

УДК 531.3, 621.01

КОСОЙ УДАР В КОРОМЫСЛОВОЙ УДАРНОЙ СИСТЕМЕ

В.Э. Еремьянц, Н.А. Колесников

Рассмотрена модель косоугольного удара в различных постановках. Проведена оценка влияния угла атаки при ударе на динамические реакции в коромысловой ударной системе на примере молота ГУИМ-1.

Ключевые слова: коромысловая ударная система; боек; наковальня; косоугольный удар; динамические реакции.

OBLIQUE IMPACT IN THE ROCKER IMPACT SYSTEM

Eremjants V.E., Kolesnikov N.A.

The model of oblique impact in different statements is considered. The assessment influence of angle attack under impact on dynamic reactions in the rocker impact system by example of the hammer "GUIM-1" is carried out.

Keywords: rocker impact system; striker, anvil; oblique impact; dynamic reactions.

Коромысловые ударные системы давно используются в различных устройствах. Наибольшее распространение они получили в различных испытательных стендах, и в частности в маятниковых копрах для испытания материалов [1], роторных ударных механизмах для создания периодических ударных нагрузок [2, 3], а в последнее время стали применяться и в мощных кривошипно-коромысловых ударных механизмах [4]. Но исследованию их динамики с точки зрения влияния различных факторов на динамические реакции в системе, посвящено относительно немного работ.

На рисунке 1 показана коромысловая ударная система молота ГУИМ-1, созданного в Инженерной академии Кыргызской Республики для уплотнения грунтов и сейсмического зондирования земной поверхности. Она состоит из коромысла 1, на конце которого жестко закреплена ударная масса 2 сферической ударной поверхностью радиусом R_c . В дальнейшем условимся называть эту массу бойком. Коромысло, вращаясь относительно опоры O , наносит удар бойком по наковальне 3, через которую происходит воздействие ударной нагрузки на поверхность земли. Вращение коромысла обеспечивается с помощью кривошипно-коромыслового механизма, обладающего особым положением, когда все его кинематические пары располагаются вдоль одной линии. В этом положении и производится удар коромыслом по наковальне.

Обычно начальным положением этой системы считается такое, когда продольная ось коромысла расположена перпендикулярно оси наковальни, как показано на рисунке 1. В этом положении происходит удар бойком по наковальне, и начинается следующий цикл движения.

В предшествующих работах [5, 6] при исследовании ударной системы молота ГУИМ-1 предполагалось, что при ударе вектор ударной силы направлен вдоль продольной оси наковальни. В действительности это не так. Поскольку контактная точка бойка с наковальней расположена на некотором расстоянии h от продольной оси коромысла, то в момент удара вектор скорости контактной точки бойка направлен под углом θ_0 к оси наковальни, где

$$\theta_0 = \arctg(h/l), \quad (1)$$

l – длина коромысла; h – расстояние от продольной оси коромысла до поверхности наковальни.

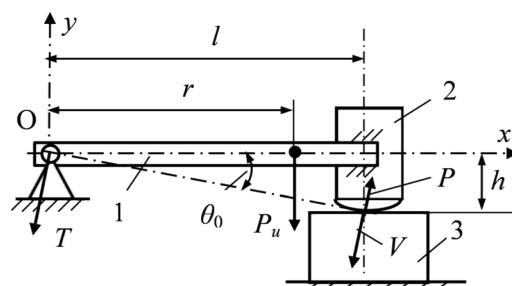


Рисунок 1 – Коромысловая ударная система

При этом в системе реализуется косою удар. При косою ударе вектор ударной силы направлен под некоторым углом к продольной оси наковальни. Если в контакте бойка и наковальни скольжение отсутствует, то можно предполагать, что этот вектор направлен параллельно вектору скорости бойка в момент удара, т.е. под углом θ_0 к продольной оси наковальни. В этом случае в опоре коромысла будет возникать горизонтальная составляющая реакции от ударной силы, которая ранее в работах [4, 5] не учитывалась. Это обосновывалось малостью угла θ_0 . Например, в ударной системе молота ГУИМ-1 он составлял 0,205 рад или 11,7 градусов.

Но если рассматривать общий случай коромысловой ударной системы, когда в процессе работы под действием ударов наковальня может перемещаться относительно начального положения на некоторое расстояние y (рисунок 2), угол атаки при косою ударе может возрастать на величину γ и становится равным:

$$\theta = \theta_0 + \gamma .$$

При этом пренебрежение горизонтальной составляющей реакции в опоре может быть уже недопустимым. В связи с этим задачей данной работы являлась оценка влияния угла атаки при ударе бойком по наковальне на динамические реакции в опоре коромысла. При её решении предполагалось, что опора коромысла жесткая. В работе [6] показано, что это обеспечивается подбором типов подшипников в опорном узле, и при этом реакции в опоре минимальные.

Известно [7], что при перемещении поверхности наковальни на величину y точка контакта бойка с наковальной смещается относительно продольной оси наковальни на величину:

$$e = \sqrt{l^2 - y^2 + 2y(R_c - h)} - l .$$

При этом

$$\theta = \arctg\left(\frac{y+h}{l+e}\right) .$$

Обычно в существующих ударных системах величина e на три порядка меньше l , и ей можно пренебречь, приняв:

$$\theta = \arctg\left(\frac{y+h}{l}\right) . \quad (2)$$

В рассматриваемой расчетной схеме действуют следующие силы: ударная сила P , направленная под углом θ к продольной оси коромысла, сила инерции P_u и реакция в опоре T . Сила инерции состоит из двух составляющих: тангенциальной, направленной перпендикулярно оси коромысла, и нормальной, направленной вдоль оси коромысла. Эти составляющие определяются по формулам:

$$P_u^r = -m\ddot{\beta}r; \quad P_u^n = -m\dot{\beta}^2r , \quad (3)$$

где m , r – соответственно общая масса и координата центра тяжести коромысла с бойком; β – угол поворота коромысла при ударе. При малых углах θ можно принять:

$$\beta = u / l , \quad (4)$$

$u = u(t)$ – местная деформация по оси y в контакте бойка с наковальной во время удара.

Как будет показано далее, нормальная составляющая силы инерции намного меньше тангенциальной, и ею можно пренебречь, приняв $P_u = P_u^r$.

Проекция ударной силы P на ось y описывалась линеаризованной моделью Герца:

$$P_y = cu , \quad (5)$$

где c – приведенный коэффициент жесткости, зависящий от величины ударной силы и определяемый методом последовательных приближений по формулам [7]:

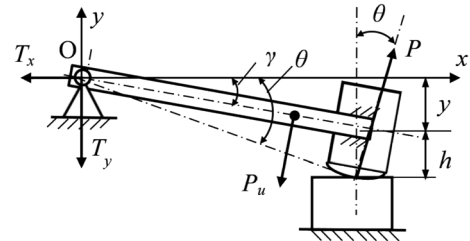


Рисунок 2 – Расчетная схема 1

$$c = 1,25K^{2/3}P_{ym}^{1/3}; \quad K = \frac{2E}{3(1-\mu^2)}\sqrt{R_C}, \quad (6)$$

где P_{ym} – максимальное значение силы; E, μ – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона для материала бойка и наковальни; R_C – радиус сферы ударной поверхности бойка.

Запишем уравнения кинестатики для рассматриваемой системы, разложив действующие силы на составляющие, направленные вдоль осей x и y :

$$P_x - P_u \sin \gamma - T_x = 0; \quad P_y - P_u \cos \gamma - T_y = 0; \quad \frac{Pl}{\cos \theta} - I\ddot{\beta} = 0, \quad (7)$$

где I – момент инерции коромысла с бойком относительно оси вращения.

Выразим силы P_x и P_u через нормальную составляющую ударной силы P_y , используя соотношения (3)–(5):

$$P_x = P_y \operatorname{tg} \theta; \quad P = P_y / \cos \theta; \quad u = -P_y / c; \quad \beta = -P_y / cl; \quad P_u = -\frac{mr}{cl} \ddot{P}_y. \quad (8)$$

Подставляя эти выражения в уравнения кинестатики, получим систему дифференциальных уравнений с тремя неизвестными функциями: $T_x(t), T_y(t), P_y(t)$:

$$P_y \operatorname{tg} \theta - \frac{mr}{cl} \sin \gamma \ddot{P}_y = T_x; \quad (9)$$

$$P_y - \frac{mr}{cl} \cos \gamma \ddot{P}_y = T_y; \quad (10)$$

$$\ddot{P}_y + k^2 P_y = 0; \quad k^2 = \frac{cl^2}{I \cos^2 \theta}. \quad (11)$$

Последнее уравнение этой системы решается независимо от первых двух, а первые два уравнения служат для определения реакций в опоре коромысла при найденной функции $P(t)$.

Решением уравнения (11) при начальных условиях:

$$P_y(0) = 0; \quad \dot{P}_y(0) = cV_0 \cos \theta,$$

является функция:

$$P_y(t) = \frac{cV_0}{k} \cos \theta \sin kt. \quad (12)$$

где V_0 – скорость бойка в начальный момент удара.

Максимальное значение этого усилия и время удара соответственно равны:

$$P_{ym} = \frac{V_0}{l} \sqrt{cl} \cdot \cos^2 \theta; \quad \tau = \frac{\pi}{k}.$$

Подставляя выражение для максимальной силы в соотношение (6), после преобразований получим формулу для определения коэффициента жесткости без последовательных приближений:

$$c = 1,25^{1,2} K^{0,8} V_0^{0,4} l^{-0,4} I^{0,2} \cos^{0,8} \theta. \quad (13)$$

Полное значение ударной силы находится по формуле:

$$P(t) = \frac{cV_0}{k} \sin kt. \quad (14)$$

Следует отметить, что эта функция ударной силы от времени полностью совпадает с аналогичной функцией при прямом ударе [7], но в данном случае эта сила направлена под углом θ к продольной оси наковальни.

Определив функцию $P_y(t)$, можно из уравнений (9), (10) найти зависимости реакций в опоре от времени:

$$T_x(t) = \left(\operatorname{tg} \theta - \frac{mrl}{I} \sin \gamma \right) P_y(t); \quad (15)$$

$$T_y(t) = \left(1 - \frac{mrl}{I} \cos \gamma \right) P_y(t). \quad (16)$$

Суммарная реакция в опоре коромысла, по которой следует рассчитывать подшипники, определится как:

$$T = \sqrt{T_x^2 + T_y^2}.$$

При $\theta = 0, \gamma = 0$ из этих формул, как частный случай, получаются известные формулы, приведенные в работе [7].

Оценим правомерность принятого допущения, что нормальная составляющая силы инерции (3), действующей на коромысло во время удара, пренебрежимо мала по сравнению с тангенциальной составляющей. Для этого, выразив угол поворота коромысла во время удара β через ударную силу P_y (8), и учитывая соотношения (3), получим:

$$P_u^n = -mV_0^2 \frac{r}{l} \cos^2 \theta \sin^2 kt; \quad P_u^r = -mV_0 k \frac{r}{l} \cos \theta \sin kt.$$

Составив отношение амплитудных значений этих сил, запишем:

$$\frac{P_u^r}{P_u^n} = \frac{k}{V_0 \cos \theta}.$$

Числитель этого отношения на три порядка больше, чем знаменатель.

Например, в молоте ГУИМ-1 при скорости удара 1 м/с, массе коромысла с бойком 533 кг, радиусе ударной поверхности бойка, равном 0,26 м, и значении θ_0 , равном 0,2046 радиан, из формулы (13) найдем:

$$c = 22,5 \cdot 10^8 \text{ Н/м}; \quad k = 2194 \text{ с}^{-1}; \quad P_u^r / P_u^n = 2241.$$

Следовательно, принятое допущение приемлемо и не вносит больших погрешностей в результаты расчета.

В рассмотренной модели принят крайний случай, когда ударная сила, действующая в контакте бойка с наковальной, направлена параллельно вектору скорости бойка, и угол θ равен углу между направлением вектора скорости бойка V_0 и нормалью к поверхности наковальни. В действительности этот угол меньше и находится в диапазоне от 0 до θ .

В связи с этим представляет интерес рассмотрение другого крайнего случая, когда при косом ударе вектор силы в контакте бойка с опорой направлен по нормали к поверхности (рисунок 3).

В этом случае в полученных ранее формулах следует принять $P_x = 0, P_y = P$. Тогда система уравнений (7) запишется в виде:

$$P_u \sin \gamma + T_x = 0; \quad P - P_u \cos \gamma - T_y = 0; \quad Pl - I\ddot{\beta} = 0.$$

Из этих уравнений следует, что при тех же начальных условиях, как и в предыдущем случае, зависимость силы P от времени описывается той же функцией (12), а усилия в опоре коромысла описываются функциями:

$$T_x(t) = -\frac{mrl \sin \gamma}{I} P(t); \quad T_y(t) = \left(1 - \frac{mrl}{I} \cos \gamma \right) P(t). \quad (19)$$

Коэффициент контактной жесткости бойка и коромысла и частота колебаний в этой модели определяются по формулам:

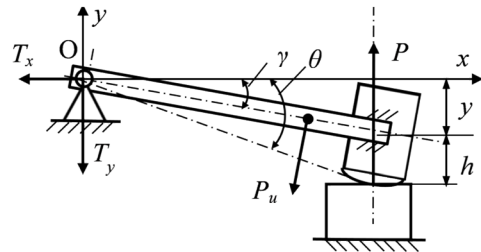


Рисунок 3 – Расчетная схема 2

$$c = 1,25^{1,2} K^{0,8} V_0^{0,4} m^{0,2} \cos^{0,4} \theta; k^2 = cl^2 / I. \quad (20)$$

В качестве примера оценим результаты, получаемые по первой (рисунок 2) и второй (рисунок 3) моделям, применительно к ударной системе молота ГУИМ-1 со следующими исходными данными:

$$m = 533 \text{ кг}; l = 1,205 \text{ м}; r = 1,13 \text{ м}; h = 0,25 \text{ м}; I = 708 \text{ кгм}^2; R = 0,26 \text{ м}; \theta_0 = 0,2046 \text{ рад.}; \gamma = 0, V_0 = 1 \text{ м/с.}$$

Результаты расчета максимальных значений реакций в контакте бойка с наковальней и в опоре коромысла, полученные при $\gamma = 0, \theta = 11,7^\circ$, приведены в таблице 1, а при $\gamma = 50 \text{ мм}, \theta = 14^\circ$ – в таблице 2. Там же указано расхождение результатов для различных моделей в процентах.

Таблица 1 – Результаты расчета динамических реакций для различных моделей при $\gamma = 0, \theta = 11,7^\circ$

Параметры	$c \cdot 10^{-8}$, Н/м	k , с^{-1}	P_y , кН	P_x , кН	T_y , кН	T_x , кН	T , кН
Модель 1	22,5	2194	1047	217,3	-26,3	217,3	218,8
Модель 2	22,7	2157	1030	0	-25,8	0	25,8
Расхождение, %	0,9	1,7	1,6	–	1,9	–	8,5 раз

Таблица 2 – Результаты расчета динамических реакций для различных моделей при $\gamma = 50 \text{ мм}, \theta = 14^\circ$

Параметры	$c \cdot 10^{-8}$, Н/м	k , с^{-1}	P_y , кН	P_x , кН	T_y , кН	T_x , кН	T , кН
Модель 1	22,3	2205	983	245,1	-23,6	205,0	206,4
Модель 2	22,6	2153	1018	0	-24,7	-41,4	48,2
Расхождение, %	1,3	2,3	3,4	–	4,7	4,9 раз	4,3 раз

Из этих таблиц видно, что расхождение результатов различных моделей существенно только для реакции в опоре коромысла T . Во второй модели величина этой реакции в разы меньше, чем в первой. Остальные реакции, а также частота колебаний k , определяющая длительность удара, для различных моделей отличаются не более чем на 2 % при $\theta = 12^\circ$, и не более чем на 5 % при $\theta = 14^\circ$.

Напомним, что мы рассмотрели два крайних случая направления вектора ударной силы. Реальный результат лежит между этими случаями. Истинное направление ударной реакции пока неизвестно, и его определение требует специальных теоретических и экспериментальных исследований. Поэтому на данном этапе в расчетах целесообразно придерживаться первой модели с завышенным значением усилий в опоре коромысла. Это завышение уйдет в запас прочности конструкции.

Главным результатом данной работы является установление основных зависимостей, позволяющих рассчитывать усилия в коромысловой ударной системе при косом ударе. Эти зависимости могут быть использованы для расчета и выбора рациональных параметров различных коромысловых ударных систем.

Литература

1. Давиденков Н.Н. Динамические испытания металла / Н.Н. Давиденков. М.-Л.: Госиздат, 1929. 366 с.
2. Виноградов В.Н. Изнашивание при ударе / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, А.Ю. Алгабачиев. М.: Машиностроение, 1982. 192 с.
3. Мигиренко Г.С. Ударные стенды для испытания малогабаритных изделий / Г.С. Мигиренко, В.Н. Евграфов, А.А. Рыков, В.Ф. Хон. Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 1987. 216 с.
4. Зиялиев К.Ж. Кинематический и динамический анализ шарнирно-четырёхзвенных механизмов переменной структуры с созданием машин высокой мощности / К.Ж. Зиялиев. Бишкек: Илим, 2005. 196 с.
5. Еремьянц В.Э. Исследование динамических нагрузок в элементах кривошипно-коромыслового ударного механизма ГУИМ-1 / В.Э. Еремьянц, К.П. Кислицын, Н.А. Колесников // Современная техника и технологии в научных исследованиях: матер. 4-й конф. молодых ученых и студентов. Бишкек: Научная станция РАН, 2012. С. 181 – 186.
6. Еремьянц В.Э. Колебания балки коромысловой ударной системы при её жесткой связи с ударной массой / В.Э. Еремьянц, Н.А. Колесников // Теория машин и рабочих процессов: сб. трудов. Бишкек: ИМаш НАН КР, 2013. С. 136–140.
7. Еремьянц В.Э. Динамика ударных систем. Моделирование и методы расчета. Саарбрукен: Издательский дом Palmarium academic Publishing, 2012. 586 с.