

УДК К622.233.5(088.8)

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО НАГРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ОБРАБОТКИ ИНСТРУМЕНТОМ РАЗНОЙ ФОРМЫ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ИНСТРУМЕНТА

канд. техн. наук, доц. В.В. КОЛЕНО
(Полоцкий государственный университет),
д-р техн. наук, проф. А.Ф. КИЧИГИН
(Киевский государственный университет)

Обоснована необходимость применения в различных отраслях промышленности импульсных машин ударного действия. Основным элементом ударной машины является рабочий инструмент, от оптимальной формы и геометрии которого зависит производительность, а следовательно и обеспечение минимальной энергоёмкости. Проведены теоретические исследования нагружения объекта обработки вдавливанием штампов определенной формы. Получены математические зависимости напряжений в массиве и эпюры распределения давлений в твердом грунте при различной форме и геометрии инструмента. Получена траектория раскрытия микротрещины, определяющей объем отделяемой стружки, а следовательно и производительность разрушения исполнительным органом импульсной машины ударного действия при минимальной энергоёмкости.

В настоящее время для выполнения многих технологических операций в различных отраслях промышленности применяются пневматические машины ударного действия, работа которых обеспечивается дорогой и сложной в эксплуатации системой пневмопривода [1, 2], коэффициент полезного действия (КПД) их не более 7... 15 %, кроме того, при работе создаётся сильный шум (от выхлопов воздуха) и загрязнённость атмосферы масляным туманом, содержащимся в выбрасываемом наружу воздухе, а также образование конденсата на поверхности машины.

Новым видом машин ударного действия являются машины с гидравлическим масляным приводом [3,4], обладающие экономичностью (КПД достигает 65...80 %) и компактностью конструкции, безопасностью эксплуатации и улучшенными показателями по шуму и вибрации, что подтверждается исследованиями и разработками Полоцкого государственного университета [5, 6, 7], а также опытом создания аналогичных машин зарубежными фирмами «Крупп» (Германия), «Раммер» (Финляндия), «Монтаберт» (Франция), «Стейнли» (Англия), «Миппом» (Япония) и др. [8, 9].

Нагружение забоя инструментом сопровождается его внедрением в массив, подготавливая исполнительный орган к основной своей функции - разрушению объекта обработки. На создание напряженного состояния, предшествующего отделению крупного элемента стружки, расходуется 90...95 % всей энергии стружкообразования. Математическое описание этого процесса обеспечивает научно обоснованный расчет мощности привода ударной машины и основных ее элементов. Для выбора формы и геометрии рабочих инструментов воспользуемся задачами вдавливания в твёрдый грунт штампов различной формы: круглой, квадратной, треугольной и прямоугольной. Выбор рациональной формы инструмента осуществляется по условиям эффективного разрушения в зоне контакта равных площадей с твердым грунтом.

При стационарном движении штампа вдоль оси Z , при малых значениях массовых сил μ , состояние упругопластического массива описывается уравнением:

$$\frac{d^2 v_z}{dx^2} + \frac{d^2 v_z}{dy^2} + \frac{d^2 v_z}{dz^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dz} \quad (1)$$

Составляющая скорости деформирования v_z изменяется по сечению штампа, убывая от максимальных значений в центре к нулю за пределами штампа. Прогиб массива по оси Z под круглым штампом:

$$Z_y = \Theta p_0 \left(2r - \frac{x^2}{r} \right), \quad (2)$$

где $\Theta = \frac{1-\nu}{4E}$ – характеристика упругих свойств грунта, устанавливающая связь между коэффициентом Пуассона ν и модулем упругости E ; p_0 – максимальное давление в центре контакта; r – радиус штампа.

Максимальное значение прогиба посередине площадки контакта:

$$Z_y = 2 p_0 \pi \Theta r. \quad (3)$$

Длина контура, на котором $Z_y = 0$ составляет $2r\sqrt{2}$.

Скорость деформирования твердого грунта под штампом:

$$v_z = C(x^2 + y^2 - a^2), \quad (4)$$

где C – коэффициент пропорциональности: $a = r\sqrt{2}$.

Приращение давления от максимально упругого p_y до упругопластического $p_{y\Pi}$:

$$\partial p = p_{y\Pi} - p_y.$$

Приращение прогиба массива от максимально упругого до упругопластического, $Z_{y\Pi} = Z_y\Pi$, где Π – коэффициент пластичности:

$$\partial Z = Z_{y\Pi} - Z_y = Z_y(\Pi - 1). \quad (5)$$

Подставив (5) в (1), получим: $\partial p = 4c\mu\partial Z$.

Определив C из (4), ∂Z из (5), получим для $P_{y\Pi}$:

$$P_{y\Pi} = P_y + \frac{4\mu v_z Z_y (\Pi - 1)}{x^2 + y^2 - a^2}. \quad (6)$$

Давление в массиве при упругопластическом деформировании круглым штампом в сечении $y = 0$ с учетом (2) принимает вид:

$$P_{y\Pi} = P_y + \frac{8\mu v_z P_0 \pi \Theta r (\Pi - 1)}{x^2 - a^2}. \quad (7)$$

Эпюра давлений в упругопластическом песчанике, построенная по (7), приведена на рис. 1. Для эллиптического штампа с полуосями a_1 и b_1 прогиб в направлении оси Z :

$$Z_y = \Theta P_0 \pi \frac{2a_1 - x^2}{2a_1}.$$

Прогиб массива под эллиптическим штампом по большей его оси определится:

$$Z_y = \Theta P_0 \pi \frac{4a_1 - y^2}{2a_1}.$$

Длины контуров при $Z = 0$ для большой и малой осей эллипсов соответственно равны:

$$A_1 = 2a_1\sqrt{2} \quad \text{и} \quad B_1 = 2b_1\sqrt{2}.$$

Скорость деформирования твердого грунта под штампом:

$$v_z = C(x^2 + y^2 - A^2 B^2).$$

Выкладки аналогично (5) и (7) позволят получить распределение в массиве при упругопластическом деформировании эллиптическим плоским штампом: в сечении $Y = 0$

$$P_{y\Pi} = P_y + \frac{8\mu v_z P_0 \pi \Theta (\Pi - 1) Z_y}{x^2 - A^2 B^2} a_1, \quad (8)$$

в сечении $X = 0$

$$P_{y\Pi} = P_y + \frac{8\mu v_z P_0 \pi \Theta (\Pi - 1) Z_y}{x^2 - A^2 B^2} b_1. \quad (9)$$

Эпюра давлений под эллиптическим штампом строится по аналогии с рис. 1 для сечений по большой и малой осям эллипсов.

Давление в массиве при упругопластическом деформировании квадратным штампом со стороной, равной a_2 :

$$P_{y\Pi} = P_y + \frac{8\mu v_z P_0 \pi \Theta r (\Pi - 1) a_2}{x^2 - 2a_2}. \quad (10)$$

При нагружении равнобедренным треугольным штампом, сторона которого равна a , уравнение давления принимает вид:

$$P_{y\Pi} = P_y + \frac{4\mu v_z P_0 \pi \Theta (\Pi - 1) a_3}{3x^2 - a_3\sqrt{3}}. \quad (11)$$

Уравнения давлений по взаимноперпендикулярным осям прямоугольного штампа со сторонами $2a_4$ и $2b_4$.

При $X = 0$

$$P_{yII} = P_y + \frac{8\mu\nu_z P_0 \pi \Theta(\Pi - 1) a_4}{y^2 - A_4^2 B_4^2} \tag{12}$$

При $Y = 0$

$$P_{xII} = P_y + \frac{8\mu\nu_z P_0 \pi \Theta(\Pi - 1) b_4}{x^2 - A_4^2 B_4^2}$$

где $A_4 = 2a_4\sqrt{2}$ и $B_4 = 2b_4\sqrt{2}$.

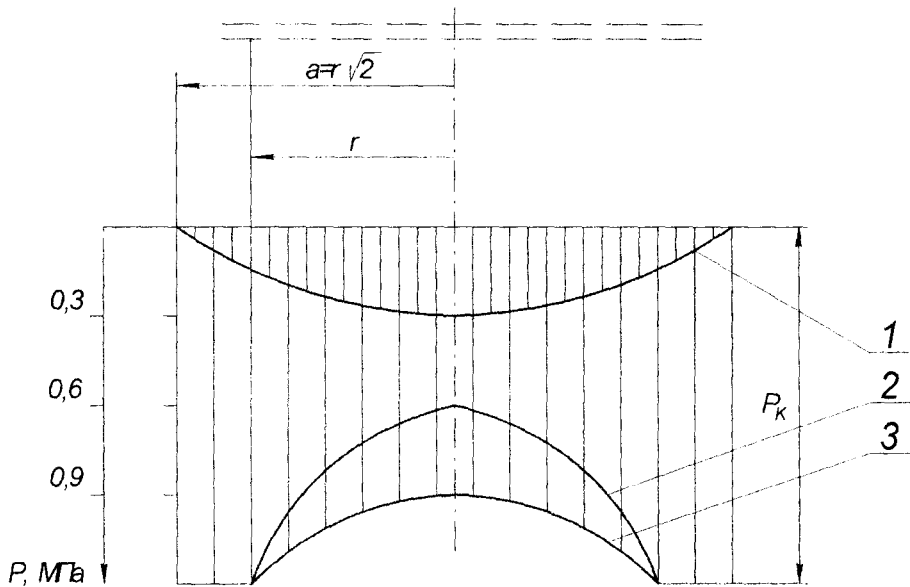


Рис. 1. Эюра распределения давлений под круглым штампом:

1 – эюра упругого давления; 2 – эюра пластического давления; 3 – эюра упругопластического давления;
 P_k – контактная прочность песчаника

Полученные значения давлений P_{yII} для различных форм штампов позволяют выбрать оптимальную геометрию и форму рабочего инструмента исполнительного органа ударной машины. Они обеспечивают минимальную удельную энергоёмкость процесса разрушения, что оценивается площадью эюры нагружения и объемом разрушенного грунта в зоне взаимодействия штампов различной формы, имеющих равную площадь контакта с твердым грунтом.

В качестве примера рассмотрим расчет конусной пики исполнительного органа машины ударного действия. Форма зоны разрушения в окрестности конического породоразрушающего элемента определяется уравнением:

$$x^2 r^{-2} + y^2 r^{-2} = (x - h)^2 h^{-2}, \tag{13}$$

где r – радиус пики.

Решением (11) с учётом (13) и упругой составляющей давления p получено давление под пикой, вызывающее упругопластические деформации твердого грунта:

$$P_{yII} \ddot{y} = P_0 r^{-1} [x^2 - (Z - h)^2 \operatorname{tg}^2 0,5\alpha]^{0,5} + 2(2 - \operatorname{tg}^2 0,5\alpha) \nu_z \mu Z_y (\Pi - 1) [x^2 - (Z - h)^2 \operatorname{tg}^2 0,5\alpha]^{-1}, \tag{14}$$

где Π – коэффициент пластичности твердого грунта; Z_y – упругая составляющая деформации забоя.

Оптимальным условием разрушения твердого грунта является максимальное использование приложенной к нему энергии. Геометрическая интерпретация энергии разрушения оценивается площадью эюры давлений под инструментом. Максимальная площадь этой эюры обеспечивается при условии, что в каждом сечении P_{yII} достигают значений контактной прочности P_k твердого грунта.

Таким образом, условие оптимальности разрушения забоя имеет вид:

$$\int_{-y}^y P_{y\pi} dx = 2P_k r. \quad (1)$$

Угол при вершине инструмента, внедряющегося в упругопластический массив, найдем из уравнения (14), приняв следующие обозначения:

$$\begin{aligned} x^2 &= A; & (Z-h)^2 &= B; \\ 2v_z \mu Z \gamma (\Pi-1) &= C; & \operatorname{tg}^2 0,5\alpha &= D. \end{aligned} \quad (16)$$

С учетом (16), после преобразования, уравнение (14) примет вид:

$$\begin{aligned} D^3 P_0^2 B^3 + D^2 (4C^2 - 3P_0^2 AB^2 - 8P_{y\pi} CB + 4P_{y\pi}^2 B^2) + \\ + D(16P_{y\pi} CB - 8P_{y\pi}^2 AB + 8P_{y\pi} CA - 8C^2) + 4P_{y\pi}^2 A^2 - 16P_{y\pi} CA + 16C^2 - P_0^2 A^3 = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Разделив все члены (17) на $P_0^2 B^3$, получим кубическое уравнение. Для его решения по методу Кардано введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} (4C^2 - 3P_0^2 AB^2 - 8P_{y\pi} CB + 4P_{y\pi}^2 B^2) P_0^{-2} B^{-2} &= a_1; \\ D = x_1, (16P_{y\pi} CB - 8P_{y\pi}^2 AB + 8P_{y\pi} CA - 8C^2) P_0^{-2} B^{-2} &= b_1; \\ (4P_{y\pi}^2 A^2 - 16P_{y\pi} CA + 16C^2 - P_0^2 A^3) P_0^{-2} B^{-2} &= C. \end{aligned} \quad (18)$$

Тогда (17) запишем в виде:

$$x_1^3 + a_1 x_1 + b_1 x_1 + C = 0. \quad (19)$$

Подставив в (19) $x = y - 3^{-1} a$, приведем его к виду:

$$y^3 + Py + g = 0, \quad (20)$$

где $P = -3^{-1} a_1^2 + b_1$; $g = 2 \cdot 9^{-1} a_1^2 - 3^{-1} a_1 b_1 + C$.

Решим (20) с учетом обозначений (16) и (18), принимая во внимание, что $x_1 = D = \operatorname{tg}^2 0,5\alpha$, тогда угол заострения конической пики

$$\alpha = 2 \operatorname{arctg}(F + H - 3^{-1} a_1)^{0,5}, \quad (21)$$

где $F = (Q^{0,5} - 0,5q)^{\frac{1}{3}}$; $H = (-Q^{0,5} - 0,5q)^{\frac{1}{3}}$; $Q = (3^{-1} P)^3 + (0,5q)^2$.

Нагружение массива твердого грунта рабочим инструментом завершается достижением максимального значения упругопластического давления штампа на поверхность забоя, после чего наступает его разрушение. Как было показано в (1), давление зависит от формы разрушения, но не определяет однозначно эффективность разрушения. Для её оценки необходимо знать объём разрушаемого грунта одинаковой площадки контакта с поверхностью забоя, имеющую различную форму.

Влияние формы штампа на объём разрушения твердого грунта установлено экспериментально последующей математической обработкой.

В окрестности многоугольника штампа грунт разрушается по области, близкой к эллипсоиду, вокруг круглого и эллиптического имеет форму, подобную сечению штампа.

Для упрощения различий в площадях штампов форм (круглой, квадратной и прямоугольной) при их изготовлении набрана площадь, равная $3,20 \times 10^{-4} \text{ м}^2$. При столь большой площади контакта возникающие давления опасны для самого штампа. Поэтому для аналогичной структуры твердого грунта её модель обладает меньшей контактной прочностью, чем у реального грунта. В качестве модели твердого грунта выбрана стержневая смесь, применяемая в литейном производстве. Состав её представляет собой композицию, в которой наполнителем является песок, а связующим - олифа. Соотношение наполнителя и связующего обеспечивает монолитность материала. Модель твердого грунта изготавливается следующим образом: металлическая обойма диаметром 60 мм заполняется материалом и помещается в печь, где подвергается отжигу. В результате олифа выгорает, а смесь затвердевает. После охлаждения на воздухе модель по своей структуре соответствует песчанику. Поверхность образцов покрывалась мелом, чтобы в ходе испытаний можно было фиксировать разрушаемую область.

Эксперименты выполнены на универсальной испытательной машине типа УМК 50. Наибольшая погрешность её измерений не превышает $\pm 1\%$ от изменяемой нагрузки.

Тарировкой испытательной машины определялись цена деления шкалы и абсолютная погрешность измерений. Образец устанавливается по центру и нагружался до разрушения модели грунта под штампом, что фиксировалось сбросом стрелки на контрольной шкале. Одновременно измерялось давление, при котором разрушалась модель породы.

Опыты с одним штампом повторялись на пяти образцах. После разрушения все образцы фотографировались, измерялись площади и объемы разрушения и определялись удельная нагрузка на штампы различного сечения. Энергия деформирования при заданной нагрузке на штампы принята в качестве критерия оценки эффективности при выборе формы контактной площадки штампа и породоразрушающего элемента с учетом их прочности и износостойкости.

Зона разрушения под круглым штампом ограничивается окружностью радиусом $a = r\sqrt{2}$.

Каждая вершина многоугольника является концентратором напряжений от фигуры, подобной сечению штампа. Поэтому зона разрушения и поля напряжений в окрестности многоугольника ограничена эпициклоидой. Так, например, штамп квадратной формы вписывается в направляющую окружность эпициклоиды.

В окрестности простейшего из многоугольников - треугольника - эпициклоида имеет три лепестка. С изменением упругопластических свойств нагружаемых грунтов величина зоны разрушения изменяется, между эпициклоидой и образующей её окружностью. Зона разрушения в окрестности правильного многоугольного штампа описывается окружностью, а прямоугольника - эллипсом. При той же площади сечения, что и у круга, квадрата и треугольника, наибольший периметр у прямоугольного и эллиптического штампов, что обеспечивает наибольшую площадь эпюр их нагружения.

Поэтому для эффективного по производительности и удельной энергоёмкости процесса разрушения упругопластического твердого грунта типа песчаника выбрана из решения задачи внедрения в него штампов эллиптическая площадка, на основе которой проектируется рациональная форма твердосплавной вставки грунторазрушающего инструмента. Сопrotивляемость твердого грунта разрушению снижается из-за наличия в нем неоднородных включений, трещиноватости, пористости и других дефектов. Поэтому в уравнение давления при упругопластическом деформировании массива грунта вводится множитель, учитывающий его дефектность.

Коэффициент дефектности

$$K = \frac{P_m}{P_c},$$

где P_c – естественная контактная прочность твердого грунта; P_m – технологическая контактная прочность грунта.

Естественная контактная прочность замеряется вдавливанием в необработанную (естественную) поверхность образца грунта, а технологическая – в поверхность образца, обработанного в технологическом процессе разрушения массива.

На сопротивляемость разрушению оказывает также влияние открытые поверхности забоя, они приводят к снижению давлений на упругопластический дефектный массив. Это снижение давлений описывается экспонентной:

$$1 - y \frac{f(\lambda + e)}{h},$$

где λ – расстояние между соседними проходами; e – ширина пики; h – глубина отделения; $f = 0,4$ – коэффициент, обеспечивающий с 90 %-ной достоверностью точность результата расчета.

Математическая модель давления, обеспечивающего максимальный объем ядра уплотнения перед рабочим инструментом и начало появления в его вершине макротрещины отделения крупного элемента стружки примет вид:

$$P_{уп} = \left[\frac{\sqrt{2}\sigma}{8\Theta E} + \frac{8\mu\nu P_0 \pi \Theta r (\Pi - 1)}{a^2 - x^2} \right] K_g \left(1 - e^{-f(\frac{\lambda + e}{h})} \right). \quad (22)$$

Траектория раскрытия макротрещины определяет объем отделяемой стружки, а следовательно и производительность разрушения. Рассмотренные особенности стружкообразования свидетельствуют о необходимости выбора мощности двигателя и прочностного расчета ударной машины с учетом максимального нагружения рабочего инструмента при завершении формирования перед ним уплотненного ядра, а расчет производительности разрушения по максимальному продвижению макротрещины с оптимальным значением угла наклона β её траектории к поверхности забоя. Поскольку траектория движения макротрещины является наиболее важным показателем разрушения, приведем её аналитическое описание в форме математической модели.

Выделим у вершины трещины элемент грунта длиной dx , высотой dy , шириной b . Используя принцип зависимости движения, перемещения выделенного элемента можно рассматривать как сумму перемещения при отрыве по длине dx на величину U и сдвига на величину λ (рис. 2, 3).

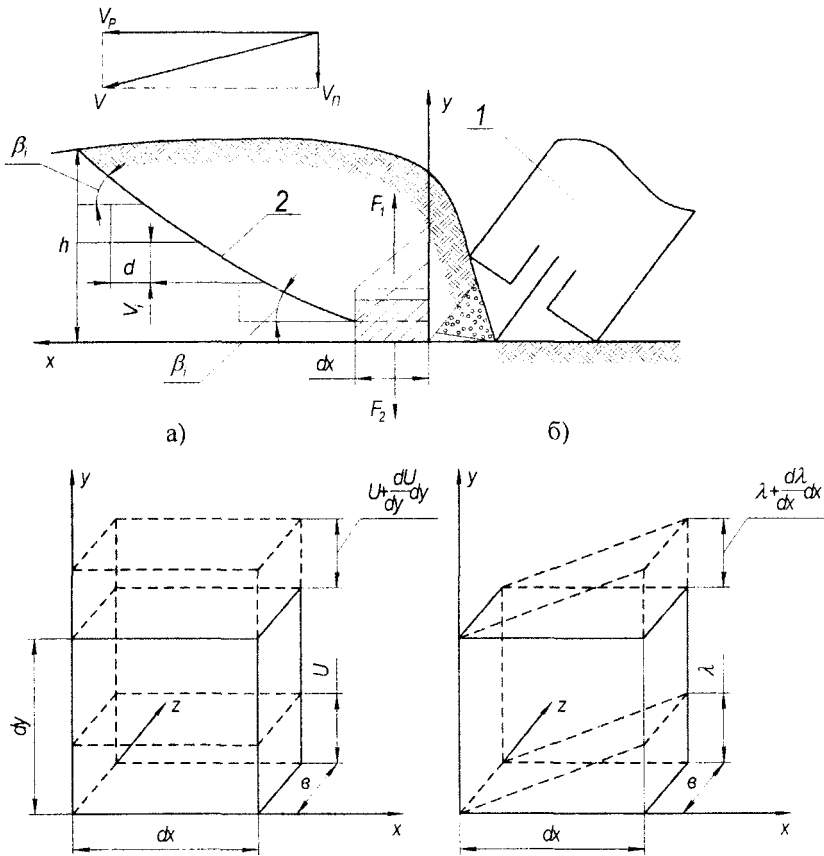


Рис 2. Схема отделения стружки:

1 – инструмент; 2 – магистральная трещина; а – элемент стружки при обрыве; б – элемент стружки при сдвиге

Из условия равенства силы, приложенной к основанию элемента, силе инерции элементарного объема стружки

$$dx b \frac{d\sigma}{dy} dy = dx b dy \rho \frac{dr U}{dt}$$

получим волновое уравнение раскрытия берегов трещины:

$$\frac{d^2 U}{dy^2} = a^2 \frac{d^2 U}{dr^2}, \tag{23}$$

где a – скорость распространения волн упругих деформаций.

Решение (23) для перемещения поверхности выделенного элемента стружки от силы $F_2 = dx b \sigma$ имеет вид:

$$U(t) = K_1 h E^{-1} \pi^{-1} (\pi d)^{0.5} [1 - \exp(-ath^{-1})], \tag{24}$$

где K_1 – коэффициент интенсивности напряжений при разрыве; d – постоянная Дагдейла.

С нарастанием внешней силы, а следовательно и внутренних сопротивлений грунта деформации в массиве, накапливается потенциальная энергия. Сопротивления сдвигу при раскрытии трещины оцениваются величиной A , при этом уменьшение удельной потенциальной энергии деформированного тела при сдвиге определится как

$$W = 0,5 G \Theta^2, \tag{25}$$

где G – модуль упругости II рода; Θ – угол сдвига для малых перемещений.

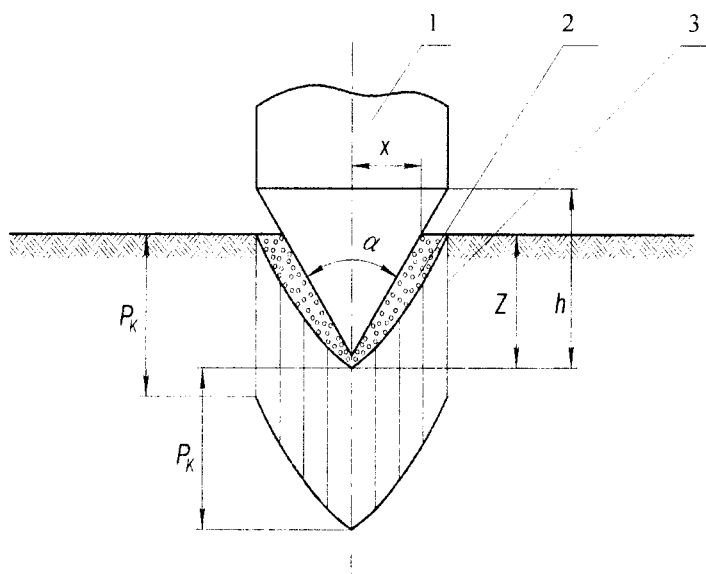


Рис. 3. Нагружение твердого грунта рабочим инструментом:
1 – рабочий инструмент; 2 – уплотненное ядро; 3 – эпюра давления

Уменьшение потенциальной энергии деформации выразим через коэффициент интенсивности напряжений у вершины трещины и, подставив её в (25), найдем

$$\lambda(x) = [0,25(1-\nu)\sigma^{-1}h^{-1}G^{-2}(K_1^2 + K_2^2)x^2]^{0,5}, \quad (26)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Изменение угла движения магистральной трещины после образования её в зоне вершины ядра за единичный акт её раскрытия:

$$\beta = \arctg[u_1 - \lambda(x)]d^{-1}, \quad (27)$$

где $u_1 = u(y) + \delta$ – критическое раскрытие трещины.

Подставим в (27) значения u_1 и $\lambda(x)$, решив его относительно β , получим уравнение изменения траектории макротрещины:

$$\beta = K_1 h x E_{-1}(\pi d)^{-0,5} [1 - \exp(-ath^{-1})] - [9^{-1}(1-\nu)\sigma^{-1}h^{-1}d^{-2}(K_1^2 + K_2^2)x^3]^{0,5} + \delta. \quad (28)$$

Анализ (28) позволяет определить оптимальные параметры звена «забой» системы «Забой - импульсная машина», обеспечивающие максимальную производительность разрушения исполнительным органом гидравлической импульсной машины ударного действия при минимальной энергоёмкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ручные пневматические машины ударного действия пониженной вибрации. - Новосибирск, 1984. - 98 с.
2. Строительный механизированный ручной инструмент и вибраторы: Отраслевой каталог. - М. 1990. - 353 с.
3. Сатинов А.С., Кичигин А.Ф. Гидропневмоударные системы исполнительных органов горных и строительно-дорожных машин. - М.: Машиностроение, 1980. - 200 с.
4. Соколинский В.В. Машины ударного разрушения. - М.: Машиностроение, 1982. - 134 с.
5. Колено В.В. Основы расчета и проектирования гидравлических импульсных систем // Машиностроение: Сб. науч. тр. - Мн., 1986. - С. 118 - 127.
6. Пат. РБ № 79. Гидравлическое устройство ударного действия / В.В. Колено. - Мн., 1993.
7. Пат. РБ № 126. Гидравлический ударный механизм / В.В. Колено. - Мн., 1993.
8. Проспект фирмы «Крупш» (Германия), 1995.
9. Проспект фирмы «Раммер» (Финляндия): Специализир. журнал по гидроударникам. - 1988. - № 2. - 15 с.