

УДК 622.243

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ АНИЗОТРОПНОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ШАРОШЕЧНЫМИ ДОЛОТАМИ

**Нескоромных Вячеслав Васильевич,**

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники  
разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий  
Сибирского федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск,  
пр. Свободный, 79/10. E-mail: sovair@bk.ru

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью решения проблемы управления направлением скважин при бурении.

**Цель работы:** получить аналитические зависимости для определения дестабилизирующего работу шарошечного долота опрокидывающего момента, возникающего при разрушении анизотропной горной породы, и установить аналитическую связь особенностей конструкции долота с величиной данного силового фактора.

**Методы исследования:** анализ результатов экспериментальных работ по механике разрушения анизотропных горных пород буровыми долотами и инденторами различной формы, аналитические исследования процесса разрушения горных пород, сопоставление и анализ сходности полученных данных и формул.

**Результаты.** Установлено, что одним из основных силовых факторов, вызывающих искривление скважин при разрушении анизотропных горных пород является опрокидывающий момент, вызванный неравенством упругих и прочностных свойств горных пород. Величина этого момента определяется величиной осевого усилия, размером и формой породоразрушающих элементов, а также параметрами анизотропии физико-механических свойств горной породы и углом встречи бурового инструмента со слоями горной породы.

Величина опрокидывающего момента при разрушении анизотропной горной породы шарошечным долотом изменяется за один оборот вращения долота на забое, при этом число максимальных и минимальных значений, а также их амплитуда колебаний зависят от числа шарошек долота и угла наклона осей вращения шарошек по отношению к забою скважины. Отмеченная особенность колебаний величины опрокидывающего момента может использоваться при проектировании компоновок буровой колонны с целью минимизации влияния опрокидывающего момента на искривление скважин, буримых в анизотропных горных породах.

Процесс искривления скважин в анизотропных породах, буримых шарошечными долотами, определяется механизмом разрушения горных пород и его особенностями, к которым следует отнести двойственный характер породоразрушающего действия – раздавливание породы осевой силой и дробление-скалывание породы косым ударом, который наносится под углом к забою, а также некоторые конструктивные особенности вооружения долот.

К особенностям вооружения шарошечных долот, влияющих на процесс разрушения анизотропной горной породы и появления опрокидывающего момента, можно отнести форму и размеры породоразрушающих вставок, угол их приотстреления, а также схему установки породоразрушающих вставок в венцах шарошек долота.

### **Ключевые слова:**

Горная порода, бурение, шарошечные долота, поле механических напряжений, искривление скважин.

Процесс разрушения анизотропных горных пород при бурении сопровождается искривлением стволов скважин, разрушением керна, снижением производительности бурения. Механизм искривления скважин, благодаря исследованиям отечественных и зарубежных специалистов, определен как комплекс причин, задающих неравномерное разрушение забоя и стенок скважины. Новые данные о влиянии анизотропии горных пород на искривление скважин, форму сечения ствола скважины и другие показатели приведены в работе [1], в которой обобщены научные результаты исследований по материалам бурения Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3).

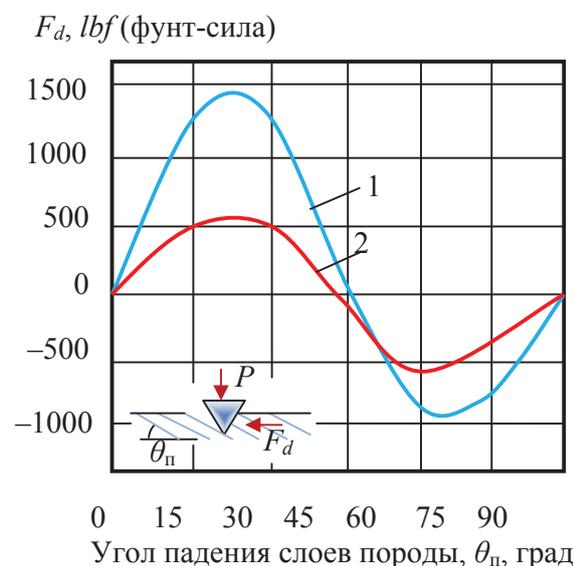
В работе убедительно показана тесная связь показателя анизотропии по упругости с формой сечения ствола и разработанностью ствола по диаметру, а также показано мощное влияние анизотропии горных пород на процесс формирования основного и вновь зарезаемых стволов скважины. В интервалах залегания анизотропных пород скважины могут иметь максимальную разработанность и овальность ствола, а параметры последней (соотно-

шение длин осей овала) часто согласуются с показателем анизотропии.

С.С. Сулакшин [2], Ю.А. Боярко [3], А. Лубинский и Г. Вудс [4], Ю.Т. Морозов [5], А.Г. Калинин [6], В. Бредли [7], В.В. Кривошеев [8], А.Е. Колесников [9, 10], Л.Г. Шолохов [11], В.П. Зиненко [12, 13] в своих работах показали, что анизотропия является основным фактором, обуславливающим искривление, а процесс набора кривизны определяется тем, что анизотропная порода оказывает максимальное сопротивление разрушению вдоль слоистости или сланцеватости, а минимальное – в перпендикулярном направлении. Последнее направление рядом специалистов [2, 3, 5, 9, 10, 12] называется линией наименьшего сопротивления (ЛНС) породы. Во всех промежуточных направлениях величина сопротивления оказывается заключенной между указанными экстремальными значениями. В названных работах индивидуально не рассматриваются особенности искривления скважин при бурении анизотропных горных пород шарошечными долотами.

В. Бредли [7], развивая ранее сформулированные положения теории Р. Макламора (1971 г.) о

механизме искривления скважин в анизотропных породах под действием боковой силы  $F_d$ , провел экспериментальные работы по определению названной силы, действующей на буровой инструмент. Возникновение боковой отклоняющей силы  $P$ . Макламор объяснил, рассматривая процесс взаимодействия реза инструмента и борта лунки разрушения в породе.



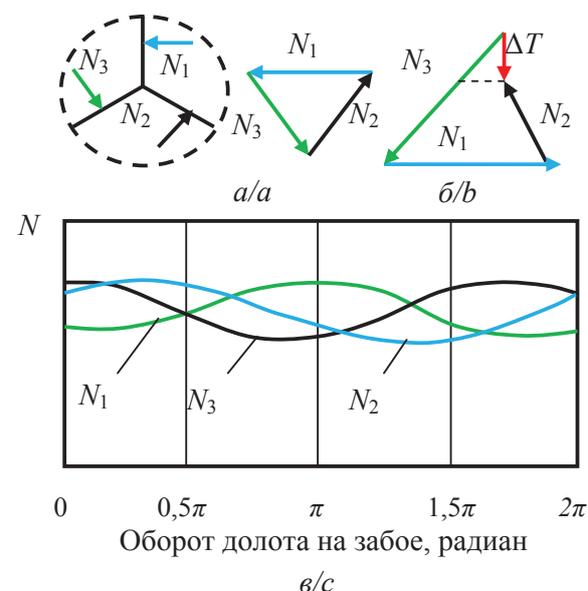
**Рис. 1.** Экспериментальные зависимости отклоняющей силы  $F_d$  от угла падения слоев породы (сланец Green River), по В. Бредли, для клиновидного индентора с углами приострения: 1)  $60^\circ$ ; 2)  $30^\circ$

**Fig. 1.** Experimental dependences of deflecting force  $F_d$  on a slope angle of rock layers (Green River shale), according to V. Bredley, for V-type indenter with a cutting angle: 1)  $60^\circ$ ; 2)  $30^\circ$

На рис. 1 воспроизведен график зависимости  $F_d=f(\theta_n)$  из работы В. Бредли. Графики получены для клиновидных резов шарошечного долота с углами приострения  $60$  и  $30^\circ$  (кривые соответственно 1 и 2) при их внедрении в породу на глубину  $3,8$  мм. Верхняя часть графиков дает значения силы  $F_d$ , действующей в направлении отклонения ствола скважины вкrest простирания (положительные значения), нижняя – вниз по падению слоев породы (отрицательные значения). Можно отметить, что в соответствии с условиями эксперимента осевые усилия нагружения инденторов были различны, отличались и размеры полей упруго-пластической деформации породы под индентором с различными углами приострения.

Следует отметить, что характер кривых на рис. 1 в целом согласуется с фактическими закономерностями естественного искривления скважин, согласно которым при углах встречи меньше критических стволы скважин в анизотропных породах отклоняются в направлении падения слоев, а при углах встречи больше критического значения – вкrest простирания слоев породы. То есть может происходить изменение направления искривления скважин в зависимости от угла встречи оси бурово-

го инструмента и напластования горных пород [2, 4, 5, 9, 10 и др.]. В то же время, если придерживаться теории Р. Макламора, которую поддерживает В. Бредли, объяснить характер кривых, а именно, их синусоидальность со сменой направления действия боковой силы, вряд ли удастся, так как нельзя выявить причину смены направления отклоняющей силы и дать объяснение природы критического угла встречи. Многочисленные исследования [2, 10, 8] показали, что происходит опережающий скол борта лунки разрушения вдоль слоистости или сланцеватости породы независимо от угла встречи со слоями, а это предполагает постоянство направления силы  $F_d$  в сторону восстания слоев породы. Очевидно, что природа явления искривления скважин в анизотропных породах является более сложной, а при исследовании природы этого явления следует учитывать как разнообразие физико-механических свойств анизотропных пород, так и особенности механики разрушения горных пород теми или иными способами бурения и типами породоразрушающих инструментов.



**Рис. 2.** Схемы векторов и графики усилий сопротивлений разрушению породы шарошками трехшарошечного долота при бурении: а) изотропной породы (геометрическая сумма сил сопротивления равна нулю); б) анизотропной породы (геометрическая сумма сил равна  $\Delta T$ ); в) графики усилий сопротивления разрушению  $N_1, N_2, N_3$ , полученные экспериментально за один оборот долота на забое

**Fig. 2.** Diagrams of vectors and force graphs of three-cone rollers resistance to rock destruction when drilling: a) isotropic rock (vector sum of resistance force equals zero); b) anisotropic rock (vector force sum equals  $\Delta T$ ); c) force graphs of destruction resistance  $N_1, N_2, N_3$  obtained experimentally per one turn of a chisel on a face

Результаты исследований В. Бредли [7] позволяют сделать вывод о том, что значение напряженного состояния породы при разрушении, а также размер области упруго-пластического деформирования породы задают значение дестабилизиру-

щей силы, действующей на инструмент. Так, для реза с углом приострения  $60^\circ$  усилие так называемой боковой силы  $F_d$  оказалось выше, чем для реза с меньшим углом приострения.

Результаты экспериментальных исследований [14–16] отклоняющей силы, возникающей при взаимодействии трехшарошечного долота с анизотропной горной породой, показали некоторые особенности процесса, характерные для данного типа бурового инструмента. Измерения были выполнены на стенде с тензометрическими датчиками усилия сопротивления разрушению породы на каждой шарошке и показали, что если при бурении изотропной породы силы сопротивлений на каждой шарошке равны между собой, а их результирующая равна нулю в любой момент времени углубления скважины (рис. 2, а), то при бурении анизотропной породы это соотношение сил сопротивления не выполняется, результирующая сила не равна нулю и выполняет роль отклоняющего усилия  $\Delta T$ , смещающего долото от первоначальной траектории поступательного движения с каждым новым оборотом долота вокруг оси вращения (рис. 2, б). При этом, очевидно, меняется и кинематическая характеристика работы долота, например, увеличивается эффект проскальзывания шарошек по забою. На графиках (рис. 2, в) даны кривые усилий  $N_1, N_2, N_3$  на каждой из трех шарошек за один оборот вращения долота на забое. Из графиков следует, что величина сопротивления разрушению породы на каждой шарошке изменяется с периодом в половину оборота долота на забое.

Стеновые исследования [11–13] показали повышение отклоняющей силы по мере роста диаметра долота, а максимум этой силы получен при угле встречи слоев породы и оси инструмента, равном примерно  $70^\circ$ . При повышении числа и размеров породоразрушающих вставок на шарошках долота величина отклоняющей силы увеличивается, что согласуется с данными В. Бредли [7]. При работе шарошечного долота наблюдаются также колебания величины отклоняющей силы, частота которых связана с числом шарошек долота.

Рассмотрим теорию разрушения анизотропных горных пород с учетом особенностей конструкции и механизма разрушения породы шарошечными долотами.

Основные особенности механизма разрушения анизотропных горных пород определены их неравнопрочностью в различных направлениях [17, 18]. Как правило, анизотропные горные породы – слоистые, сланцеватые или обладающие флюидальностью – имеют более высокие значения упругости и твердости в направлении сформировавшихся слоев горной породы, т. е. для основной части анизотропных горных пород справедливо следующее соотношение:

$$E^{\parallel} / E^{\perp} > 1,$$

где  $E^{\parallel}, E^{\perp}$  – модули упругости горной породы вдоль и перпендикулярно слоям, сланцеватости или флюидальности, соответственно, Па.

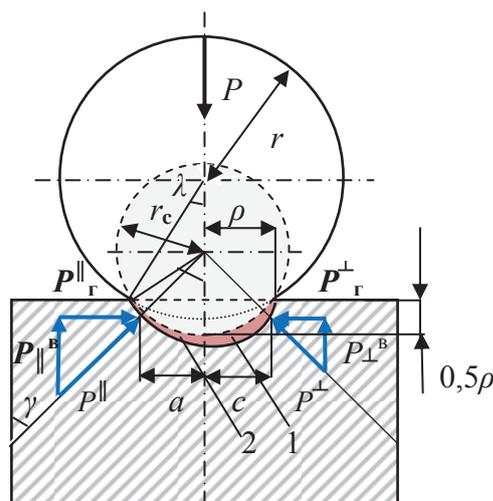


Рис. 3. Схема для анализа процесса деформирования и разрушения анизотропной породы шаровым индентором: 1) контур внедренного в породу индентора; 2) контур ядра сжатия в породе

Fig. 3. Diagram for analysis of anisotropic rock deformation and destruction by a ball indenter: 1) contour of the indenter introduced into the rock; 2) contour of a compressing kernel in the rock

Для анизотропных горных пород в основном выполняется следующее соотношение деформационных характеристик в соответствии с законом Р. Гука [19]:

$$\xi^{\parallel} = \sigma / E^{\parallel} > \xi^{\perp} = \sigma / E^{\perp}, \quad (1)$$

где  $\xi^{\parallel}$  и  $\xi^{\perp}$  – относительная деформация породы вдоль и перпендикулярно слоям, соответственно;  $\sigma$  – напряжения в ядре сжатия породы, приводящие к её разрушению (образованию лунки разрушения), Па.

Как следует из формулы (1), поскольку модуль упругости анизотропной породы вдоль слоистости или сланцеватости, как правило [19], значительно превышает модуль упругости породы в перпендикулярном направлении, то для получения напряжения в породе, равного  $\sigma$ , анизотропная порода должна получить различную деформацию в различных направлениях относительно перпендикулярно слоистости или сланцеватости.

Таким образом, ядро сжатия для анизотропной породы может формироваться в виде эллипсоида, в отличие от случая, когда порода изотропна и ядро сжатия соответствует симметричной поверхности в виде шара [17]. При этом форма ядра будет более вытянута в направлении, перпендикулярном слоистости или сланцеватости, и сжата в направлении слоев. Подобная форма ядра сжатия приводит к выколу лунки асимметричной формы. Как следствие, подобная неравномерность деформации и разрушения породы приводит в первую очередь к искривлению ствола скважины при бурении.

На рис. 3 дана схема для анализа процесса деформирования и разрушения анизотропной породы шаровым индентором, который моделирует воздействие на породу при бурении шарообразных резцов

и породоразрушающих элементов, например шарошечных долот с вооружением типа К или ОК (для бурения твердых и очень твердых горных пород).

Область сжатия породы под индентором будет отличаться от симметричной шарообразной (линия 1) и получит вытянутость в направлении, перпендикулярном слоям породы (линия 2).

Усилие воздействия на индентор  $P$  затрачивается при деформировании породы на преодоление сил внутреннего трения в деформируемых слоях породы, а также на преодоление упругих реакций. С учетом данной формулировки упругие реакции породы  $P^{\parallel}$  и  $P^{\perp}$ , направленные вдоль и перпендикулярно слоев породы и воздействующие на ядро сжатия породы (контур ядра сжатия – линия 1), можно разложить на вертикальные

$$P_{//}^{\text{в}} = P \cos^2 \gamma (1 - \text{tg} \varphi^{\prime\prime}), \quad (2)$$

$$P_{\perp}^{\text{в}} = P \sin^2 \gamma (1 - \text{tg} \varphi^{\perp}) \quad (3)$$

и горизонтальные составляющие

$$P_{//}^{\text{г}} = P \sin \gamma \cos \gamma (1 - \text{tg} \varphi^{\prime\prime}), \quad (4)$$

$$P_{\perp}^{\text{г}} = P \sin \gamma \cos \gamma (1 - \text{tg} \varphi^{\perp}), \quad (5)$$

где  $\gamma$  – угол между направлением приложения усилия  $P$  и плоскостями слоев, град;  $\varphi^{\prime\prime}, \varphi^{\perp}$  – углы внутреннего трения соответственно в направлении слоев породы и перпендикулярно им, град.

Из формул (2)–(5) следует, что при вдавливании индентора в анизотропную породу в процессе её упругого деформирования на торце индентора оказывают действие неуравновешенные реакции породы. Действие вертикальных реакций, точки приложения которых находятся на расстоянии  $a$  и  $c$  от оси индентора, можно привести к действию опрокидывающего момента  $M_{\text{он}}$ :

$$M_{\text{он}} = P_{//}^{\text{в}} a - P_{\perp}^{\text{в}} c. \quad (6)$$

В соответствии с [18], формула (6) для расчета  $M_{\text{он}}$  для плоского цилиндрического индентора имеет следующий вид:

$$M_{\text{он}} = Pr \begin{bmatrix} \cos^2 \sin \gamma \sqrt{\frac{1}{K}} (1 - \text{tg} \varphi^{\prime\prime}) - \\ - \sin^2 \gamma \cos \gamma \sqrt{K} (1 - \text{tg} \varphi^{\perp}) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $P$  – осевое усилие на внедряемый в породу индентор, Н;  $r$  – радиус торца цилиндрического индентора, м;  $K$  – коэффициент анизотропии горной породы, определяемый по соотношению модулей упругости вдоль слоев и перпендикулярно слоям горной породы.

В отличии от цилиндрического индентора с плоским торцом, для которого получена формула (7), глубина возникновения максимальных касательных напряжений под шаровым индентором будет равна  $0,5\rho$  – половине радиуса пятна контакта индентора с породой (рис. 3), что определяет как размер ядра сжатия, так и глубину формируемой лунки разрушения в породе.

Определим  $M_{\text{он}}$  относительно центра ядра сжатия породы, согласно уравнению (6).

Из схемы, приведенной на рис. 4, следует, что радиус ядра сжатия породы равен  $r_c = \frac{\rho}{\sin \lambda}$  а расстояния  $c$  и  $a$  соответственно равны  $r_c \cos \gamma$  и  $r_c \sin \gamma$ .

Угол  $\lambda$  к моменту пластического деформирования породы, а именно когда глубина максимальных касательных напряжений под индентором соответствует значению  $0,5\rho$ , равен  $51-53^\circ$ . С учетом этого  $r_c = 1,25\rho$ , а  $M_{\text{он}}$  для индентора в форме шара, внедряющегося в анизотропную породу, определится из зависимости:

$$M_{\text{он}} = 1,25 P \rho F(\gamma), \quad (8)$$

где  $F(\gamma)$  – функция главного вектора  $M_{\text{он}}$  от угла встречи  $\gamma$ , равная выражению в квадратных скобках из формулы (7).

Зависимость  $\rho$  от глубины внедрения индентора в породу  $h$  в формуле (8) можно определить из формулы

$$\rho = \sqrt{dh + h^2},$$

где  $d$  – диаметр сферического торца внедряемого в породу индентора, м.

Отмеченные особенности механизма разрушения анизотропных горных пород приводят к перекосу внедряемых в породу инденторов – резцов бурового инструмента, самого бурового инструмента, повышению объема разрушаемой породы и соответственно повышенному износу инструмента, снижению выхода керна, вызывают естественное искривление стволов скважин.

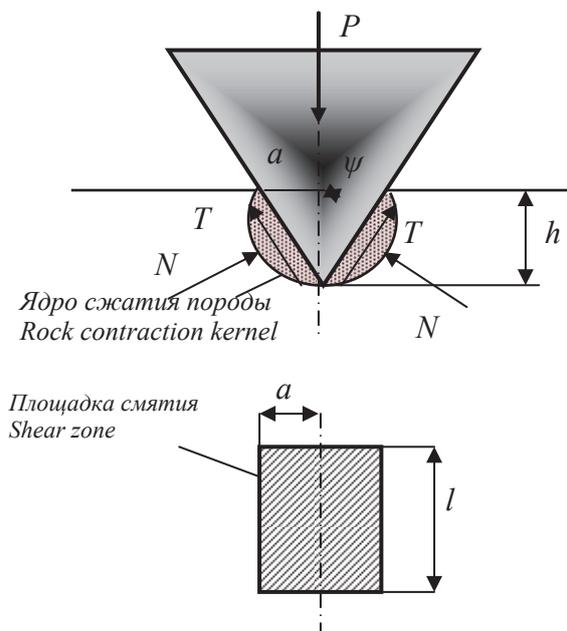


Рис. 4. Схема для определения глубины внедрения в породу клиновидного индентора

Fig. 4. Diagram for determining the depth of V-type indenter introduction into the rock

Полагая, что шаровой индентор вполне точно моделирует процесс упруго-пластического деформирования породы отдельными резцами бурового инструмента, получена зависимость для расчета опрокидывающего момента, действующего на торец бурового инструмента, оснащенного шарообразными породоразрушающими вставками:

$$M_{он} = 1,25P_{ос}F(\gamma)\sqrt{dh + h^2}, \quad (9)$$

где  $P_{ос}$  – осевая нагрузка на буровой инструмент, кН;

$$h_{ш} = \frac{d}{2} - \sqrt{\frac{d^2}{4} - \frac{P_{ос}}{\pi N p_{ш}(1 + \operatorname{tg} \varphi)}} - \text{глубина внедрения}$$

шарообразной породоразрушающей вставки в породу, м;  $d$  – диаметр породоразрушающей вставки, м;  $p_{ш}$  – твердость анизотропной горной породы, измеренная в направлении приложения осевой силы  $P$ , Па;  $N$  – количество породоразрушающих вставок бурового инструмента, одномоментно опирающихся на забой;  $\varphi$  – угол внутреннего трения в слоях породы при деформировании, измеренный в направлении приложения осевой силы  $P$ , град.

С целью получения формулы для расчета опрокидывающего момента, действующего на клиновидный индентор, по форме, соответствующей форме вставок, которыми оснащаются шарошечные долота типа М, С (для бурения мягких горных пород и горных пород средней твердости), рассмотрим процесс его вдавливания (рис. 4) в породу. Ядро сжатия породы формируется на боковых поверхностях индентора. По аналогии с решением при получении формулы для расчета  $M_{он}$ , действующего на клиновидный индентор, решение будет выглядеть следующим образом:

$$M_{он} = PaF(\gamma) = Ph_k \operatorname{tg} \psi F(\gamma), \quad (10)$$

где  $P$  – осевая нагрузка на индентор, кН;  $a$  – ширина площадки смятия под индентором, м;  $\psi$  – половина угла приострения индентора, град;  $h_k$  – глубина внедрения индентора в породу, м.

В работе [20] определена глубина внедрения клиновидного индентора в породу, которую можно использовать при расчете значения  $M_{он}$ :

$$h_k = \frac{P}{2p_{ш} \operatorname{tg} \psi (\mu \cos \psi + \sin \psi)(1 + \operatorname{tg} \varphi)}, \quad (11)$$

где  $p_{ш}$  – твердость анизотропной горной породы, измеренная в направлении приложения осевой силы  $P$ , Па;  $l$  – ширина индентора, м;  $\varphi$  – угол внутреннего трения в слоях породы при деформировании, измеренный в направлении приложения осевой силы  $P$ , град;  $\mu$  – коэффициент трения индентора о породу, измеренный в направлении приложения осевой силы  $P$ .

Анализ полученных зависимостей (10) и (11) и сравнение данных эксперимента, опубликованных в работе [7], показывают, что значение  $M_{он}$  для индентора с углом приострения  $60^\circ$  оказалось больше в 1,5–2,4 раза, в сравнении с индентором, у которого угол приострения  $30^\circ$  при условии равенства глубины внедрения инденторов в породу, поскольку

ку потребовалось более значительное осевое усилие на индентор для достижения глубины внедрения 3,8 мм. При этом площадка смятия горной породы была существенно больше по размеру. Следует полагать, что природа появления усилия  $F_d$  и  $M_{он}$  одна и та же, а именно, вызвана анизотропией физико-механических свойств горной породы.

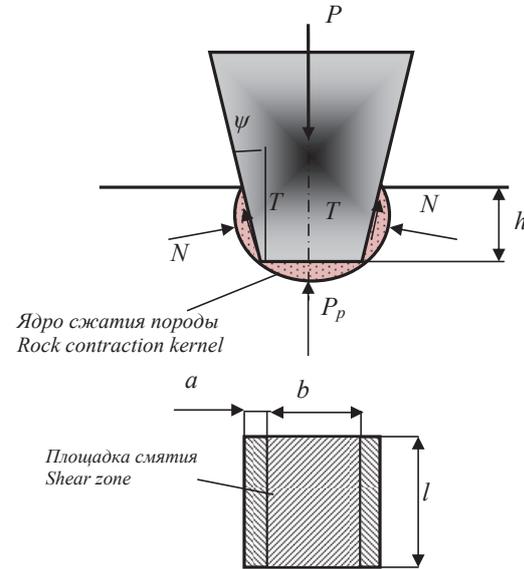


Рис. 5. Схема для определения глубины внедрения в породу клиновидного с площадкой притупления индентора

Fig. 5. Diagram for determining the depth of introduction of V-type indenter with a wear flat into the rock

Для случая, когда индентор имеет форму равнобедренной трапеции (соответствует форме породоразрушающих вставок шарошечных долот для бурения горных пород средней твердости и твердых) с плоской площадкой (например, притупления) шириной  $b$ , площадка смятия горной породы будет складываться из площадки, равной плоской части торца индентора, равной  $b \cdot l$ , и двух боковых площадок, смятие которых производится наклонными поверхностями индентора (рис. 5).

Формула для расчета  $M_{он}$ , действующего на индентор в форме равнобедренной трапеции, будет выглядеть следующим образом:

$$M_{он} = P(a + 0,5b)F(\gamma) = P(0,5b + h_t \operatorname{tg} \psi)F(\gamma), \quad (12)$$

где  $P$  – осевая нагрузка на индентор, кН;  $a, b$  – размеры торца индентора (рис. 5), м;  $\psi$  – половина угла конусности индентора, град;  $h_t$  – глубина внедрения индентора в породу, м.

В работе [20] определена глубина внедрения индентора в форме равнобедренной трапеции в породу  $h_t$ , которую можно использовать при расчете значения  $M_{он}$ .

$$h_t = \frac{P - blp_{ш}(1 + \operatorname{tg} \varphi)}{2p_{ш} \operatorname{tg} \psi (\mu \cos \psi + \sin \psi)(1 + \operatorname{tg} \varphi)}. \quad (13)$$

В формуле (13) обозначения аналогичны таковым в формулах (11) и (12).

При решении уравнений (9)–(13) твердость горной породы и коэффициент внутреннего трения рассчитываются в направлении приложения осевого усилия с учетом угла встречи оси инструмента и слоистости или сланцеватости горной породы  $\gamma$ . На основании решения уравнения эллипса можно рассчитать значения искомого параметра в направлении приложения осевой силы  $P$ , если известно значение параметра, аналогичное искомому, но в направлении слоев породы  $A''$  по формуле [17]

$$A = \frac{A''}{\cos\gamma\sqrt{1 + K^2\tg^2\gamma}}, \quad (14)$$

где  $A''$  – значение искомого параметра, например твердости в направлении слоев породы;  $K$  – коэффициент анизотропии горной породы, определяемый по соотношению модулей упругости вдоль слоев и перпендикулярно слоям горной породы.

Для определения искомого параметра по формуле (14) следует в неё подставить значения угла  $\gamma$ ,  $K$  и соответствующие значению данного параметра в направлении слоев  $A''$ , например, значение твердости породы в направлении слоев. В результате можно рассчитать значение твердости породы в направлении приложения усилия  $P$ . Аналогично можно определить значения коэффициентов внутреннего и внешнего трения и иных параметров физико-механических свойств горной породы.

Основными силовыми факторами, определяющими кривизну и направленность скважин в анизотропных породах, являются опрокидывающий момент  $M_{он}$  и отклоняющее усилие  $\Delta T$ , возникающее при перекосе бурового инструмента. Данные силовые факторы обусловлены самой природой анизотропных горных пород и их полное устранение при механическом разрушении таких пород невозможно. Однако возможна, в определенной степени, нейтрализация этих силовых факторов, а именно уменьшение их дестабилизирующего действия на буровую компоновку, которое проявляется в повышении деформации компоновки, перекосе бурового инструмента, фрезеровании ствола скважины в одном преимущественном направлении.

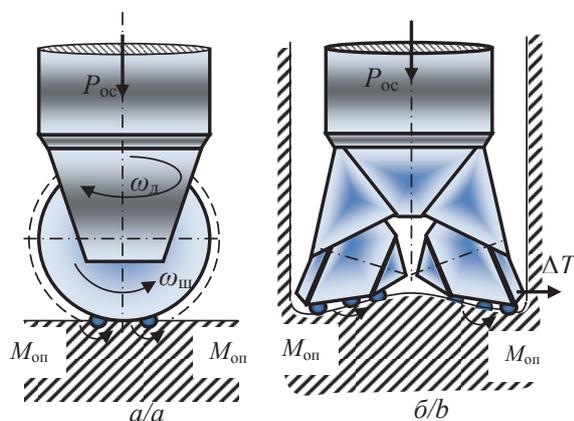


Рис. 6. Схема взаимодействия долота с анизотропной горной породой

Fig. 6. Pattern of a chisel interaction with anisotropic rock

Рассмотрим взаимодействие с анизотропной породой двухшарошечного долота в тот момент, когда ось вращения шарошек располагается вдоль линии простирания слоистости горной породы (рис. 6, а). При внедрении зубцов долота в породу на каждый из них передаются единичные опрокидывающие моменты, которые, суммируясь, воздействуют на шарошку. Однако суммарный момент  $M_{он}^c$ , как результат геометрического суммирования единичных моментов, на корпус долота и компоновку передается не полностью, так как шарошка установлена в долоте с возможностью вращения, а  $M_{он}^c$  действует в плоскости вращения шарошек. При угле наклона оси вращения шарошек  $\beta_{ш}$  менее  $90^\circ$  момент, передаваемый на компоновку, будет равен

$$M_{он}^k = \cos\beta_{ш}M_{он}^c. \quad (15)$$

Если оси вращения шарошек горизонтальны, то  $M_{он}^c$  в момент, когда оси вращения шарошек направлены вдоль слоистости или сланцеватости, равен нулю, а значит, опрокидывающий момент на компоновку через долото не передается.

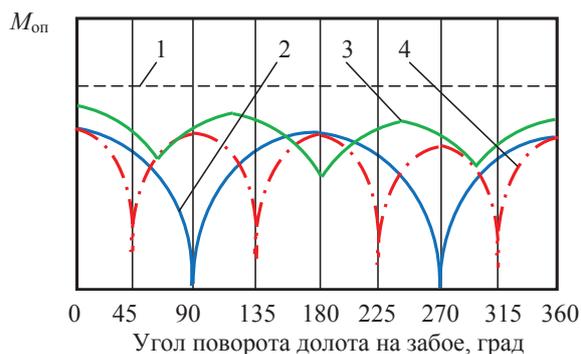


Рис. 7. Зависимости изменения величины опрокидывающего момента  $M_{он}$  за один оборот долот с различным числом шарошек на забое скважины. Долото: 1) режуще-скалывающего типа с круглым торцом; 2) двухшарошечное; 3) трехшарошечное; 4) четырехшарошечное

Fig. 7. Dependence of change of overturning moment  $M_{он}$  value per one turn of chisels with different number of cones on a well face. Bore bit: 1) of cutting-shearing type with round face; 2) two-cone; 3) three-cone; 4) four-cone

Таким образом, из формулы (15) понятно, что при определенном положении шарошки долота, когда ось её вращения параллельна слоям породы на забое скважины, опрокидывающий момент  $M_{он}^k$  на долото через шарошку практически не передается, а значит, не наблюдается и повышение изгиба компоновки и перекоса долота на забое.

При повороте долота на забое на четверть оборота вокруг продольной оси долота из положения, соответствующего его положению на схеме рис. 6, а,  $M_{он}^k = M_{он}^c$  независимо от угла наклона осей вращения шарошек, так как в этом случае направление действия опрокидывающего момента совпадает с направлением вращения шарошек.

Отмеченные особенности передачи опрокидывающего момента на шарошечные долота с различным числом шарошек представлены в виде графиков на рис. 7 (величина  $M_{оп}$  для всех инструментов дана в условном измерении). Из представленных графиков следует, что величина опрокидывающего момента за один оборот вращения шарошечных долот на забое изменяется, имея периодически максимальные и минимальные значения, а число максимальных и минимальных значений зависит от конструкции долот, а именно от числа симметрично установленных шарошек. В то же время для долот режуще-скалывающего типа без шарошек величина  $M_{оп}$  за оборот вращения остается неизменной (линия 1).

Таким образом, можно добиться некоторого повышения устойчивости буровых компоновок, если использовать выявленную характеристику  $M_{оп}$  при различной ориентации долота относительно слоистости или сланцеватости породы. В данном случае возможна ориентированная установка долота относительно компоновки с профильным поперечным сечением (эллиптическое и др.), обладающей неравной жесткостью на изгиб относительно различных главных осей поперечного сечения. При этом, если оси вращения шарошек двухшарошечного долота совмещаются с осью поперечного сечения компоновки, вдоль которой имеется максимальная жесткость, то удастся нейтрализовать действие  $M_{оп}$  на компоновку со стороны забоя и повысить устойчивость бурового снаряда. Данное техническое решение представлено в а.с. № 1231199 [21].

Анализ, выполненный на примере шарошечного долота, может иметь более широкое назначение и открывает направление разработки породоразрушающих инструментов для бурения анизотропных пород. Данное направление характеризуется динамизацией связей породоразрушающих элементов с самим буровым инструментом.

Подобный инструмент может разрабатываться на основе теоретических положений, сформулированных выше, что позволит обеспечить некоторую нейтрализацию дестабилизирующих силовых факторов, возникающих при разрушении пород с анизотропией физико-механических свойств. Например, в соответствии с законом изменения величины опрокидывающего момента предложены конструкции долота и коронки, способные нейтрализовать действие дестабилизирующей работу инструмента силовых факторов (пат. РФ № 2246603, 2167261) [22, 23].

Важной особенностью механизма разрушения горной породы шарошечным долотом является его двойственность – процесс раздавливания породы под действием осевого усилия  $P$  и дробление-скалывание породы усилием  $Q$  при перекачивании шарошки (рис. 8).

Осевая составляющая разрушающих усилий  $P$  обеспечит при угле встречи оси бурового инструмента со слоями горной породы  $\gamma$  появление опрокидывающего момента, значение которого можно

определить по формулам (8), (9), (10), (12) в зависимости от вида вооружения шарошек долота – сферические, конусные или трапецеидальные породоразрушающие вставки. Расчет по одной из формул позволяет получить график изменения  $M_{оп}$  в зависимости от угла встречи долота со слоями горной породы. Такая зависимость представлена на рис. 8 (позиция 1). Как следует из данной зависимости, наблюдается два максимальных значения  $M_{оп}$ : первый при малых значениях угла встречи  $\gamma$  – в этом случае опрокидывающий момент ориентирует инструмент в направлении падения слоев породы; второй при больших значениях угла встречи  $\gamma$  – в этом случае опрокидывающий момент ориентирует инструмент поперек простирающихся слоев породы.

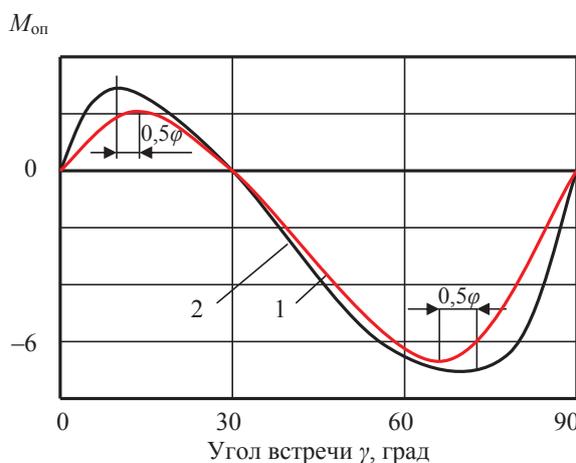


Рис. 8. Зависимость  $M_{оп}$  от угла встречи со слоями пород  $\gamma$ . График отражает влияние: 1) только осевой силы на долото; 2) усилия дробления-скалывания породы

Fig. 8.  $M_{оп}$  dependence on incident angle with rock layers  $\gamma$ . The graph reflects the influence of: 1) axial force on a bore bit; 2) rock breaking-shearing force

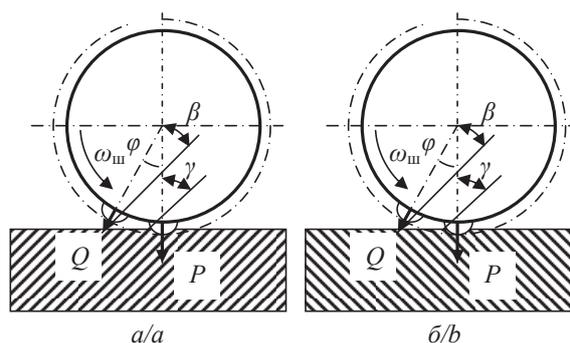


Рис. 9. Схема взаимодействия шарошечного долота с анизотропной горной породой при угле встречи  $\gamma$ . Положение шарошки на забое в момент: а) совпадения направления приложения удара с направлением слоистости; б) когда направление приложения удара ориентировано поперек слоистости

Fig. 9. Pattern of a cone bit interaction with anisotropic rock at incident angle  $\gamma$ . A cone roller position on a face at the moment: а) of coincidence of shock application direction with lamination direction; б) when shock application direction is oriented across lamination

При этом важно отметить, что в процессе вращения шарошки на забое за один оборот вращения долота одна из шарошек долота может воздействовать на породу в момент, при котором направление приложения ударной нагрузки  $Q$  совпадает с направлением падения слоев (рис. 9, а) и через пол-оборота наступает ситуация, при которой направление приложения ударной нагрузки ориентировано поперек слоев породы (рис. 9, б). Именно эта особенность и задает основную неравномерность разрушения анизотропной породы при работе шарошечного долота, так как твердость и упругость породы максимальны в направлении слоев и минимальны поперек слоев породы.

При разрушении анизотропной горной породы возможны два экстремальных с точки зрения неравномерности разрушения породы случая:

- направление приложения усилия  $Q$  в момент нанесения удара породоразрушающей вставкой совпадает с направлением ориентировки слоев породы;
- направление приложения усилия  $Q$  в момент нанесения удара перпендикулярно слоям породы.

В первом случае породоразрушающее действие вдоль приложения усилия  $Q$  будет испытывать максимальное сопротивление дроблению-скалыванию, так как анизотропная горная порода обладает максимальной твердостью и упругостью именно в этом направлении. Такой вариант процесса разрушения возможен, если угол встречи бурового инструмента  $\gamma$  будет равен значению  $0,5\varphi$  – половине центрального угла между осями породоразрушающих вставок в венце шарошки. Этот угол может составлять при более частом расположении вставок  $5-7^\circ$ , при более редком их расположении –  $10-15^\circ$ . В этом случае угол приложения удара породоразрушающей вставкой во второй позиции шарошки на забое (рис. 9, б) будет равен  $(90-0,5\varphi)$ .

Таким образом, при углах встречи буровым инструментом напластования горной породы, равно  $0,5\varphi$ , в одной части забоя инструмент будет испытывать максимальное сопротивление разрушению, а в диаметрально противоположной точке забоя – близкое к минимальному. При этом на величину разности сопротивлений разрушению будет влиять схема расстановки породоразрушающих вставок, а именно угол  $\varphi$ .

Во втором случае породоразрушающее действие вдоль приложения усилия  $Q$  будет испытывать минимальное сопротивление дроблению-скалыванию, так как анизотропная горная порода обладает минимальными значениями твердости и упругости именно в этом направлении. Такой вариант процесса разрушения возможен, если угол встречи бурового инструмента  $\gamma$  будет равен значению  $(90-0,5\varphi)$ . В этом случае угол приложения удара породоразрушающей вставкой во второй позиции шарошки на забое (рис. 9, б) будет равен  $0,5\varphi$ .

Например, если угол  $\varphi=20^\circ$ , а твердость горной породы вдоль слоев 1500 МПа, перпендикулярно слоям 1000 МПа, т. е. коэффициент анизотропно-

сти горной породы по твердости равен 1,5, в первом случае при угле встречи бурового инструмента с напластованием породы  $\gamma=10^\circ$  максимальная твердость при приложении усилия  $Q$  составит 1500 МПа, а в противоположной точке забоя при  $\gamma=80^\circ$  твердость породы будет равна 1009 МПа.

В результате такого различия в твердости в диаметрально противоположных точках забоя будет существенно отличаться и глубина внедрения породоразрушающих вставок шарошек долота, что приведет к росту опрокидывающего момента, деформации компоновки и повышенному искривлению скважины.

Во втором случае, когда усилие  $Q$  ориентировано поперек слоев породы, при выше использованных условиях расчета, минимальное значение твердости составит при угле встречи  $90^\circ$  1000 МПа, а максимальное – 1479 МПа.

На рис. 8 (позиция 2) приведен график изменения опрокидывающего момента с учетом составляющей разрушения горной породы дроблением-скалыванием под действием усилия  $Q$ . Данный график показывает, что области влияния максимальных значений опрокидывающего момента, возникающего при разрушении анизотропных горных пород, расширяются и смещаются в сторону меньших значений угла встречи в первом случае и в сторону больших значений угла встречи во втором случае. Величина смещения максимальных значений опрокидывающего момента, полученных при осевом приложении усилия и при косом ударе, ориентировочно может оцениваться как  $0,5\varphi$ . Отмеченная особенность механизма разрушения анизотропных горных пород шарошечными долотами сказывается на результатах искривления скважин в анизотропных породах, определяя большее влияние анизотропии горных пород на направление скважин, буримых в анизотропных породах.

#### Выводы

1. Одним из основных силовых факторов, вызывающих искривление скважин при разрушении анизотропных горных пород, является явление опрокидывающего момента, вызванного неравенством упругих и прочностных свойств горных пород. Величина этого момента определяется значением осевого усилия, размерами и формой породоразрушающих элементов, а также задается параметрами анизотропии физико-механических свойств горной породы и углом встречи бурового инструмента со слоями горной породы.
2. Величина опрокидывающего момента при разрушении анизотропной горной породы шарошечным долотом изменяется за один оборот вращения долота на забое, при этом число максимальных и минимальных значений, а также их амплитуда колебаний зависят от числа шарошек долота и угла наклона осей вращения шарошек по отношению к забоя скважины. От-

- меченная особенность колебаний величины опрокидывающего момента может использоваться при проектировании компоновок буровой колонны с целью минимизации влияния опрокидывающего момента на искривление скважин в анизотропных горных породах.
3. Процесс искривления скважин в анизотропных породах, буримых шарошечными долотами, определяется механизмом разрушения горных пород и его особенностями, к которым следует отнести двойственный характер породоразрушающего действия – раздавливание породы осевой силой и дробление-скалывание породы косым ударом, который наносится под углом к забоям, а также с некоторыми конструктивными особенностями вооружения долот.
  4. К особенностям вооружения шарошечных долот, влияющих на процесс разрушения анизотропной горной породы и появления опрокидывающего момента, можно отнести форму и размеры породоразрушающих вставок, угол их приострения, а также схему установки породоразрушающих вставок в венцах шарошек долота.
  5. Выявленные особенности механизма разрушения анизотропной горной породы шарошечными долотами, а также полученные аналитические зависимости расчета величины опрокидывающего момента могут использоваться при проектировании технических средств, например компоновок буровой колонны и технологий бурения скважин в анизотропных горных породах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / П.А. Бродский, Д.М. Губерман и др. / под ред. В.П. Орлова, Н.П. Лавёрова. – М.: МФ «Технонефтегаз», 1998. – 260 с.
2. Сулакшин С.С. Направленное бурение. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
3. Боярко Ю.Л. Борьба с искривлением скважин. – Томск: Изд-во ТПИ, 1969. – 110 с.
4. Вудс Г., Лубинский А. Искривление скважин при бурении. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 162 с.
5. Морозов Ю.Т. Бурение направленных и многоствольных скважин малого диаметра. – М.: Недра, 1976. – 211 с.
6. Калинин А.Г. Искривление скважин. – М.: Недра, 1974. – 294 с.
7. Bredley W.V. Formation characteristics have a key effect on hole direction // Oil and gas J. – 1975. – V. 73. – № 31. – P. 77–80.
8. Кривошеев В.В. Искривление скважин в анизотропных породах. – Томск: Изд-во НТЛ, 1999. – 240 с.
9. Колесников А.Е., Мелентьев Н.Я. Искривление скважин. – М.: Недра, 1979. – 176 с.
10. Колесников А.Е. Механизм искривления скважин. – Орджоникидзе, 1983. – 48 с. – Деп. В ЦНИИЭИцветмет 01.11.83, № 1080 цм – Д83.
11. Шолохов Л.Г. Теоретические основы технологии и проектирования направленного бурения скважин. – Свердловск: Изд-во Свердлов. горн. ин-та, 1982. – 110 с.
12. Зиненко В.П. Направленное бурение. – М.: Недра, 1990. – 152 с.
13. Боголюбовский К.А., Зиненко В.П., Кирсанов А.Н. Процесс естественного искривления скважин вращательного бурения в анизотропной среде // Изв. Вузов. Геология и разведка. – 1974. – № 3. – С. 110–116.
14. Гержберг Ю.М., Серета Н.Г. Об исследовании вектора нагрузки на забой в условиях разбуривания анизотропных горных пород // Технология бурения нефтяных и газовых скважин. – Уфа: УНИ, 1984. – С. 63–67.
15. Жеребкин А.И. Экспериментальный метод определения отклоняющей силы, возникающей при взаимодействии долота с наклонно-залегающей анизотропной породой // Изв. Вузов. Нефть и газ. – 1978. – № 1. – С. 13–17.
16. Экспериментальное исследование отклоняющей силы, возникающей при разбуривании наклонно-залегающих пород долотами различных типов / А.И. Жеребкин, Ю.М. Гержберг и др. // Технология бурения нефтяных и газовых скважин». – Уфа: УНИ, 1971. – Вып. 10. – С. 89–92.
17. Нескоромных В.В. Механика разрушения анизотропных горных пород при бурении скважин заданного направления. – М.: МГП «Геоинформмарк», 1997. – 57 с.
18. Нескоромных В.В. Направленное бурение и основы кернометрии. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 328 с.
19. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1984. – 359 с.
20. Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при бурении скважин. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2014. – 328 с.
21. Устройство для бурения скважин. А.с. СССР № 1231199, Е21В7/10, Бюл. № 18, 1986 г.
22. Буровой инструмент: пат. РФ № 2246603, Е21В 10/22, Е21В 10/48, заявл. 08.12.2003; опубл. 20.02.2005. – Бюл. № 6.
23. Буровая алмазная коронка: пат. РФ № 2167261, Е21В 10/48, заявл. 16.03.2000; опубл. 20.05.2001. – Бюл. № 5.

Поступила 30.05.2014 г.

UDC 622.243

## ANALYSIS OF ANISOTROPIC ROCK DESTRUCTION WITH CONE BITS

Vyacheslav V. Neskromnykh,

Dr. Sc., Siberian Federal University, 79/10, Svobodny Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia. E-mail: sovair@bk.ru

*Relevance of the work* is caused by the need to solve the problem of controlling well direction when drilling.

*The main aim of the study* is to obtain the analytical dependences for calculation of an overturning moment arising at rock destruction by anisotropic mountain. The moment destabilizes the work of roller cone bits. And to determine the analytical relation of bit design features with the size of this power factor.

**The methods used in the study:** the analysis of results of experimental works on mechanics of anisotropic rocks destruction by boring bits and indentors of various forms, analytical researches of rock destruction, comparison and analysis of convergence of the obtained data and formulas.

**The results.** It was ascertained that one of the major power factors causing a curvature of wells at destruction of anisotropic rocks is the occurrence of the overturning moment caused by an inequality of elastic and strength properties of rocks. The size of the moment is determined by the size of axial effort, the size and the form of rock cutting elements, as well as by the parameters of anisotropy of physic-mechanical properties of rock and by the boring tool and rock layers angle of incidence.

The value of the overturning moment at anisotropic rock destruction by a roller cone bit changes for one turn of a chisel rotation on a face. The number of the maximum and minimum values as well as their fluctuation amplitude depend on a number of roller cone bits and a tilt angle of cone roller rotation axes in relation to a well face. The mentioned feature of the overturning moment size fluctuation can be used when designing configurations of a boring column to minimize the influence of the overturning moment on a curvature of wells, drilling in anisotropic rocks.

Well curving in anisotropic breeds drilled with roller cone bits, is defined by the mechanism of rock destruction and its features. The dual nature of rock cutting action – rock crush by axial force and rock crushing by slanting by a blow at an angle to a face – is included into the process and can be referred to some design features of arms of bits.

A form and sizes of rock cutting inserts, an angle of their sharpening as well as the scheme of rock cutting inserts installation in wreaths of roller cone bits can be referred to the features of arms of the roller cone bits influencing the destruction of anisotropic rock and occurrence of the overturning moment.

#### Key words:

Rock, drilling, roller cone bits, field of mechanical tension, curvature of wells.

#### REFERENCES

1. Brodskiy P.A., Guberman D.M. *Kolskaya sverkhglubokaya. Nauchnye rezultaty i opyt issledovaniy* [The Kola superdeep. Scientific results and experience of researches]. Eds. V.P. Orlov, N.P. Laverov. Moscow, Tekhnftegas Publ., 1998. 260 p.
2. Sulakshin S.S. *Napravlennoe burenie* [Directed drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 272 p.
3. Boyarko Yu.L. *Borba s iskrivleniem skvazhin* [Fight against a curvature of wells]. Tomsk, TPI Publ., 1969. 110 p.
4. Vuds G., Lubinskiy A. *Iskrivlenie skvazhin pri burenii* [Curvature of wells when drilling]. Moscow, Gostoptekhisdat Publ., 1960. 162 p.
5. Morozov Yu.T. *Burenie napravlennykh skvazhin i mnogostvolnykh skvazhin malogo diametra* [Drilling of the directed wells and multilateral wells of small diameter]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 211 p.
6. Kalinin A.G. *Iskrivlenie skvazhin* [Curvature of wells]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 294 p.
7. Bredley W.B. Formation characteristics have a key effect on hole direction. *Oil and gas J.*, 1975, vol. 73, no. 31, pp. 77–80.
8. Krivosheev V.V. *Iskrivlenie skvazhin v anizotropnykh porodakh* [Curvature of wells in anisotropic rocks]. Tomsk, NTL Publ., 1999. 240 p.
9. Kolesnikov A.E., Melentev N.Ya. *Iskrivlenie skvazhin* [Curvature of wells]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 176 p.
10. Kolesnikov A.E. *Mekhanizm iskrivleniya skvazhin* [Mechanism of a curvature of wells]. Ordzhonikidze, 1983. 48 p. Dep. v TSNIIEIzhvetmet 01.11.83, № 1080 zhm – D83.
11. Sholokhov L.G. *Teoreticheskie osnovy tekhnologii i proektirovaniy napravlenogo bureniya skvazhin* [Theoretical bases of technology and design of the directed well drilling]. Sverdlovsk, SGI Publ., 1982. 110 p.
12. Zinenko V.P. *Napravlennoe burenie* [Directed drilling]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 152 p.
13. Bogolyubsky K.A., Zinenko V.P., Kirsanov A.N. *Protseess estvennogo iskrivleniya skvazhin vrashchatelnogo burenia v anizotropnoy srede* [Natural rotary drilling well curvature in anisotropic environment]. *Izvestiy vuzov. Geologiya i razvedka*, 1974, no. 3, pp. 110–116.
14. Gerzhberg Yu.M., Sereda N.G. Ob issledovanii vektora nagruzki na zaboy v usloviyakh razburivaniya anizotropnykh gornykh porod [On the research of a face force vector when drilling out anisotropic rocks]. *Tekhnologiya bureniya neftyanykh i gasovykh skvazhin* [The technique of drilling oil and gas wells]. Ufa, UNI Publ., 1984, pp. 63–67.
15. Zhrebkin A.I. Eksperimentalny metod opredeleniya otklonyayushchey sily, vznikayushchey pri vzaimodeystvii dolota s naklonno-zalegayushchey anizotropnoy porodoy [Experimental method of determining the rejecting force arising at chisel interaction with inclined lying anisotropic rocks]. *Izvestiy vuzov. Neft i gas*, 1978, no. 1, pp. 13–17.
16. Zhrebkin A.I., Gerzhberg Yu.M., Sereda N.G. Eksperimentalnoe issledovanie otklonyayushchey sily, vznikayushchey pri rasburivaniy naklonno-zalegayushchikh porodoy dolotami raslichnykh tipov [Pilot study of the rejecting force arising when drilling out the inclined lying rocks by chisels of various types]. *Tekhnologiya bureniya neftyanykh i gasovykh skvazhin* [The technique of drilling oil and gas wells]. Ufa, UNI Publ., 1971. Iss. 10, pp. 89–92.
17. Neskorumnykh V.V. *Mekhanika razrusheniya anizotropnykh porod pri burenii skvazhin zadannogo napravleniya* [Mechanics of destruction of anisotropic rocks when drilling wells of the set direction]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1997. 57 p.
18. Neskorumnykh V.V. *Napravlennoe burenie i osnovy kernometrii* [The directed drilling and bases of core orient]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2012. 328 p.
19. Rzhhevsky V.V., Novik G.Ya. *Osnovy fiziki gornykh porod* [Fundamentals of physics of rocks]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 359 p.
20. Neskorumnykh V.V. *Razrushenie gornykh porod pri burenii skvazhin* [Destruction of rocks when drilling wells]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2014. 328 p.
21. Neskorumnykh V.V. *Ustroystvo dlya bureniya skvazhin* [The device for well drilling]. A.s. USSR no. 1231199, E21B7/10, B. I. № 18, 1986.
22. Neskorumnykh V.V., Purevsuren Ravdan. *Burovoy instrument* [Drill tool]. Patent RF, no. 2246603, E21B 10/22, E21B 10/48, 2005.
23. Neskorumnykh V.V., Bolshakov V.V., Kostin Yu.S., Permyakov E.L. *Burovaya almaznaya koronka* [Drill diamond bit]. Patent RF, no. 2167261, E21B 10/48, B. II. № 14, 2005.

Received: 30 May 2014.