

УДК 622.24:622.143

UDC 622.24:622.143

**АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПОРОДЫ ДОЛОТОМ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН**

**ANALYSIS OF PROCESS OF DESTRUCTION OF ROCKS WITH A CHISEL AT DRILLING OF BORE HOLES**

Цуприков Александр Александрович  
к.т.н., доцент

Tsouprikov Aleksandr Aleksandrovich  
Cand.Tech.Sci., associate professor

Чередниченко Владимир Георгиевич  
ст. преподаватель

Cherednichenko Vladimir Georgievich  
senior lecturer

Крицкая Лидия Михайловна  
к.т.н., доцент

Kritskaja Lidiya Mikhailovna  
Cand.Tech.Sci., associate professor

*Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия*

*Kuban state technology university, Krasnodar, Russia*

Рассмотрены физические процессы, возникающие на забое при взаимодействии долота с породой. Выполнено математическое описание модели механической скорости проходки в функции от скорости вращения, крутящего момента, диаметра долота и свойств породы

The physical processes, arising on a face at interaction of a chisel with rocks are considered. The mathematical description of model of mechanical speed of drilling in a function from speed of rotation, twisting moment, diameter of a chisel and properties of destroyed rocks is executed

Ключевые слова: РАЗРУШЕНИЕ ПОРОДЫ ДОЛОТОМ, МЕХАНИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ БУРЕНИЯ

Keywords: DESTRUCTION OF ROCKS WITH CHISEL, MECHANICAL SPEED OF DRILLING

Процесс механического разрушения породы долотом можно представить как совокупность переходных процессов (ПП), непрерывно происходящих на забое и в скважине. Они вызываются либо изменением параметров управления процессом (нагрузкой на долото, оборотами ротора и др.), либо изменением твёрдости породы. Для моделирования ПП необходимо составить математическую модель процесса бурения, которая должна учитывать основные элементы и факторы, влияющие на углубление забоя.

Оси шарошек смещены относительно осей долота, шарошка не перекатывается по забою, а скользит по нему с одновременным поворотом вокруг своей оси. Разрушение породы происходит под действием двух основных сил – осевой нагрузки на долото  $G$ , которая вдавлиывает зуб долота в породу, и силы  $F$ , сдвигающей внедрённый в породу зуб долота по направлению его вращения (рисунки 1, 2).

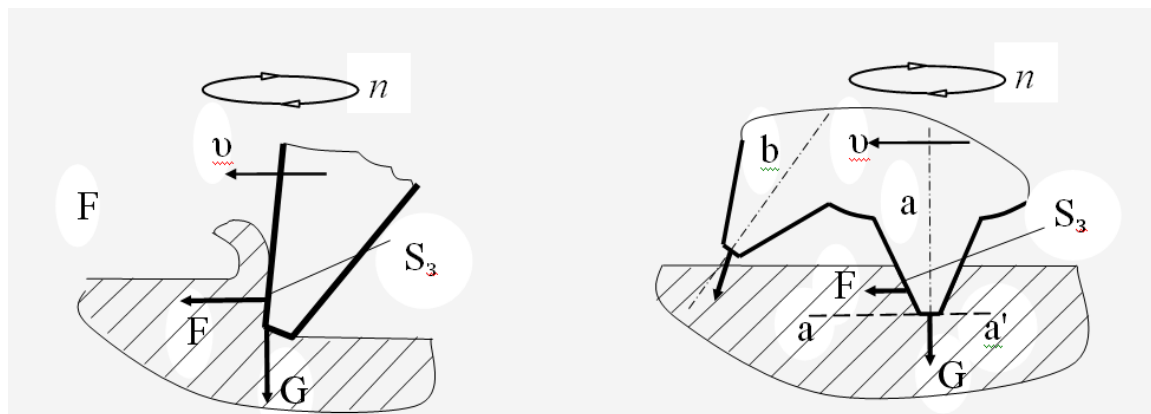


Рисунок 1. Схема взаимодействия с породой лопастного долота

Рисунок 2. Схема взаимодействия с породой зуба шарошечного долота

Схема хрупкого разрушения породы под штампом (по Л.А Шрейнеру и Н.Н. Павловой) [1] исследована в лабораторных условиях и содержит следующие стадии: образование кольцевой трещины и сдвигов за контуром штампа, развитие областей предельного состояния, хрупкое разрушение и выкол породы.

Под действием силы вдавливания в породе образуется область сжатия, направленная во все стороны от зуба и имеющая вид сферы с диаметром, несколько превышающим размеры внедрённой части зуба. В породе на контуре контакта возникают касательные напряжения  $\sigma$ , которые при увеличении силы  $G$  достигают предельной величины, и в породе образуется контурная трещина, которая распространяется в глубь породы по конусу, касательному к поверхности сферы деформации породы вокруг зоны контакта с зубом долота. При дальнейшем увеличении силы на область предельного напряжения она расширяется в направлении трещины и при  $G_1$  происходит выкол по конической поверхности, а в породе образуется лунка. В момент выкола порода под долотом раздробляется в порошок и зуб скачком опускается в лунку.

Таким образом, происходит скачкообразное разрушение породы.

При дальнейшем возрастании силы до величины  $G_2$  происходит новый процесс деформации и второй скачок разрушения породы, но для него требуется гораздо большая сила, чем для первого скачка, т.к. деформации подвергается больший объём породы, скол происходит по большей конической поверхности и образуется более глубокая лунка. При дальнейшем возрастании силы вдавливания и времени её воздействия могут последовательно совершиться несколько скачков разрушения породы, но на практике рабочие значения осевых нагрузок обеспечивают до двух скачков хрупкого разрушения. Зависимость осевой нагрузки на долото от деформации породы для двух скачков разрушения имеет вид ступенчатой кривой (рисунок 3):

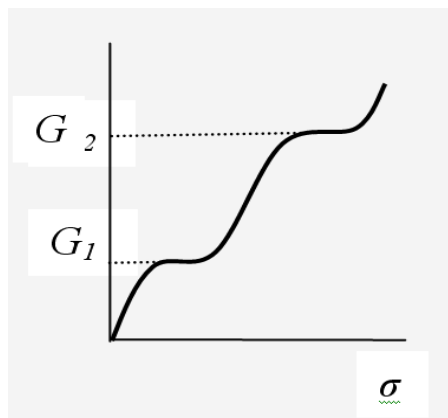


Рисунок 3. Скачкообразное разрушение породы долотом под действием осевой нагрузки

Однако, изменение только осевой нагрузки на долото не приводит к углублению забоя. Как известно, твёрдые и жидкие вещества являются несжимаемыми, поэтому:

- при вязко-пластичной породе зуб долота внедряется в неё, выдавливая породу наружу с образованием кольцевого валика вокруг зуба. Глубина проникновения в забой ограничивается высотой зуба;

- для твёрдых и хрупких пород давление зуба приводит к скачкообразному объёмному разрушению породы под зубом и около его боковых поверхностей. Глубина проникновения зуба в забой ограничивается твёрдостью породы и величиной осевой нагрузки на долото.

Поэтому основной разрушающий эффект обеспечивается переме-

щением внедрённых в забой зубьев шарошек с угловой скоростью вращения долота  $\omega$ .

Это вращение передаётся на забой с помощью крутящего момента  $M_{кр}$ , приложенного к квадрату ротора на устье скважины. Он передаётся на забой, скручивая колонну до момента страгивания породы, соответствующего пределу прочности породы на сдвиг и обеспечивает дальнейшее вращение колонны и долота с угловой скоростью  $\omega$ . Для малых скоростей бурение может оказаться неэффективным, т.к. при достаточном внедрении зубьев в породу её разрушение будет неоправданно медленным, а при больших - долото будет не успевать внедриться в забой на эффективную (максимально возможную для данной конструкции долота) глубину, и зубья будут скользить и пробуксовывать по поверхности забоя, вызывая ненужные вибрации и лишний расход энергии. Поэтому требуется для каждой осевой нагрузки подбирать свою скорость вращения ротора (момент на роторе) для каждой пачки пород с одинаковой буримостью.

Рассмотрим процессы, происходящие при радиальном движении зуба, внедрённого в породу по поверхности забоя.

При вращении долота к осевой нагрузке добавляется тангенциальная составляющая  $F$ , которая перемещает зуб по забою с радиальной скоростью  $v$  и характер воздействия зубьев на породу изменяется.

Для долот режуще-скалывающего действия резец силой  $G$  вдавливаются в породу, а силой  $F$  передняя грань резца давит на породу. При бурении мягких пластичных пород резец уплотняет породу, подрезает и выдавливает её вверх в виде стружки, которая затем удаляется с забоя буровым раствором. Буровая колонна при этом всё время находится в закрученном состоянии – при первом надавливании колонна начинает закручиваться, достигает угла кручения (согласно закону Гука), необходимого для страгивания породы и продолжает вращаться со скоростью вращения  $n$ , задаваемой столом ротора.

Если порода малопластична, то процесс непрерывного резания превращается в процесс прерывистого скалывания. После внедрения зуба в породу сила  $F$  закручивает колонну, уплотняя породу. При достижении предела прочности породы на сдвиг происходит выкалывание её по плоскости  $aa'$ , резец рывком перемещается вперёд (при этом колонна немного раскручивается), вновь передней гранью упирается в породу, колонна дозакручивается для достижения предела прочности породы, выкалывает новую порцию породы и т.д. Объём однократно скалываемой породы мал, поэтому скачки перемещения резки и углы скручивания-раскручивания колонны также малы.

В результате радиального давления боковой поверхности зуба с силой  $F$  на слой породы выполняется работа  $A$  по её деформации в направлении движения зуба (рисунок 4).

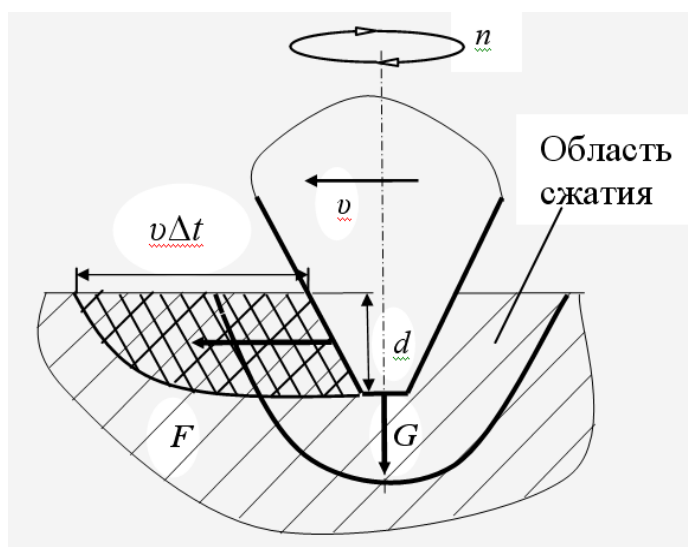


Рисунок 4. Воздействие на породу сил  $G$  и  $F$

При этом на сжатие и сдвиг породы затрачивается энергия  $\Delta W$ , которая приводит к разрушению некоторого элементарного образца длиной  $v\Delta t$ , толщиной  $d$  и шириной  $l$  (заштрихован сеткой, ширина зуба  $l$  не показана).

$$A = \Delta W \quad (1)$$

Это разрушение может быть двух видов – без нарушения структуры сдвигаемого образца породы и с нарушением структуры.

**1) Если порода мягкая,** то она срезается пластом и энергия тратится только на образование поверхности отслоения породы. Небольшое объёмное разрушение (дробление) породы тоже имеет место, но только в зоне контакта с поверхностью зуба, в целом же отслоение пласта происходит без нарушения его структуры.

В этом случае работу зуба можно найти как

$$A = Fv\Delta t, \quad (2)$$

где  $\Delta t$  – время работы зуба,

а энергию как

$$\Delta W = \Delta S_{mp}\sigma_{нов}, \quad (3)$$

где  $\Delta S_{mp} = v\Delta t \cdot (l + 2 \cdot d)$  – площадь поверхности образовавшейся объёмной трещины;

$\sigma_{нов}$  – поверхностная плотность свободной энергии вещества (коэффициент поверхностного натяжения) материала породы. Он характеризует силы межмолекулярного притяжения веществ и определяет силу, которая необходима для разрыва межмолекулярных связей.

Тогда из (1) следует, что сила, разрушающая породу по поверхности  $F_{нов}$

$$F_{нов} = \frac{\Delta S_{од} \cdot S_{ива}}{u\Delta t} = \frac{u\Delta t \cdot (l + 2d) \cdot S_{ива}}{u\Delta t} = (l + 2d) \cdot S_{ива} \quad (4)$$

определяется толщиной и шириной сдвигаемого слоя, коэффициентом поверхностного натяжения материала породы и не зависит от длины пути зуба.

**2) Если порода хрупкая,** то происходит структурное разрушение выколотого образца породы по всему объёму на мелкие кусочки разнообразной формы и в формуле (3) площадь поверхности заменяется на объём. При этом общая поверхность всех кусочков значительно больше, для чего

требуется гораздо большая энергия

$$\Delta W = \Delta V \sigma_{нов} k = v \Delta t \cdot d \cdot l \cdot \sigma_{нов} k_n,$$

где  $k_n$  – коэффициент объёмного разрушения, характеризующий трещиноватость породы, её способность раздробливаться на куски, вплоть до порошкообразного состояния. Он зависит как от свойств самой породы, так и от параметров режима бурения  $G$ ,  $n$ ,  $Q$  и свойств промывочной жидкости – плотности  $\rho$ , пластической вязкости  $\eta$ , динамического напряжения сдвига  $\tau$  и др.

Тогда из (1) сила структурного разрушения породы  $F_{cmp}$

$$F_{\dot{n}\dot{o}\dot{\delta}} = \frac{u \Delta t \cdot d \cdot l \cdot S_{\dot{i}\dot{i}\dot{a}} k_i}{u \Delta t} = d \cdot l \cdot S_{\dot{i}\dot{i}\dot{a}} k_i \quad (5)$$

зависит от сечения разрушаемого образца  $d \cdot l$ , его свойств и параметров режима бурения и также не зависит от длины пути зуба.

Определим влияние на разрушение породы скорости вращения ротора  $n$ .

Рассмотрим, какие деформации происходят с образцом породы объёмом  $\Delta V$  при сдвиге (рисунок 5).

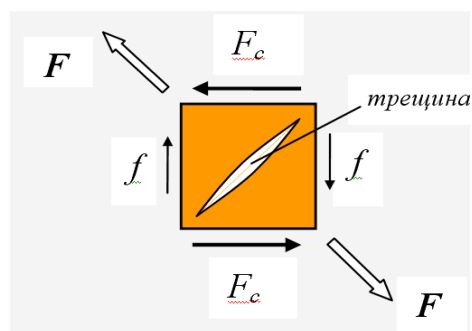


Рисунок 5. Деформация образца при сдвиге

К горизонтальным граням образца приложены встречно направленные силы  $F_c$ , которые вызывают растягивающие силы  $f$ , приложенные к вертикальным граням. В итоге возникают результирующие силы  $F$ , которые растягивают образец до образования трещины.

Работа  $A$ , совершаемая при сдвиге затрачивается на собственно разрушение образца  $A_{разр}$  и на диссипативное выделение энергии в виде тепла

$A_{\text{дис}}$ , которое возникает при деформации (силы трения, изменение формы, структуры, образование трещин и др.) породы, т.е.

$$A = A_{\text{разр}} + A_{\text{дис}}$$

При этом

$$A_{\text{разр}} = \Delta V \sigma_{\text{нов}} k_n;$$

$$A_{\text{дисс}} = M_{\text{дис}} \Delta \varphi,$$

где  $M_{\text{дис}}$  – диссипативный момент, действием которого вызывается выделение тепловой энергии;

$\Delta \varphi$  – угол закручивания бурильной колонны;

Момент  $M_{\text{дис}}$  можно выразить через угловую скорость вращения ротора в виде полинома

$$M_{\text{дис}} = a_0 + a_1 \omega + a_2 \omega^2, \text{ где } - \text{ коэффициенты разложения.}$$

Коэффициенты  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  имеют следующий физический смысл:

$a_0$  – момент на долоте, при котором возникает "сухое" трение шарошек о забой, т.е. трение, обусловленное взаимодействием шероховатостей на поверхностях зубьев и забоя, возникает при отсутствии перемещения ( $\omega=0$ ) и изменяется от 0 до момента страгивания породы при деформации сдвига;

$a_1$  – момент, возникающий при трении зубьев долота о породу забоя во время перемещения шарошек;

$a_2$  – момент, возникающий при трении зубьев долота о породу забоя при турбулентном движении бурового раствора через долото, учитывает как трение шарошек о "чистый" раствор, поступающий в скважину, так и трение о раствор, содержащий частицы выбуренной породы

Для совершения работы  $A$  к долоту прикладывается крутящий момент  $M_{\text{кр}}$ , под действием которого оно поворачивается на угол  $\Delta \varphi$ , т.е.



$$A = M_{кр} \Delta\varphi = \Delta V \sigma_{ног} k_n + (a_0 + a_1\omega + a_2\omega^2)\Delta\varphi. \quad (6)$$

Продифференцировав (6), получим:

$$\dot{I}_{\epsilon\delta} \frac{dj}{dt} = \frac{dV}{dt} S_{\bar{i}\bar{a}} k_i + (\dot{a}_0 + \dot{a}_1 w + \dot{a}_2 w^2) \frac{dj}{dt} \quad (7)$$

Поскольку  $d\varphi/dt = \omega$ , то относительно объёма выбуренной породы в единицу времени  $dV/dt$  можно записать:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\dot{I}_{\epsilon\delta} w - (\dot{a}_0 + \dot{a}_1 w + \dot{a}_2 w^2) w}{S_{\bar{i}\bar{a}} k_i}. \quad (8)$$

Полученная величина определяет объём выбуренной породы в единицу времени, т.е. является объёмной скоростью бурения. Для получения линейной (механической) скорости  $v_m$  её нужно разделить на площадь забоя:

$$u_i = \frac{4w[\dot{I}_{\epsilon\delta} - (\dot{a}_0 + \dot{a}_1 w + \dot{a}_2 w^2)]}{pD_{\bar{a}}^2 S_{\bar{i}\bar{a}} k_i},$$

или, после замены  $\omega = 2\pi n$

$$u_i = \frac{8n[\dot{I}_{\epsilon\delta} - (\dot{a}_0 + \dot{a}_1 2pn + \dot{a}_2 4p^2 n^2)]}{D_{\bar{a}}^2 S_{\bar{i}\bar{a}} k_i}. \quad (9)$$

Таким образом, в результате вдавливания зуба в забой и его перемещения по направлению вращения долота возникает два вида разрушения - деформация сжатия породы под долотом и деформация её сдвига по радиусу движения зуба. В результате вертикального и радиального давления боковой поверхностью зуба на слой породы толщиной  $d$  затрачивается некоторая энергия  $\Delta W$ , которая идёт на разрушение породы как под долотом (в результате её сжатия), так и по направлению движения зуба (в результате сдвига).

Вращение долота оказывает на породу воздействие в виде момента

вращения  $M_{кр}$ , который вызывает силу  $F$  – рис. 4. Эта сила разрушает породу на забое посредством её сдвига и зависит от площади контакта зуба со сдвигаемой поверхностью, т.е. от глубины проникновения зуба в забой.

Практика бурения показывает, что крутящий момент на роторе (долоте)  $M_{кр}$  и осевая нагрузка  $G$  связаны линейной зависимостью

$$M_{кр} = k_G G, \quad (10)$$

где  $k_G$  – коэффициент пропорциональности.

При контролировании значений  $M_{кр}$  и  $G$  в ходе углубления забоя скважины на буровой получают одинаковые по характеру графики изменения этих параметров во времени, т.е. функции  $M_{кр}(t)$  и  $G(t)$  идентичны в рабочем диапазоне изменения параметров управления процессом.

Поэтому основным регулируемым параметром управления ТП бурения является осевая нагрузка  $G$ , а крутящий момент  $M_{кр}$  на буровой контролируется для предупреждения аварий и осложнений – заклинки и прихватов инструмента в скважине, ограничение крутящего момента при свинчивании труб и т.п. Заменяя в (9) крутящий момент на осевую нагрузку получим:

$$u_i = \frac{8n[k_G G - (\dot{a}_0 + \dot{a}_1 2pn + \dot{a}_2 4p^2 n^2)]}{D_a^2 S_{\dot{a}} k_i} \quad (11)$$

Таким образом, механическая скорость проходки при бурении скважин зависит от скорости вращения долота, крутящего момента на долоте, диаметра долота и свойств породы.

#### Литература

1. Справочник инженера по бурению. Под ред. В.И. Мищевича и Н.А. Сидорова. Т. 1, М.: Недра, 1973, 516 с.
2. Погарский А.А., Чефранов К.А., Шишкин О.П. Оптимизация процессов глубокого бурения. М.: Недра, 1981, 296 с.