

УДК 621.01

Усубалиев Ж.

*к.т.н., г.н.с. Института машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР*

Кынатбекова Н.Н.

*н.с. Института машиноведения, автоматики и геомеханики НАН КР*

## ДИНАМИКАЛЫК БАЙЛАНЫШКАН ТҮЗҮМҮ ӨЗГӨРҮЛМӨ СОККУЛУК МЕХНИЗМДИН УРГУЧУНУН АРТКА СЕКИРҮҮ ЖАРАЯНЫН ИЗИЛДӨӨ

Бул жумушта изилдөөнүн предмети болуп тоо-кен казып алуу, курулуш тармактарында жана оңдоо-калыбына келтирүү жана жол жумуштары үчүн пайдалануучу катуу материалдарды бөлүүгө арналган түзүмү өзгөрүлмө кол урма механизми эсептелет. Бул жумушта аспапка энергия бергенден кийин динамикалык байланышкан түзүмү өзгөрүлмө механизмдин сокку уруусун изилдөө жараяны каралат. Сокку механизми айлануучу ротордон жана өзөк түрүндөгү эки тээктен - ургучтан турат, алардын аягында сокку массасы топтолгон. Изилдөөнүн максаты – механизмдин иштешинин туруктуулугун камсыз кылуу, б.а. бир мерчимде - циклда аспап менен сокку массасынын сокку чекитине чыгышын камсыз кылуу. Ургучтун сокку учурундагы жана аспап менен кагылышкандан кийинки бурчтук ылдамдыгы менен айлануу бурчунун өзгөрүшүн байланыштырган аналитикалык теңдемелер чыгарылды. Бул теңдемелер эки башка жолду камтыйт: ургучтун кыймылынын мүнөзүнө таасир эткен импульстун күчүнүн моментин камтыйт, маселени чечүүнү жөнөкөйлөтүүгө мүмкүндүк берген, ылдамдыкты калыбына келтирүү коэффициенти камтыйт.

**Негизги сөздөр:** сокку механизми; ийри муунак; тээк; ургуч; сокку массасы; математикалык үлгү; бурчтук ылдамдык; бурулуш бурчу; сокку ийин күчү; күү ийин күчү.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТСКОКА БОЙКА УДАРНОГО МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ С ДИНАМИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ

В данной работе предметом исследования является ручной ударный механизм переменной структуры предназначенный для разрушения твердых материалов, используемый в горнодобывающей, строительной отраслях и для производства ремонтно-восстановительных и дорожных работ. В данной работе рассматривается процесс исследования отскока бойка ударного механизма переменной структуры с динамической связью после передачи энергии инструменту. Ударный механизм состоит из вращающегося ротора - кривошипа и двух шатунов - бойков в виде стержней, на конце которых сосредоточена ударная масса. Целью работы является обеспечение стабильности работы механизма, т.е. обеспечение выхода ударной массы в точку соударения с инструментом за один цикл. Были выведены аналитические уравнения, описывающие изменение угловой скорости и угла поворота бойка в момент соударения и после соударения бойка с инструментом. Эти уравнения учитывают два различных подхода: учитывается момент сил импульса, который влияет на характер движения бойка, а также учитывается коэффициент восстановления скорости, который позволяет упростить решение задачи.

**Ключевые слова:** ударный механизм; кривошип; шатун; боек; ударная масса; математическая модель; угловая скорость; угол поворота; момент импульса; момент инерции.

## INVESTIGATION OF THE REBOUND PROCESS OF A STRIKER OF A VARIABLE STRUCTURE IMPACT MECHANISM WITH DYNAMIC COUPLING

The object of the study is a manual impact mechanism of variable structure (MPS) designed for the destruction of solid materials, used in the mining, and construction industries and for the production of repair and restoration and road works. In this paper, the process of studying the rebound of a striker of a variable structure impact mechanism with dynamic coupling after energy transfer to the instrument is considered. The impact mechanism consists of a rotating rotor (crank) and two connecting rods (strickers) in the form of rods, at the end of which the impact mass is concentrated. The purpose of the work is to ensure the stability of the mechanism, i.e. to ensure that the impact mass reaches the point of impact with the tool in one cycle. Analytical equations describing the change in the angular velocity and angle of rotation of the striker at the moment of

impact and after impact of the striker with the tool were derived. These equations take into account two different approaches: the moment of momentum forces are taken into account, which affects the nature of the movement of the striker, and the speed recovery coefficient is taken into account, which makes it possible to simplify the solution of the problem.

**Key words:** impact mechanism; crank; connecting rod; firing pin; impact mass; mathematical model; angular velocity; angle of rotation; moment of momentum; moment of inertia.

Ударный механизм переменной структуры (МПС) с динамической связью (рисунок 1), состоит из ротора в виде диска  $AA'$ , шатунов  $AB$  и  $A'B'$ , у которых ударные массы  $m$  и  $m'$  сосредоточены в точках  $B$  и  $B'$ . При вращении ротора ударные массы, занимают положение на периферии вращения и соударяясь с инструментом, поочередно передают ему энергию [1].

После соударения параметры отскока бойка значительно влияют на выход ударной массы в предупредное положение в течение одного цикла. К этим параметрам относятся: скорости кривошипа и шатуна, момент импульса сил ударной массы, момент инерции и формы бойка, коэффициент отскока, время соударение и др.

Поэтому для исследования процесса отскока ударной массы от волновода и выхода её на ударную позицию за один цикл рассмотрим два способа: 1) с учетом моментов импульса сил и моментов инерций; 2) с учетом коэффициента восстановления скорости.

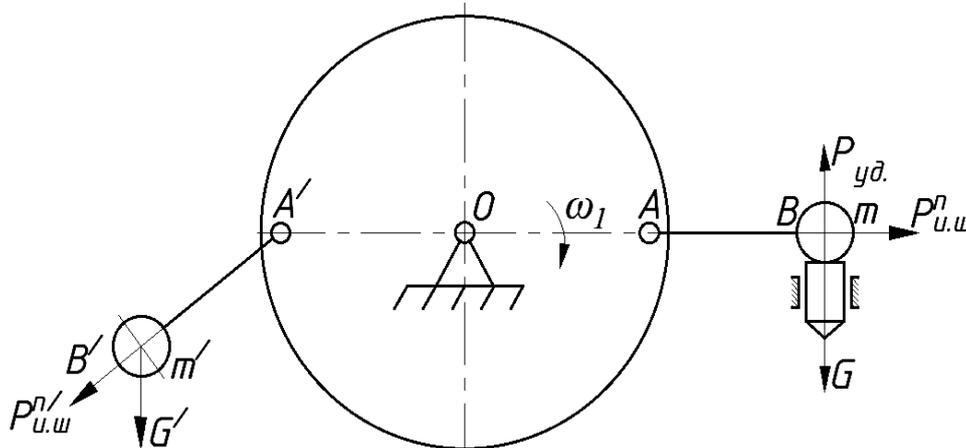


Рисунок 1 – Принципиальная схема двух массового ударного МПС с динамической связью.

В первом случае в момент соударения бойка с инструментом, возникающий импульс реактивной силы меняет направление вращения шатуна на обратное, и в дальнейшем, боек движется под действием силы инерции, тяжести и трения в кинематических парах до какого-то угла поворота относительно оси шатуна. При дальнейшем вращении кривошипа происходит процесс раскрытия шатуна, т.е. выход бойка на ударную позицию, характер движения (направление) которого зависит от первоначального положения, где величина момента инерции начинает превышать величину затухающего момента импульса силы. Поэтому возникла необходимость определения динамических параметров бойка в конце отскока.

Во втором случае для упрощения решения задачи предполагается движение бойка начинается в обратном направлении после соударения с приобретёнными параметрами согласно с заданным коэффициентом восстановления скорости отскока бойка. Здесь для упрощения решения задачи рассматривается процесс отскока только одной ударной массы, полагая, что вторая ударная масса подчинена этому же закону движения.

Для первого случая, при наличии момента импульса сил, составим систему уравнений движения кривошипа и бойка в момент удара, т.е. при  $0 \leq t \leq t_{\text{соуд.}}$ :

$$\begin{cases} I_1 \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} = M_{\text{дв.}} - M_{\text{им.о}} - M_{\text{т.о}} \\ I_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} = -M_{\text{им.ш}} + M_{\text{т.ш}} + M_G \end{cases}, \quad (1)$$

где  $M_{\text{дв.}}$  – движущий момент двигателя;  $M_{\text{им.ш}}$  и  $M_{\text{им.о}}$  – моменты импульса сил ударной массы соответственно относительно шарнира  $A$  и опоры  $O$ ;

$J_1$  – момент инерции кривошипа относительно оси вращения;

$I_2$  – момент инерции бойка (шатуна);  $\frac{d^2 \varphi_1}{dt^2}$  – угловое ускорение кривошипа;  $\frac{d^2 \varphi_2}{dt^2}$  – угловое

ускорение шатуна;  $M_G$  – момент сил тяжести ударной массы  $m$ , которая определяется как:

$M_G = Gh_2$ , здесь  $h_2$  – плечо силы тяжести;  $M_{\text{т.о}}$  и  $M_{\text{т.ш}}$  – моменты сил трения в опоре  $O$  и шарнире  $A$ , которые определяются как  $M_{\text{т.о}} = R_{01} \cdot r_{\text{ц}} \cdot k$  и  $M_{\text{т.ш}} = R_{12} \cdot r_{\text{ц.ш}} \cdot k$ , здесь  $R_{01}$  – реактивная сила в опоре  $O$ ,  $R_{12}$  – реактивная сила в шарнире  $A$ ;

$r_{\text{ц}}$  и  $r_{\text{ц.ш}}$  – радиус цапфы и шарнира,  $k$  – коэффициент трения качения.

После соударения с волноводом, боек, из-за действия реактивной силы ударного импульса  $P_{\text{уд}}$  (рисунок 2), меняет направление и вращается в противоположную сторону вращения кривошипа, тогда система уравнений принимает следующий вид при  $t_{\text{сойд.}} \leq t \leq t_{\text{max.}}$ :

$$\begin{cases} I_1 \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} = M_{\text{дв.}} \pm M_{\text{т.о}} \pm M_{P_{\text{ш.ш}}^n} \\ I_2 \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} = M_{P_{\text{ш.ш}}^n} \pm M_G \pm M_{\text{т.ш}} \end{cases}, \quad (2)$$

где знак  $\pm$  – направления моментов сил;  $M_{P_{\text{ш.ш}}^n}$  – момент силы инерции шатуна относительно

опоры  $O$ ,  $M_{P_{\text{ш.ш}}^n} = P_{\text{ш.ш}}^n h_{\text{ш.о}}$ , здесь  $h_{\text{ш.о}}$  – плечо силы инерции относительно опоры  $O$ , которое

определяется из решения треугольника  $OAB$ ,  $h_{\text{ш.о}} = \frac{2\sqrt{p(p-l_1) \cdot (p-l_2) \cdot (p-r)}}{l_2}$  (рисунок 2), где

$p$  – полупериметр треугольника, где величина  $r$  изменчива, и соответствует для каждого

положения механизма  $p = \frac{l_1 + l_2 + r}{2}$ ;  $P_{\text{ш.ш}}^n$  – нормальная составляющая силы инерции,

которая определяется как:  $P_{\text{ш.ш}}^n = m\omega_2^2 l_2$ ;  $M_{P_{\text{ш.ш}}^n}$  – момент силы инерции ударной массы

относительно шарнира  $A$ ,  $M_{P_{\text{ш.ш}}^n} = P_{\text{ш.ш}}^n h_1$ , здесь  $P_{\text{ш.ш}}^n$  – нормальная составляющая силы инерции,



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{M_{\text{дв.}} - P_{y\text{д}}(l_1 + l_2) - R_{01} \cdot r_y \cdot k}{I_1} t \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{-P_{y\text{д}}l_2 + R_{12} \cdot r_{y.u} \cdot k + mgh_2}{I_2} t \end{array} \right. \Bigg|_{0 \leq t \leq t_{\text{сойд.}}} \quad (5)$$

и после соударения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{M_{\text{дв.}} \pm m\omega_2^2 l_2 h_{u.o} \pm R_{01} \cdot r_y \cdot k}{I_1} \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{m(\omega_1 \pm \omega_2)^2 r h_{u.o} \pm mgh_2 \pm R_{12} \cdot r_{y.u} \cdot k}{I_2} \end{array} \right. \Bigg|_{t_{\text{сойд.}} \leq t \leq t_{\text{max.}}} \quad (6)$$

Интегрируя выражения (5) и (6) по времени получаем систему зависимостей угла поворота кривошипа и шатуна в момент соударения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \frac{M_{\text{дв.}} - P_{y\text{д}}(l_1 + l_2) - R_{01} \cdot r_y \cdot k}{I_1} t^2 \\ \varphi_2 = \frac{-P_{y\text{д}}l_2 + R_{12} \cdot r_{y.u} \cdot k + mgh_2}{I_2} t^2 \end{array} \right. \Bigg|_{0 \leq t \leq t_{\text{сойд.}}} \quad (7)$$

и после окончания соударения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \frac{M_{\text{дв.}} \pm m\omega_2^2 l_2 h_{u.o} \pm R_{01} \cdot r_y \cdot k}{I_1} t^2 \\ \varphi_2 = \frac{m(\omega_1 \pm \omega_2)^2 r h_{u.o} \pm mgh_2 \pm R_{12} \cdot r_{y.u} \cdot k}{I_2} t^2 \end{array} \right. \Bigg|_{t_{\text{сойд.}} \leq t \leq t_{\text{max.}}} \quad (8)$$

В частном случае принимая кривошип, как диск массы которых сосредоточены на оси вращения и шатуны, как стержени, массы которых сосредоточены на их свободных концах (см. рисунок 1), запишем выше приведенные выражения следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{2(M_{\text{дв.}} - P_{y\text{д}}(l_1 + l_2) - R_{01} \cdot r_y \cdot k)}{ml_1^2} t \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{3(-P_{y\text{д}}l_2 + R_{12} \cdot r_{y.u} \cdot k + mgh_2)}{ml_2^2} t \end{array} \right. \Bigg|_{0 \leq t \leq t_{\text{сойд.}}} \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{2(M_{\text{дв.}} \pm m\omega_2^2 l_2 h_{\text{ш.о}} \pm R_{01} \cdot r_y \cdot k)}{ml_1^2} t \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{2(m(\omega_1 \pm \omega_2)^2 r h_{\text{ш.о}} \pm mgh_2 \pm R_{12} \cdot r_{y,\text{ш}} \cdot k)}{ml_2^2} t \end{array} \right|_{t_{\text{сод.}} \leq t \leq t_{\text{max.}}} \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \frac{2(M_{\text{дв.}} - P_{y\text{д}}(l_1 + l_2) - R_{01} \cdot r_y \cdot k)}{ml_1^2} t^2 \\ \varphi_2 = \frac{3(-P_{y\text{д}}l_2 + R_{12} \cdot r_{y,\text{ш}} \cdot k + mgh_2)}{ml_2^2} t^2 \end{array} \right|_{0 \leq t \leq t_{\text{сод.}}} \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \frac{2(M_{\text{дв.}} \pm m\omega_2^2 l_2 h_{\text{ш.о}} \pm R_{01} \cdot r_y \cdot k)}{ml_1^2} t^2 \\ \varphi_2 = \frac{3(m(\omega_1 \pm \omega_2)^2 r h_{\text{ш.о}} \pm mgh_2 \pm R_{12} \cdot r_{y,\text{ш}} \cdot k)}{ml_2^2} t^2 \end{array} \right|_{t_{\text{сод.}} \leq t \leq t_{\text{max.}}} \quad (12)$$

где  $\frac{ml_1^2}{2}$  - момент инерции диска;  $\frac{ml_1^2}{3}$  - момент инерции стержня.

При вычислениях скорости отскока ударной массы в момент соударения вторым способом, когда учитывается коэффициент восстановления скорости, а не через момент сил импульса расчеты выглядят следующим образом. Движение ударной массы после отскока определяется, как и при первом способе по зависимостям (10) и (12).

Скорость отскока определяется как:

$$V_{\text{от.}} = -V \cdot k, \quad (13)$$

где  $k$  – коэффициент восстановления скорости, величина, которого зависит от свойств обрабатываемого объекта.

Скорость шатуна в момент соударения определяется как:

$$\omega_2 = \frac{V_{\text{от.}}}{l_2}. \quad (14)$$

А угол поворота шатуна определяется как:

$$\varphi_2 = \omega_2 \cdot t_{\text{сод.}} \quad (15)$$

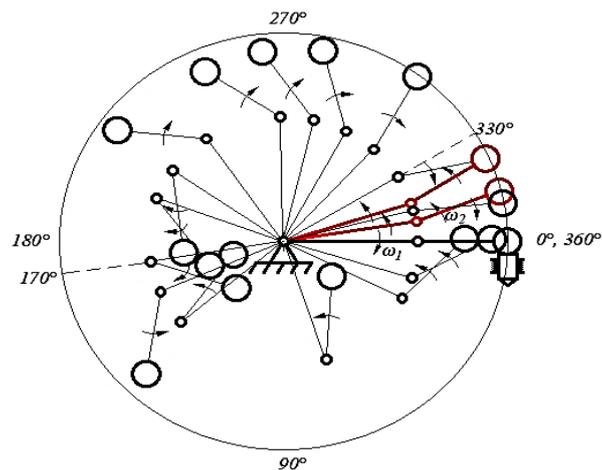


Рисунок 3 – Картина положения бойка за один цикл после соударения с инструментом, полученная с учетом моментов импульса сил и моментов инерций

Как показано на рисунке 3 в момент соударения кривошип останавливается и меняет направление вращения в обратную сторону (показано красным цветом) до  $-18^\circ$  из-за действия момента импульса силы  $P_{y\partial}$ , направленного против вращения кривошипа (см. рисунок 2). Затем, после того когда действие импульса силы  $P_{y\partial}$  погасится, кривошип вновь начинает вращаться по часовой стрелке за счет движущего момента маховика.

Шатун же с ударной массой после отскока продолжает поворот против часовой стрелки. Когда кривошип повернется примерно на  $170^\circ$ , шатун успевает совершить примерно один оборот вокруг оси шарнира  $A$ . Затем, под действием силы инерции  $P_{и.к.}^{n/}$  шатун меняет направление вращения на «по часовой» и ударная масса стремится к периферии вращения. При достижении кривошипа угла поворота, приблизительно,  $330^\circ$  (показано штрих пунктиром) происходит опережение вращения шатуна оси кривошипа, примерно, на  $13^\circ$ . При дальнейшем вращении кривошипа шатун либо увеличивает это опережение, либо отстает, и в таком положении движется до соударения с инструментом. Происходит неопределенность положения шатуна относительно оси кривошипа.

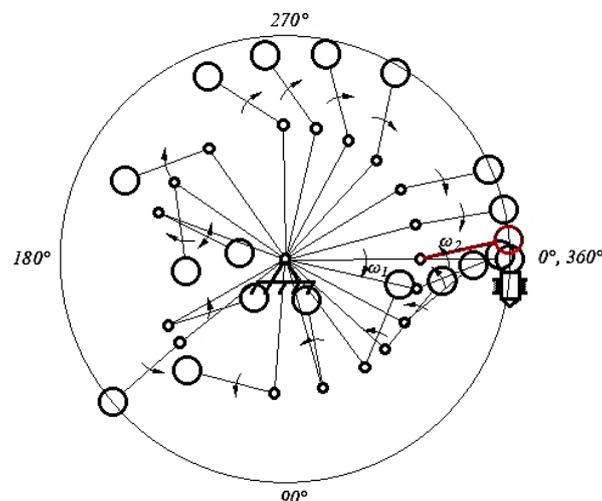


Рисунок 4 – Картина положения бойка после соударения с инструментом, полученная через коэффициент восстановления скорости

На рисунке 4 показаны положения кривошипа и шатуна после соударения ударной массы с инструментом, полученные расчетным путем с учетом коэффициента восстановления скорости. Здесь поведение шатуна аналогично рассмотренному выше случаю. Отличие заключается в том, что здесь кривошип после соударения не меняет направление вращения, так как в этом случае в расчетах не участвуют моменты сил импульса относительно опоры  $O$  и шарнира  $A$ .

В заключении можно сказать что, с помощью уравнений (5-8) можно определить изменения угловой скорости и угла поворота кривошипа и шатуна в момент соударения и после при различных формах кривошипа и бойка.

А с помощью выражений (9-12) можно определить движение звеньев ударного механизма, когда кривошип представляет форму диска масса, которого сосредоточена на оси вращения, а шатун представлен в виде стержня, с сосредоточенной массой на свободном конце.

#### Выводы:

1. Приведенные расчеты показывают на нестабильное поведение ударной массы при выходе на ударную позицию, а следовательно, надежность передачи энергии удара не обеспечивается из-за не жесткого соединения кривошипа и шатуна, имеющие не постоянные скорости вращения в течение одного цикла;

2. Определено, что для устранения этих недостатков необходимо ограничить угол поворота шатуна относительно оси кривошипа после отскока и фиксировать поворот шатуна относительно кривошипа при выходе на периферию вращения. Это можно достичь введением в конструкцию ограничителей вращения шатуна.

#### Список литературы:

1. **Усубалиев, Ж.** Механические ударные механизмы переменной структуры [Текст] / Ж. Усубалиев, К.Т. Эликбаев, Н.Н. Кынатбекова // Машиноведение. – Бишкек: ИМАШ НАН КР, 2015. - №2. - С. 3-11.
2. **Еремьянц, В.Э.** Расчет ударных процессов в машинах [Текст]: учебное пособие / В.Э. Еремьянц. – Бишкек: КРСУ, 2002. - Часть 3. - 60 с.

Поступила в редакцию: 29.01.2024 г.

УДК 622.23.05

**Усубалиев Ж.**

*к.т.н., г.н.с. Института машиноведения, автоматике и геомеханики НАН КР*

**Эликбаев К.Т.**

*к.т.н., с.н.с. Института машиноведения, автоматике и геомеханики НАН КР*

### ТАБИГЫЙ ТАШТЫ КАЗЫП АЛУУДАГЫ ЖАНА ИШТЕТҮҮДӨГҮ КУРАЛДАР ЖАНА КАРАЖАТТАРДЫ ТАЛДОО

*Бул жумушта изилдөө предмети катары табигый ташты казып алууда жана иштетүүдө колдонулуучу каражаттар эсептелинет. Изилдөөнүн максаты - табигый ташты казып алууда жана иштетүүдө колдонулуучу куралдарды жана каражаттарды талдоо. Табигый ташты казып алуу жана иштетүү үчүн шаймандарды жана каражаттарды талдоо ыкмалары колдонулган. Адамзаттын тарыхында табигый ташты казып алуу жана иштетүү каражаттарынын келип чыгышы жана жаралышы жана адамдардын күнүмдүк жашоосунда таштан жасалган буюмдардын орду жөнүндө кыскача баяндама жасалган. Ташты казып алуу ыкмалары жана алардан буюмдарды жасоо усулдары каралган. Кыргыз Республикасынын Улуттук илимдер академиясынын Машина*