

Кызыров Кайрулла Бейсенбаевич¹, канд. техн. наук, профессор, **Митусов Анатолий Алексеевич**², доктор техн. наук, профессор, **Исаев Валерий Львович**¹, канд. техн. наук, старший преподаватель, **Решетникова Ольга Стасисовна**¹, старший преподаватель

¹Карагандинский государственный технический университет, 100027, Казахстан, г. Караганда, ул. Бульвар Мира, 56

²Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 656038, Российская Федерация, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

E-mail: olga.reshetnikova.80@mail.ru

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОЧИХ ЦИКЛОВ ГИДРООБЪЕМНЫХ УДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Аннотация:

В статье представлены проектировочные исследования, постановка которых обусловлена особенностями конкретной задачи создания гидрообъемных ударных механизмов в соответствии с выполнением календарного плана темы грантового финансирования «Создание и исследование гидравлического механизма ударного действия для производства горных и строительных работ» по заказу Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2018-2020 гг.

В статье приведено решение задачи по определению параметров идеального закона управления и движения бойка гидрообъемного ударного механизма с двумя управляемыми камерами, позволяющего определить предельные возможности последнего согласно принятым критерию оптимизации и ограничениям.

Решение уравнения движения бойка в замкнутом рабочем цикле позволило установить зависимости ограничений, а также параметров управления и движения бойка от составляющих ударной мощности, коэффициента отскока и соотношения усилий холостого и рабочего ходов. Поскольку ударная мощность задана, а коэффициент отскока является неконтролируемым параметром, то задача свелась к определению соотношений усилий холостого и рабочего ходов соответствующих минимуму ограничений, в результате чего определены параметры идеального закона движения бойка для структуры с двумя управляемыми камерами.

Ключевые слова: оптимизация, гидроударник, боек, энергия удара, целевая функция.

Информация о статье: принята 01 февраля 2019 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-20-25

Предлагаемый методический подход актуален для проектирования высокочастотных гидроударников, применяемых в горной промышленности и строительстве, например, при шпуровом бурении, разрушения асфальтобетонных покрытий, машинах для ремонта горных выработок. Производительность этих машин напрямую зависит от ударной мощности [1]. Энергия удара ограничивается прочностью инструмента и может быть получена при различных сочетаниях массы и предударной скорости. Верхний предел скорости ограничивается пластическими деформациями соударяющихся тел.

При решении вопросов оптимизации рабочих циклов необходимо учитывать специфику гидроударников, заключающуюся в том, что в течение всего цикла происходит неустановившееся движение жидкости в подводящих и отводящих каналах [2]. Масса жидкости на участках от эффективной поверхности бойка в камерах холостого и рабочего ходов до стабилизаторов потока сильно влияет на динамические процессы.

Присоединенная масса жидкости прямо пропорциональна площадям рабочих поверхностей бойка,

которые определяются необходимыми усилиями F_1 и F_2 в рабочих камерах ударного механизма.

Из этого следует, что в гидроударниках критерием оптимизации следует принимать сумму модулей управляющих воздействий $|F_1| + |F_2|$, обеспечивающих заданную энергию и частоту ударов при ограничении на максимально допустимую скорость соударения.

Определение идеального рабочего цикла ударного механизма позволяет получить закон управления и соответствующий ему закон движения бойка, обусловленный предельными возможностями гидрообъемных ударных механизмов согласно принятым критерию оптимизации и ограничениям. Идеальность этого закона характеризуется тем, что при его определении не принимаются во внимание конструктивные особенности устройства [3-5].

Применительно к принципиальной схеме ударного механизма с двумя управляемыми камерами (рис. 1,а) задача сводится к определению такого закона управления и движения бойка B , который при заданном критерии оптимизации (энергии удара A , времени рабочего цикла T), заданной скорости соударения V_y , известном коэффициенте отскока k

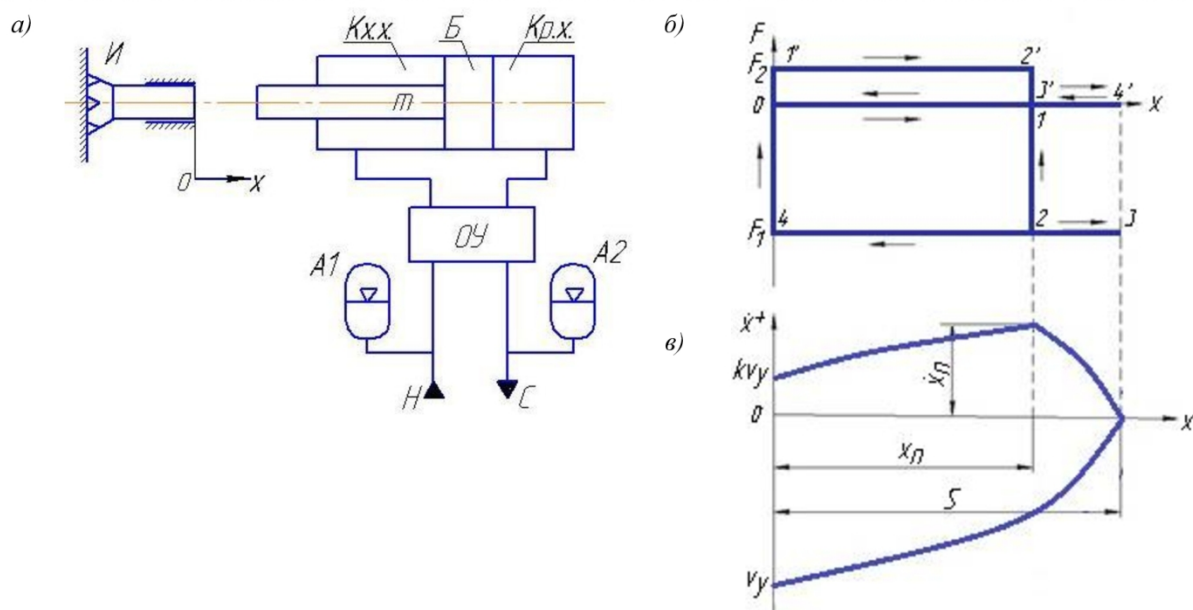


Рис. 1. Структура ударного механизма (а) с управляемыми камерами устройств холостого и рабочего ходов; фазовое управление (б) и фазовая траектория (в):
Б – боек; m – масса бойка; $K_{р.х.}$ – камера рабочего хода; $K_{х.х.}$ – камера холостого хода; И – инструмент; ОУ – орган управления; А1, А2 – гидропневмоаккумуляторы

обеспечил бы минимум ограничения $|F_1| + |F_2|$, где F_1 – сила давления жидкости в камере рабочего хода $K_{р.х.}$, F_2 – сила давления жидкости в камере холостого хода $K_{х.х.}$.

Движение бойка представим в виде дифференциального уравнения второго порядка [6, 7]

$$m\ddot{x}(t) = F(t), \quad (1)$$

где m – масса бойка, соударяющегося с инструментом И;

$F(t)$ – периодически изменяющаяся сила в фазах рабочего цикла.

Из опыта расчета аналогичных схем [8-11], известно, что наиболее широкой является зона устойчивости, соответствующая одному соударению массы с инструментом за один период изменений сил. Поэтому нас будет интересовать только такое движение массы, когда она ударяется по инструменту через каждые T секунд. Отсчет времени будем вести от момента соударения. Тогда взаимодействие бойка с инструментом представим следующим образом:

при $x = 0$,

$$\dot{x} = \begin{cases} \dot{x}^- = -V_y \\ \dot{x}^+ = -kV_y \end{cases} \quad (2)$$

где \dot{x}^- и \dot{x}^+ – скорость бойка до и после соударения;

k – коэффициент отскока.

Время соударения бойка с инструментом в соответствии с результатами многих исследований составляет примерно 10^{-4} с. Эта величина значительно меньше периода колебаний бойка современных машин ($T \approx 2 \cdot 10^{-2}$ с) [8-11]. Столь малое время соударения позволяет считать, что изменение знака скорости бойка после удара происходит

практически мгновенно и при описании его можно не учитывать.

Отсутствие соударения в конце холостого хода представим в виде

$$\dot{x} = \begin{cases} \dot{x}^- = 0 \\ \dot{x}^+ = 0 \end{cases} \text{ при } x = S, \quad (3)$$

где S – амплитуда перемещения бойка.

Кроме того, движение бойка должно быть периодическим, т.е. для произвольного момента времени должно выполняться условие

$$\int_t^{t+T} \dot{x}(t) dt = 0. \quad (4)$$

В работах [3,12,13] математически строго с использованием принципа максимума Л.С. Понтрягина доказано, что в случае, когда рабочий орган имеет одну степень свободы, оптимальное управление представляет собой кусочно-постоянную функцию с одним релейным переключением в течение цикла. Следовательно, вид функции управления известен.

На рис. 1,б приведен вид функции управления бойка, а на рис. 1,в его фазовая траектория. Если время t отсчитывать от момента после каждого удара, а отсчет координаты перемещения вести от точки соударения, то начальное и конечное фазовые состояние бойка массой m можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} x(0) &= 0, \\ x(T-0) &= 0, \dot{x}(0) = kV_y; \dot{x}(T-0) = -V_y \end{aligned}$$

Обозначим модуль управляющего воздействия в камере холостого хода через $|F_2|$, а модуль управляющего воздействия в камере рабочего хода $|F_1|$. Координату и время переключения управления обозначим через x_n и t_n . Таким образом, решаемую задачу

можно сформулировать следующим образом: среди всех управлений вида (рис. 1,б), под воздействием которых боек переходит из заданного начального фазового состояния (5) в конечное фазовое состояние (6) за время T и при этом выполняются условия (1), (2), (3), найти такое, для которого этот переход осуществляется при минимальном значении ограничения $|F_1| + |F_2|$.

Разобьём весь период движения бойка на три фазы: фаза возврата (холостой ход) $[0 \leq x \leq x_n; 0 \leq t \leq t_1]$; фаза торможения $[x_n \leq x \leq S; t_1 \leq t \leq t_2]$; фаза рабочего хода $[S \geq x \geq 0; t_2 \leq t \leq t_3]$.

Из баланса энергии определим величину перемещения на соответствующих фазах цикла движения бойка.

В конце рабочего хода энергия бойка равна энергии удара

$$A = F_1 S, \quad (7)$$

$$\text{Откуда, } S = \frac{A}{F_1}.$$

В начале цикла боек имеет скорость kV_y и, следовательно, обладает энергией $k^2 A$. В момент переключения управления ударная масса будет обладать энергией $k^2 A + F_2 x_n$. Условие (3) запишем в виде

$$k^2 A + F_2 x_n - F_1 (S - x_n) = 0. \quad (8)$$

Тогда, учитывая (7), из (8) получим

$$x_n = \frac{A(1-k^2)}{F_1 + F_2} \quad (9)$$

Модуль управляющего воздействия $|F_1|$ выразим через соотношение

$$|F_2| = c|F_1|, \quad (10)$$

тогда

$$x_n = \frac{A}{F_1} \frac{1-k^2}{1+c} \quad (11)$$

величина перемещения в фазе торможения

$$x_\tau = S - x_n = \frac{A}{F_1} \frac{c+k^2}{1+c}. \quad (12)$$

В фазе возврата бойка дифференциальное уравнение (1) примет вид

$$m\ddot{x} = F_2, \quad 0 \leq t \leq t_1,$$

или после преобразования

$$\ddot{x} = \frac{cF_1}{m}. \quad (13)$$

Решая уравнение (13), получим

$$\dot{x} = \frac{cF_1}{m} t + D_1; \quad (14)$$

$$x = \frac{cF_1}{2m} t^2 + D_1 t + D_2. \quad (15)$$

Постоянные интегрирования D_1, D_2 и значение времени t_1 определим из условий (5) и (11):

$$\text{при } t = 0 \quad \dot{x} = kV_y = k\sqrt{\frac{2A}{m}}, \quad x = 0;$$

$$\text{при } t = t_1 \quad x = x_n = \frac{A}{F_1} \frac{1-k^2}{1+c}, \quad \dot{x} = \dot{x}_n,$$

откуда

$$D_1 = k\sqrt{\frac{2A}{m}}, \quad D_2 = 0.$$

Подставив полученные выражения в (15), получим

$$x_n = \frac{A}{F_1} \frac{1-k^2}{1+c} = \frac{cF_1}{2m} t_1^2 + k\sqrt{\frac{2A}{m}} t_1. \quad (16)$$

Решив квадратный трехчлен (16), получим

$$t_1 = \frac{\sqrt{2Am}}{F_1 c} \left(\sqrt{\frac{k^2+c}{1+c}} - k \right). \quad (17)$$

Подставив t_1 в (14), получим скорость бойка в момент переключения \dot{x}_n

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{2A}{m} \cdot \frac{c+k^2}{1+c}}. \quad (18)$$

Во второй $[t_1 \leq t \leq t_2]$ и третьей $[t_2 \leq t \leq T]$ фазах движения уравнение (1) примет вид

$$\ddot{x} = -\frac{F_1}{m},$$

проинтегрировав которое, получим

$$\dot{x} = -\frac{F_1}{m} t + D_3,$$

$$x = -\frac{F_1}{2m} t^2 + D_3 t + D_4.$$

Постоянные интегрирования D_3, D_4 и значение времени t_2 определим следующим образом. В момент времени t_1 скорость и перемещение бойка не должны иметь скачков:

$$\text{при } t = t_1 \quad \dot{x} = \dot{x}_n,$$

тогда

$$D_3 = \dot{x}_n + \frac{F_1}{m} t_1 = \sqrt{\frac{2A}{m} \cdot \frac{c+k^2}{1+c}} + \frac{F_1}{m} t_1. \quad (19)$$

В момент времени $t = t_2$ скорость бойка равна $\dot{x} = 0$, тогда

$$D_3 = \frac{F_1}{m} t_2. \quad (20)$$

Приравняв (19) и (20), получим

$$t_2 = t_1 + \frac{\sqrt{2Am}}{F_1} \cdot \sqrt{\frac{c+k^2}{1+c}}. \quad (21)$$

В момент времени T скорость бойка равна предударной скорости $\dot{x} = -V_y$, тогда

$$D_3 = \frac{F_1}{m} T - V_y = \frac{F_1}{m} T - \sqrt{\frac{2A}{m}}. \quad (22)$$

Приравняв (20) и (22), получим

$$T = t_2 + \frac{\sqrt{2Am}}{F_1},$$

которое, воспользовавшись выражениями (17) и (21), приведем к виду

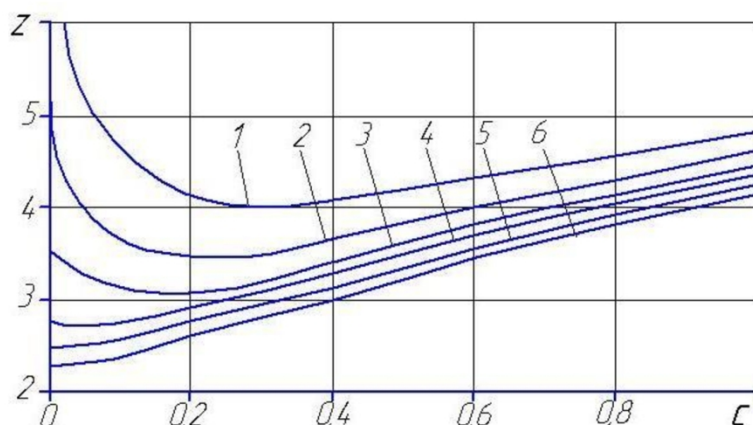


Рисунок 2 - Зависимость целевой функции z от соотношения модулей усилий c в камерах холостого и рабочего ходов:

1,2,3,4,5,6 – кривые для коэффициента отскока $k = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ соответственно

Таблица 1 - Оптимальные значения целевой функции z_{opt} соотношения усилий c_{opt} при различных коэффициентах отскока k

k	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
c_{opt}	0,33	0,24	0,14	0,04	0,0	0,0
z_{opt}	4,0	3,6	3,2	2,8	2,45	2,25

Таблица 2 - Значения целевой функции z при различных коэффициентах отскока в случае $c=0$

k	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
z	∞	6,05	3,6	2,82	2,45	2,25

$$T = \frac{\sqrt{2A \cdot m}}{F_1} \left[\frac{c + \sqrt{(k^2 + c) \cdot (1 + c)} - k}{c} \right], \quad (23)$$

откуда

$$F_1 = \frac{\sqrt{2A \cdot m}}{T} \left[\frac{c + \sqrt{(k^2 + c) \cdot (1 + c)} - k}{c} \right]. \quad (24)$$

Так как $|F_2|$ и $|F_1|$ связаны соотношением (10), то можем записать выражение главного ограничения в виде

$$|F_1| + |F_2| = \frac{\sqrt{2A \cdot m}}{T} (1 + c) \left[\frac{c + \sqrt{(k^2 + c) \cdot (1 + c)} - k}{c} \right]. \quad (25)$$

С учетом (24) выражения (7), (11), (17) преобразуются к следующему виду:

- для амплитуды перемещения бойка

$$S = \sqrt{\frac{A}{2m}} \cdot T \cdot \frac{c}{\alpha_1}, \quad (26)$$

где $\alpha_1 = c + \sqrt{(k^2 + c) \cdot (1 + c)} - k$;

- для перемещения бойка в течении первой фазы движения

$$x_n = \sqrt{\frac{A}{2m}} T \cdot \frac{c(1 - k^2)}{\alpha_1}, \quad (27)$$

- для продолжительности первой фазы движения

$$t_n = t_1 = T \cdot \frac{1}{\alpha_1} \left(\sqrt{\frac{k^2 + c}{1 + c}} - k \right). \quad (28)$$

Продолжительность фазы торможения

$$t_m = t_2 - t_1 = T \frac{c}{\alpha_1} \sqrt{\frac{k^2 + c}{1 + c}}, \quad (29)$$

время рабочего хода

$$t_{p,x} = T - t_2 = T \frac{c}{\alpha_1}. \quad (30)$$

Анализ выражения (25) показывает, что величина ограничения при определенных значениях A , m , T , k зависит от коэффициента c . Следовательно, необходимо определить такое c , при котором величина $|F_1| + |F_2|$ была бы минимальной. Тогда уравнение (25) представим в виде:

$$|F_1| + |F_2| = \frac{\sqrt{2A \cdot m}}{T} \cdot z,$$

где z - целевая функция.

Дифференцируя целевую функцию z по аргументу c и приравнявая производную нулю, получим уравнение

$$2(c^2 + k) \sqrt{(1 + c) \cdot (c + k^2)} - k^2(2 + c - c^2) - c(1 - c - 2c^2) = 0,$$

решение которого позволяет найти оптимальное соотношение c_{opt} управляющих усилий в зависимости от коэффициента отскока k . Аналитическое решение получается лишь при $k = 0$, тогда $c_{opt} = 0.33$. Для определения c_{opt} при других значениях коэффициента отскока, а также для выявления

степени влияния коэффициента c на величину целевой функции z , произведены исследования численным методом. Результаты этих исследований представлены графически (рис. 2). Анализ результатов расчета показывает, что с увеличением соотношения c значение функции z убывает, достигая минимума при c_{opt} , а затем растет. Причем для каждого коэффициента отскока существует определенное оптимальное состояние c_{opt} .

Оптимальное значение целевой функции z_{opt} и соответствующие ей соотношения c_{opt} при различных коэффициентах отскока сведены в таблицу 1.

Целевая функция определена при любых значениях коэффициента c , за исключением случая, когда $c=0$, при котором получается неопределенность типа $\frac{0}{0}$. В результате решения полученной неопределенности с помощью правила Лопиталя [14,15], получим

$$Z_{c=0} = 1 + \frac{1+k^2}{2k}. \quad (31)$$

Значения $z_{c=0}$ при различных коэффициентах отскока сведены в таблицу 2.

Таким образом, подставив c_{opt} в выражения (24), (10), (18), (26) - (30), определим параметры идеального закона управления и движения бойка рассматриваемой структуры. Для удобства применения полученных результатов, определен аппроксимирующий полином первой степени $c_{opt} = f(k)$ по методу наименьших квадратов

$$c_{opt} = 0,34 - k, \quad k \in (0 \div 0,34). \quad (32)$$

Итак, в результате решения поставленной задачи определены параметры идеального закона управления и движения, позволяющие определить предельные возможности рассматриваемой структуры согласно принятому критерию оптимизации и ограничению. Причем полученные данные можно использовать при синтезе механизмов как с вынужденным, так и с автоматическим распределением жидкости. Комплекс определенных параметров $(F_1, F_2, c_{opt}, t_n, t_m, x_n, S, \dot{x}_n)$ достаточен для синтеза практически любого органа управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подэрри Р.Ю. Механическое оборудование карьеров: Учебник для вузов. – 8-ое изд., перераб. и доп. – М.: Издательство «Майнинг Медиа Групп», 2013. – 594 с.

2. Ушаков Л.С. Импульсные технологии и гидравлические ударные механизмы: Учебное пособие для вузов. – Орел: ОрелГТУ, 2009. – 250 с.

3. Ашавский А.М. Установление оптимальных параметров и характеристик забойных машин ударно-вращательного бурения.

4. Эпштейн Е. Ф., Дудля Н. А. Буровые машины и механизмы. Учеб. пособие/ М-во высш. и сред. спец. образования УССР. Днепропетр. горный ин-т им. Артема. – Днепропетровск, 1975. – 20 с.

5. Янцен И.А., Ешуткин Д.Н., Бородин В.В. Основы теории и конструирования гидропневмоударников. Кемерово: Кемеровское книжное издательство, 1977. – 245с.

6. Тимонин В.В. Оптимизация соотношений конструктивных параметров погружной гидравлической ударной машины объемного типа [Текст] / В.В. Тимонин. Труды научной конференции с участием иностранных ученых // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды. Новосибирск, 2007, с. 51–53.

7. Решетникова О.С. Исследование характеристик движения бойка гидравлического молота. Горный информационно-аналитический бюллетень. – М: Изд. «Горная книга», 2015. – №11. – С. 408 - 410.

8. Vladeanu A., Vladeanu G. Contributions regarding the modeling of hydraulic hammers used in construction. Bucharest, SISOM-2004. – P.

9. Лавендел Э.Э. Синтез оптимальных вибромашин. Рига: Зинатне, 1970. – 252 с.

10. Митусов А. А. Двухтактные гидродвигатели ударного действия: Основы теории и расчет. Монография. – Россия, Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. университета, 2013. – 392 с.

11. Ушаков Л. С., Котылев Ю. Е., Кравченко В. А. Гидравлические машины ударного действия. – М.: Изд-во Машиностроение, 2000. – 416 с.

12. Ашавский А.М., Вольперт А.Я., Шейнбаум В.С. Силовые импульсные системы. М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.

13. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. М.: Наука. – 1966. – 408 с.

14. Математические методы исследования оптимального управления на классе кусочно-постоянных управлений / К.В. Миронова, А.В. Кузнецов. – М.: Гор. линия-Телеком, 2015. – 142 с.:

15. Правила Лопиталя. Примеры решений http://mathprofi.ru/pravila_lopitalya.html

Kayrulla B. Kyzyrov¹, C. Sc. in Engineering, Professor, Anatoly A. Mitusov², Dr. Sc. in Engineering, Professor, Valery L. Isayev¹, C. Sc. in Engineering, Senior Lecturer, Olga S. Reshetnikova¹, Senior Lecturer

¹Karaganda State Technical University, 56 Bulvar Mira, Karaganda, 100027, Kazakhstan

²Polzunov Altai State Technical University, Lenina avenue, 46, Barnaul, 656038, Russian Federation.

TO THE ISSUE OF OPTIMIZATION OF WORKING CYCLES OF HYDROSTATIC IMPACT MECHANISMS

Abstract: The article presents design studies, the formulation of which is due to the specific features of the creation of hydrostatic impact mechanisms in accordance with the implementation of the calendar plan of the grant financing

theme "Creation and study of a hydraulic impact mechanism for mining and construction works" commissioned by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan for 2018 -2020 years.

The article contains the solution of the problem of determining the parameters of the ideal control and movement law of the striker of hydrostatic mechanism with two controlled chambers, that allows to determine the limiting capabilities of hydraulic impact mechanisms according to the accepted optimization criteria and limitations.

Solving the equation of movement of the striker in a closed working cycle made it possible to establish the dependencies of the constraints, the parameters of the striker control and movement on the components of impact power, the rebound coefficient and the ratio of forces in the idle and working chambers. Since the impact power is set, and the rebound coefficient is an uncontrolled parameter, the task has been reduced to determining the ratio of the efforts of the idle and working chambers corresponding to the minimum constraints. As a result, the parameters of the ideal striker movement law are defined for the structure with two controllable chambers.

Keywords: optimization, hydraulic hammer, impact energy, striker, objective function.

Article info: received February 01, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-1-20-25

REFERENCES

1. Poderni R.YU. Mekhanicheskoe oborudovanie kar'erov: Uchebnik dlya vuzov. – 8-oe izd., pererab. i dop. – M.: Izdatel'stvo «Majning Media Grupp», 2013. – 594 s.
2. Ushakov L.C. Impul'snye tekhnologii i gidravlicheskie udarnye mekhanizmy: Uchebnoe posobie dlya vuzov. - Orel: OrelGTU, 2009. - 250 s.
3. Ashavskij A.M. Ustanovlenie optimal'nyh parametrov i harakteristik zaboynyh mashin udarno-vrashchatel'nogo bureniya.
4. Epshtejn E. F., Dudlya N. A. Burovye mashiny i mekhanizmy. Ucheb. posobie/ M-vo vyssh. i sred. spec. obrazovaniya USSR. Dnepropetr. gornyj in-t im. Artema. - Dnepropetrovsk, 1975. - 20 s.
5. Yancen I.A., Eshutkin D.N., Borodin V.V. Osnovy teorii i konstruirovaniya gidropnevmodarnikov. Kemerovo: Kemerovskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1977. – 245s.
6. Timonin V.V. Optimizaciya sootnoshenij konstruktivnyh parametrov pogruzhnoj gidravlicheskoj udarnoj mashiny ob'emnogo tipa [Tekst] / V.V. Timonin. Trudy nauchnoj konferencii s uchastiem inostrannyh uchennyh // Fundamental'nye problemy formirovaniya tekhnogennoj geosredy. Novosibirsk, 2007, s. 51–53.
7. Reshetnikova O.S. Issledovanie harakteristik dvizheniya bojka gidravlicheskogo molota. Gornyj

informacionno-analiticheskij byulleten'. - M: Izd. «Gornaya kniga», 2015. - №11.- S. 408 - 410.

8. Vladeanu A., Vladeanu G. Contributions regarding the modeling of hydraulic hammers used in construction. Bucharest, SISOM-2004. – R.

9. Lavendel E.E. Sintez optimal'nyh vibromashin. Riga: Zinatne, 1970. - 252 s.

10. Mitusov A. A. Dvuhfaktornye gidrodvigateli udarnogo dejstviya: Osnovy teorii i raschet. Monografiya. - Rossiya, Sankt-Peterburg, Izd-vo Politekh. universiteta, 2013. – 392 s.

11. Ushakov L. S., Kotylev YU. E., Kravchenko V.A. Gidravlicheskie mashiny udarnogo dejstviya. - M.: Izd-vo Mashinostroenie, 2000. - 416 s.

12. Ashavskij A.M., Vol'pert A.YA., SHEjnbaum V.S. Silovye impul'snye sistemy. M.: Mashinostroenie, 1978. – 200 s.

13. Boltyanskij V.G. Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniya. M.: Nauka. – 1966. – 408 s.

14. Matematicheskie metody issledovaniya optimal'nogo upravleniya na klasse kusochno-postoyannyh upravlenij / K.V. Mironova, A.V. Kuznecov. - M.: Gorn. liniya-Telekom, 2015. - 142 s.:

15. Pravila Lopitalya. Primery reshenij http://math-profi.ru/pravila_lopitalya.html

Библиографическое описание статьи

Кызыров К.Б., Митусов А.А., Исаев В.Л., Решетникова О.С. К вопросу оптимизации рабочих циклов гидрообъемных ударных механизмов // Горное оборудование и электромеханика — 2019. — № 1 (141). — С. 20-25.

Reference to article

Kyzyrov K.B., Mitusov A.A., Isayev V.L., Reshetnikova O.S. To the issue of optimization of working cycles of hydrostatic impact mechanisms. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 1 (141), pp. 20-25.