5$ :

$$xC_2 = OC_2 \cos(C_2Ox); \quad (17)$$

$$yC_2 = OC_2 \sin(C_2Ox); \quad (18)$$

$$xA_1 = OA_1 \cdot \cos(A_1Ox); \quad (19)$$

$$yA_1 = OA_1 \cdot \sin(A_1Ox); \quad (20)$$

$$xA_2 = OA_2 \cdot \cos(A_2Ox); \quad (21)$$

$$yA_2 = OA_2 \cdot \sin(A_2Ox); \quad (22)$$

$$xA_5 = OA_5 \cdot \cos(A_5Ox); \quad (23)$$

$$yA_5 = OA_5 \cdot \sin(A_5Ox). \quad (24)$$

Координаты точки  $A_6$  (шарнир штока гидроцилиндра управления верхней секцией стрелы) найдены как координаты точек пересечения окружности радиусом  $A_1A_6$  с центром в точке  $A_1$  и окружности радиусом  $A_5A_6$  с центром в точке  $A_5$ :

$$\left. \begin{aligned} (x - xA_1)^2 + (y - yA_1)^2 &= (A_1A_6)^2 \\ (x - xA_5)^2 + (y - yA_5)^2 &= (A_5A_6)^2 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Система уравнений (25) имеет два решения. Для дальнейших вычислений выбирается пара координат  $xA_6$  и  $yA_6$ , для которой  $yA_6$  имеет большее значение.

Поскольку координаты точек  $A_2$  и  $A_6$  известны, вычислялась длина отрезков  $A_2A_5$  и  $A_5A_6$ :

$$A_2A_5 = \sqrt{(xA_2 - xA_5)^2 + (yA_2 - yA_5)^2}; \quad (26)$$

$$A_5A_6 = \sqrt{(xA_5 - xA_6)^2 + (yA_5 - yA_6)^2}. \quad (27)$$

Затем вычислялись значения углов  $A_5A_6x$  и  $A_3A_6A_5$ :

$$A_3A_6A_5 = a \cos\left(\frac{A_3A_6^2 + A_5A_6^2 - A_3A_5^2}{2 \cdot A_3A_6 \cdot A_5A_6}\right). \quad (28)$$

Угол  $A_3A_6x$  определился через углы  $A_5A_6x$  и  $A_3A_6A_5$ :

$$A_3A_6x = A_3A_6A_5 + A_5A_6x. \quad (29)$$

Это позволило определить координаты точки  $A_3$ :

$$yA_3 = yA_6 + A_3A_6 \cdot \sin(A_3A_6x); \quad (30)$$

$$xA_3 = xA_6 + A_3A_6 \cdot \cos(A_3A_6x). \quad (31)$$

Угол  $O_2A_5A_3$  найден из треугольника  $O_2A_5A_3$ :

$$O_2A_5A_3 = a \cos\left(\frac{O_2A_5^2 + A_3A_5^2 - O_2A_3^2}{2 \cdot O_2A_5 \cdot A_3A_5}\right). \quad (32)$$

Затем были найдены значения углов  $A_3O_5x$  и  $O_2A_5x$ :

$$A_3A_5x = a \sin\left(\frac{yA_3 - yA_5}{A_3A_5}\right); \quad (33)$$

$$O_2A_5x = O_2A_5A_3 + A_3A_5x. \quad (34)$$

Наконец, найдены координаты вершины верхней секции стрелы

$$xO_2 = xA_5 + O_2A_5 \cdot \cos(O_2A_5x); \quad (35)$$

$$yO_2 = yA_5 + O_2A_5 \cdot \sin(O_2A_5x). \quad (36)$$

В результате была получена зона обслуживания машины (рис. 2), где  $L_1$  – длина гидроцилиндра управления нижней секцией стрелы;  $L_2$  – длина гидроцилиндра управления верхней секцией стрелы.

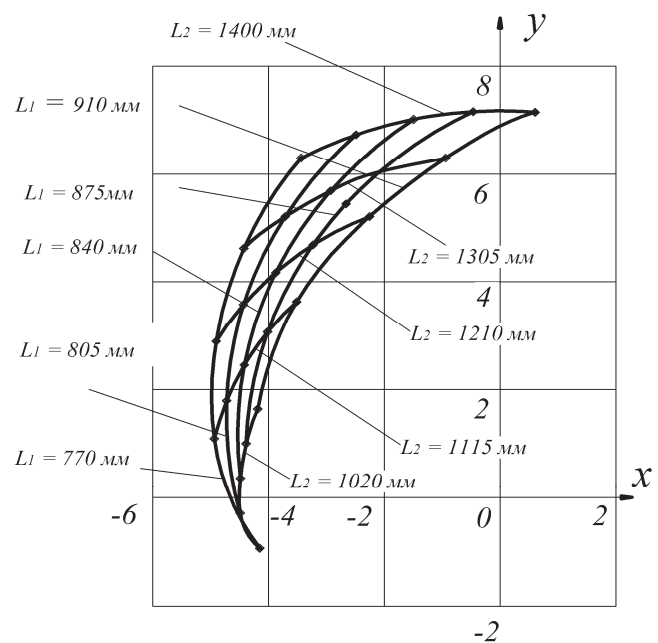


Рис.2. Зона обслуживания АГП

### Экспериментальная часть

Для проверки полученного аналитического решения задачи кинематики АГП на УНПБ ХНАДУ была проведена серия экспериментов над двухзвенным АГП, совершающим вращательные движения. Измерение угловых положений секций стрелы АГП осуществлялось цифровым электронным угломером Bosch PAM 220, имеющим погрешность измерения  $0,2^\circ$ .

Результаты расчета положений механизма АГП были проверены экспериментально. Для различных значений выдвигения штока гидроцилиндра управления нижней секцией механизма определялся угол наклона верхней секции стрелы.

Некоторые результаты проверки для верхней и нижней секций стрелы приведены в табл. 1 и табл. 2,

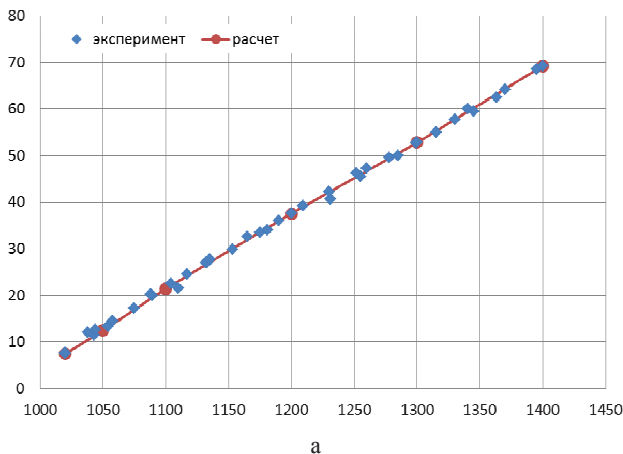
соответственно, а также отображены на рис. 3. Как видно из табл. 1, 2 полученное решение является верным: во всех случаях, кроме одного, относительная погрешность определения положений АГП аналитическим и экспериментальными методами значительно меньше 1%.

Таблица 1  
Сравнение результатов расчета положения верхней секции стрелы с опытными данными

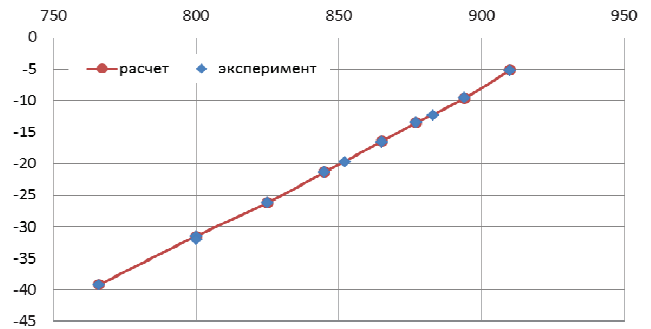
Длина гидроцилиндра управления верхней секцией механизма	Угол наклона верхней секции стрелы, град.		Относительная погрешность, %
	Расчет	Эксперимент	
1020	7,47	7,5	0,40
1050	12,47	13,0	4,08
1100	21,44	21,6	0,74
1200	37,56	37,6	0,11
1300	52,8	52,8	0,00
1400	69,3	69,2	-0,14

Таблица 2  
Сравнение результатов расчета положения нижней секции стрелы с опытными данными

Длина гидроцилиндра управления нижней секцией механизма	Угол наклона нижней секции стрелы, град.		Относительная погрешность, %
	Расчет	Эксперимент	
766	- 39,18	- 39,2	- 0,05
800	- 31,47	- 31,5	- 0,10
825	- 26,2	- 26,2	0,00
845	- 21,35	- 21,3	0,23
865	- 16,48	- 16,6	- 0,73
877	- 13,55	- 13,5	0,37
894	- 9,65	- 9,6	0,52
910	- 5,16	- 5,2	- 0,78



а



б

а – верхняя секция, б – нижняя секция  
Рис. 3. Расчетные зависимости угловых положений секций стрелы АГП от выдвигания штоков и экспериментальные данные

Кроме того, из рис. 3 хорошо видно, что зависимости угловых положений секций стрелы АГП от выдвигания штоков исполнительных гидроцилиндров является практически линейной, что значительно облегчает синтез системы управления.

### Выводы

Повышение эффективности и безопасности эксплуатации является актуальной проблемой, которая может быть решена только путем внедрения соответствующей САУ. Одним из первых этапов при синтезе такой САУ являлось решение кинематической задачи, которая заключалась в определении положения узловых точек механизма. В данной работе получено аналитическое решение указанной задачи, его адекватность подтверждена экспериментально.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Гудков Ю.И. Автомобильные подъемники и вышки / Ю.И. Гудков, Н.П. Сытник. – К.: Основа, 2004. – 208 с.
2. Верх [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://verh.org.ua/knew.html> / – Название с экрана.
3. Гурко А.Г. Разработка системы управления движением автогидроподъемника // А.Г.Гурко, И.Г. Кириченко / Сб. науч. праць: Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. Серія: Підійомно - транспортні, будівельні і дорожні машини і обладнання – 2014. – С. 210-220.
4. Ловейкін В.С. Области збереження енерговитрат у вантажних маніпуляторах на транспортних засобах / В.С. Ловейкін, Д.О. Міщук // Гірничі та піднімально-транспортні машини. – 2009. – № 75 – С. 37-42.
5. Ловейкін В.С. Оптимізація режиму пуску висувної рукояті крана-маніпулятора під час горизонтального переміщення вантажу з урахуванням його коливань / В.С. Ловейкін, Д.О. Міщук // Гірничі та піднімально-транспортні машини. – 2010. – № 76. – С. 3-8.
6. Ловейкін В.С. Експериментальне дослідження динаміки руху штока гідроциліндра підйому шарнірно-зчленованої стрілової системи крана-маніпулятора з гідроприводом / В.С. Ловейкін, Д.О. Міщук // Гірничі та піднімально-транспортні машини. – 2011. – № 78 – С. 28-34.
7. Щербаков В.С. Автоматизація моделювання оптимальної траєкторії движіння робочого органа строительного манипулятора: монографія / В.С. Щербаков, И.А. Реброва, М.С. Корытов. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2009. – 106 с.
8. Попиков П.И. Математическое моделирование процессов в системе гидропривода лесных манипуляторов / П.И. Попиков, П.И. Титов, А.А. Сидоров и др. // Научный журнал КубГАУ. – 2011. – № 69(5) – С. 1-11.