

УДК 622.243.2

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ ПОРОД НА ПРОЦЕСС ИСКРИВЛЕНИЯ СКВАЖИН ПРИ ИХ РАЗРУШЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ТЕРМИЧЕСКИМИ СПОСОБАМИ

В.В. Нескоромных

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

E-mail: sovair@bk.ru

Рассмотрены основные закономерности формирования поля механических напряжений в анизотропных горных породах при механическом разрушении в процессе бурения и поля распространения тепловой энергии при термомеханическом или термическом бурении, например, плавлением горных пород. Показано, что при механическом разрушении горных пород при бурении формируется асимметричная форма поля деформации и распространения напряжений в слоистой породе, причем порода в большей степени деформируется в направлении перпендикулярно ориентировки слоев. В результате неравномерного деформирования и последующего разрушения горной породы создаются условия для возникновения опрокидывающего момента и последующего искривления скважин. При нагревании породы поле температуры активнее развивается в направлении вдоль слоистости, в отличие от направления перпендикулярно слоям породы. Показано, что вследствие разных направлений развития деформаций в породе и распространения тепловой энергии искривление скважин, буримых механическим и термическим способами, будет разнонаправленным, а при термо-механическом разрушении горных пород возможен эффект компенсации направлений неравномерного разрушения, а значит и вероятно снижение искривление скважин.

### Ключевые слова

Горная порода, поле механических напряжений, тепловая энергия, искривление скважин.

### Key words:

Rock, field of mechanical tension, thermal energy, curvature of wells.

Как показывают исследования упругих характеристик анизотропных – слоистых, сланцеватых горных пород, для таких пород характерно следующее соотношение модулей упругости вдоль  $E^{\parallel}$  и перпендикулярно  $E^{\perp}$  слоистости (сланцеватости):

$$\frac{E^{\parallel}}{E^{\perp}} > 1 \quad [1-3, 5].$$

Для получения напряжения в породе под индентором, тождественного напряжению разрушения  $\sigma$ , анизотропная порода должна получить различную деформацию в различных направлениях относительно слоистости или сланцеватости –  $\xi^{\perp}$ ,  $\xi^{\parallel}$  – перпендикулярно или в направлении распространения слоев породы, то есть следуя закону Р. Гука:

$$\xi^{\perp} = \frac{\sigma}{E^{\perp}} > \xi^{\parallel} = \frac{\sigma}{E^{\parallel}}.$$

Из данного неравенства следует, что при нагружении анизотропной породы индентором (рис. 1) деформация её будет неодинакова в равноудаленных от торца индентора точках деформированного ядра, а учитывая соотношение упругих характеристик породы, можно утверждать, что ядро сжатия под индентором получит вытянутость в направлении минимального значения модуля упругости (в направлении перпендикулярно слоистости или сланцеватости) и будет сжато в направлении максимального модуля Т. Юнга (вдоль слоистости или сланцеватости, рис. 1, а).

Форма ядра сжатия анизотропной породы в отличие от шаровой формы для изотропных пород, сформированная при равенстве параметров упругости в любом из направлений от прилагаемого усилия нагружения индентора, очевидно, будет близка к эллипсоиду вращения для породы с двумя

плоскостями изотропии и трехосному эллипсоиду для пород с тремя плоскостями изотропии.

Осевое усилие  $P$ , действующее на индентор (рис. 1, б), затрачивается при деформировании породы, на преодоление сил внутреннего трения в деформируемых и потому перемещаемых относительно друг друга элементах слоев породы, а также на преодоление упругих реакций со стороны породы. С учетом данной формулировки реакции анизотропной породы на внедряемый индентор  $P^{\parallel}$  и  $P^{\perp}$  можно разложить на вертикальные:

$$P_{\parallel}^{\text{в}} = P \cos^2 \gamma (1 - \operatorname{tg} \varphi_{\parallel}^{\perp}),$$

$$P_{\perp}^{\text{в}} = P \sin^2 \gamma (1 - \operatorname{tg} \varphi_{\perp}^{\parallel})$$

и горизонтальные составляющие:

$$P_{\parallel}^{\text{г}} = P \cos \gamma \sin \gamma (1 - \operatorname{tg} \varphi_{\parallel}^{\parallel}),$$

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

где  $P$  – осевая нагрузка на внедряемый в породу индентор, Н;  $\gamma$  – угол встречи индентора и плоскостей слоистости или сланцеватости, градус;  $\varphi_{\parallel}^{\perp}$ ,  $\varphi_{\perp}^{\parallel}$  – углы внутреннего трения, определяемые соответственно в направлении и перпендикулярно слоистости или сланцеватости породы, градус.

Из схемы на рис. 1, б следует, что при вдавливании индентора в анизотропную породу в процессе её упругого деформирования на торец индентора оказывает действие опрокидывающий момент  $M_{\text{оп}}$ , обусловленный действием неравных по величине вертикальных реакций. Действие опрокидывающего момента приводит к некоторому повороту внедряемого в породу индентора на угол  $\psi$  (рис. 1, в).

Точки приложения вертикальных реакций находятся на расстоянии  $a$  и  $c$  от оси индентора, что позволяет записать следующее уравнение

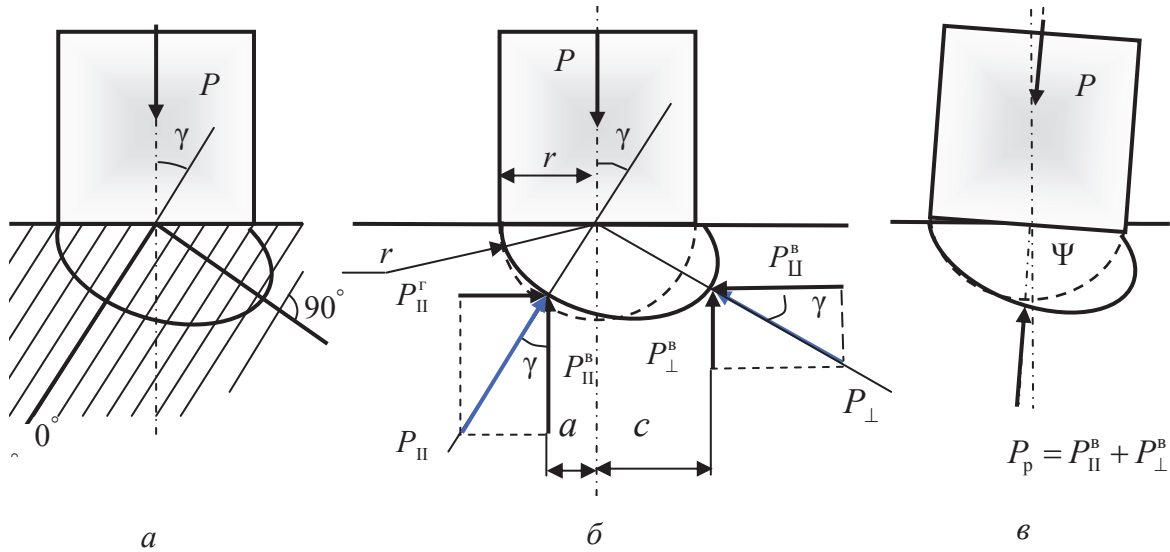


Рис. 1. Схема для анализа процесса деформирования анизотропной породы плоским цилиндрическим индентором и определения упругих реакций со стороны деформируемой породы: а) формирование эллипсоидного ядра сжатия под торцом индентора; б) схема реакций породы на внедряемый индентор через ядро сжатия породы; в) схема поворота индентора при внедрении в анизотропную породу

$$M_{он} = P_{II}^B a - P_{\perp}^B c. \quad (1)$$

Из схемы на рис. 1, б следует, что  $a = r \sin \gamma$ , а  $c = r \cos \gamma$ ,  $r$  – радиус торца индентора, м.

Опрокидывающий момент для случая, когда ядро сжатия сформировано в виде шаровой поверхности ( $E^I = E^{\perp}$ ), но существует неравенство коэффициентов внутреннего трения, будет равен

$$M_{он} = Pr \left[ \begin{array}{l} \cos^2 \gamma \sin \gamma (1 - \operatorname{tg} \varphi_n^I) - \\ - \sin^2 \gamma \cos \gamma (1 - \operatorname{tg} \varphi_n^{\perp}) \end{array} \right].$$

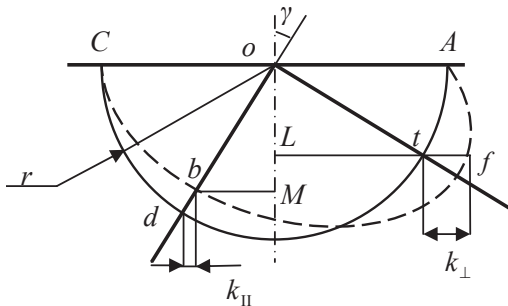


Рис. 2. Схема для определения параметров асимметрии ядра деформации анизотропной породы

Таким образом, очевидно, что опрокидывающий момент возможен для пород, отвечающих условию изотропности по модулю упругости, но не отвечающих такому условию по коэффициенту внутреннего трения.

Для перехода, с целью анализа, от шаровой формы ядра сжатия к иной, например в виде эллипсоида, для которого справедливо неравенство  $E^I \neq E^{\perp}$ , определим расстояния  $Lf$  и  $Mb$  (рис. 2) для замены ими в формуле (1) выражений для  $a$  и  $c$ , поскольку плечо реакции  $P_{II}^B$  уменьшится на отрезок  $k_{II}$ , а плечо реакции  $P_{\perp}^B$  увеличится на расстояние  $k_{\perp}$ :

$$Mb = ob \sin \gamma; \quad Lf = of \cos \gamma.$$

Рассматривая схемы, представленные на рис. 3, и принимая как условие, что деформация породы пропорциональна её упругости, а именно,

$$\frac{of}{ob} = \frac{E^I}{E^{\perp}} = K \quad \text{и} \quad \frac{of}{r} = \frac{r}{ob},$$

можно определить размеры полуосей эллипсоидов деформации в анизотропной породе под торцом индентора в случае внедрения в породу в направлениях под прямым углом (рис. 3, а) и вдоль слоистости или сланцеватости (рис. 3, б), которые будут равны

$$ob = r \sqrt{\frac{1}{K}}, \quad \text{а} \quad of = r \sqrt{K}.$$

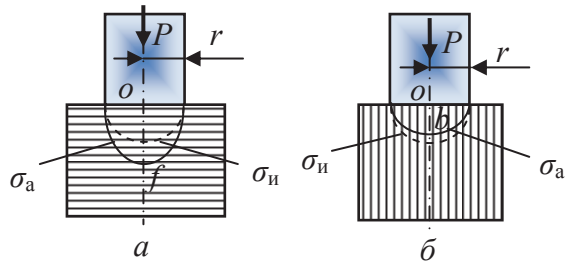


Рис. 3. Схемы для определения размеров контура равных напряжений при вдавливании в анизотропную породу цилиндрического индентора: а) перпендикулярно слоистости; б) вдоль слоистости;  $\sigma_a$ ,  $\sigma_n$  – соответственно контуры равных напряжений для изотропной и анизотропной пород

После всех подстановок заключительная формула расчета  $M_{он}$  для внедряемого в анизотропную породу цилиндрического индентора получит следующий вид:

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

$$\gamma_{\text{кр}} = \text{arctg} \frac{1 - \text{tg} \varphi_n^{\parallel}}{K(1 - \text{tg} \varphi_n^{\perp})}. \quad (2)$$

где  $K$  – соотношение модулей упругости породы, замеренное вдоль и перпендикулярно слоистости или сланцеватости.

На рис. 4 приведены расчетные графики опрокидывающего момента в зависимости от угла встречи  $\gamma$  при различных значениях  $K$  и коэффициентах внутреннего трения для пластичной породы осадочного комплекса – аргиллита, и изверженной твердой породы – дацита.

Графики на рис. 4 указывают на рост опрокидывающего момента и снижение критического угла встречи  $\gamma$  при возрастании соотношения модулей упругости породы  $K$ . Зависимость опрокидывающего момента от угла встречи имеет синусоидальный характер со сменой направления действия при определенном угле встречи  $\gamma_{\text{кр}}$ :

- при малых углах встречи опрокидывающий момент ориентирует внедряемый в породу индентор в направлении слоистости или сланцеватости;
- при углах встречи больше  $\gamma_{\text{кр}}$  опрокидывающий момент ориентирует индентор в направлении, перпендикулярном слоистости или сланцеватости.

Расчет графиков сделан при  $K=2$  и  $K=1,1$  с учетом влияния на процессы деформирования и разрушения породы сил внутреннего трения в деформируемых слоях. При выполнении расчетов приняты значения коэффициентов внутреннего трения  $\text{tg} \varphi$  равные:

- для аргиллита  $\text{tg} \varphi_n^{\parallel}=1, \text{tg} \varphi_n^{\perp}=0,6$ ;
- для дацита  $\text{tg} \varphi_n^{\parallel}=0,8, \text{tg} \varphi_n^{\perp}=0,7$ .

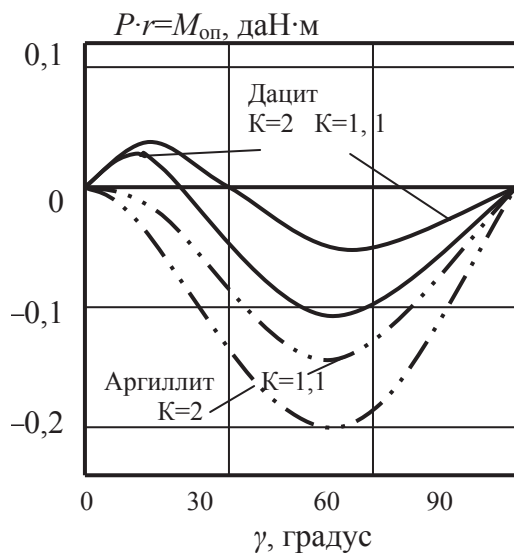


Рис. 4. Графики  $M_{\text{он}}$  в зависимости от угла встречи  $\gamma$  для осадочной (аргиллит) и эффузивной (дацит) горных пород

Из уравнения для расчета  $M_{\text{он}}$ , при условии его равенства нулю, определим значение критического угла встречи  $\gamma_{\text{кр}}$ , которое будет равно:

$$\gamma_{\text{кр}} = \text{arctg} \frac{1 - \text{tg} \varphi_n^{\parallel}}{K(1 - \text{tg} \varphi_n^{\perp})}.$$

Из формулы (2) для расчета опрокидывающего момента и графиков на рис. 4 следует, что в случаях, когда угол встречи  $\gamma$  равен 0 или  $90^\circ$ ,  $M_{\text{он}}=0$ . Это становится возможным благодаря тому, что при пересечении анизотропной породы вдоль, а также перпендикулярно слоистости или сланцеватости области деформирования породы развиваются в виде симметричных сферических объемов (рис. 3). Именно поэтому разрушение породы осуществляется в этих случаях равномерно, а дестабилизирующий положение индентора опрокидывающий момент отсутствует. Следовательно, в этих случаях искривления скважины, вследствие влияния анизотропии горной породы, происходить не должно.

При механическом разрушении горных пород в результате взаимодействия породоразрушающего инструмента с забоем в горной породе под торцом инструмента формируется поле механических напряжений как результат объемно-геометрического суммирования напряжений от действия отдельных сил со стороны каждого породоразрушающего элемента (индентора).

Иллюстрацией процессов при механическом разрушении горных пород могут служить линии деформации в породе, полученные Е.И. Быченковым (рис. 5), которые показывают возможные конфигурации объемов деформированной под торцом бурового инструмента изотропной породы [4].

При исследовании напряженного и деформационного состояния анизотропной горной породы под торцом бурового инструмента установлено, что поле упругих деформаций в породе под торцом инструмента при напряжении  $\sigma_a$  может иметь конфигурацию эллипсоида вращения (рис. 6). Упругие реакции упруго деформированной породы обеспечивают действие опрокидывающего момента на буровой инструмент  $M_{\text{он}}$ :

$$M_{\text{он}} = P_{\text{ос}} \begin{bmatrix} R^{\parallel} \cos^2 \gamma \sin \gamma (1 - \text{tg} \varphi_n^{\parallel}) - \\ -R^{\perp} \cos \gamma \sin^2 \gamma (1 - \text{tg} \varphi_n^{\perp}) \end{bmatrix},$$

где  $P_{\text{ос}}$  – осевая нагрузка на буровой инструмент, Н;  $\gamma$  – угол встречи оси бурового инструмента и плоскостей слоистости или сланцеватости породы, град.;  $R^{\parallel}, R^{\perp}$  – радиусы эллипсоида упругих деформаций в породе, м;  $\varphi_n^{\parallel}, \varphi_n^{\perp}$  – углы внутреннего трения в породе при её деформировании вдоль и перпендикулярно слоистости или сланцеватости, град.

Радиусы  $R^{\parallel}$  и  $R^{\perp}$  определены в соответствии со следующей аналитической версией:

$$R^{\perp} = R_{\text{я}} - (\xi^{\perp} - \xi),$$

$$R^{\parallel} = R_{\text{я}} - (\xi^{\parallel} - \xi),$$

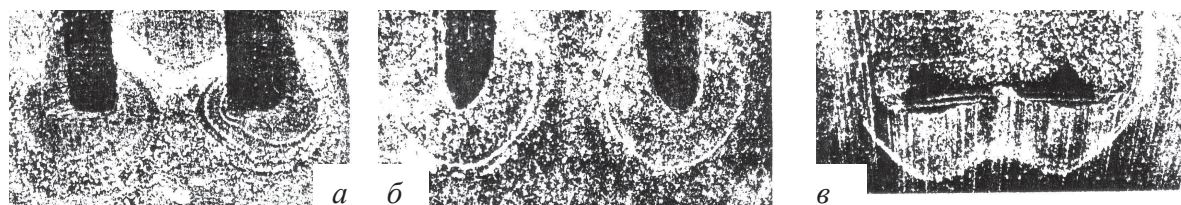


Рис. 5. Линии деформации и напряжений: а, б) в породе под торцом коронок; в) долота

где  $R_{\text{я}}$  – условный радиус сферы напряжения  $\sigma_{\text{я}}$  и деформации  $\xi$  для изотропной породы (рис. 6), имеющей средние значения модуля упругости  $E=0,5(E^{\text{II}}+E^{\perp})$  и коэффициентов Пуассона  $\nu=0,5(\nu^{\text{II}}+\nu^{\perp})$ , характерные для анизотропной породы при измерении соответственно вдоль  $(E^{\text{II}}, \nu^{\text{II}})$  и перпендикулярно слоистости  $(E^{\perp}, \nu^{\perp})$  или сланцеватости при деформациях  $\xi^{\text{II}}, \xi^{\perp}$ , м;  $\xi^{\perp}, \xi^{\text{II}}$  – деформации анизотропной породы под буровым инструментом в направлениях перпендикулярно и вдоль слоистости или сланцеватости, м.

Напряжения в породе под торцом долота с плоским торцом радиуса  $R_{\text{н}}$  могут определяться по зависимости

$$\sigma = \frac{3P_{\text{ос}}}{8\pi R_{\text{н}}^2}.$$

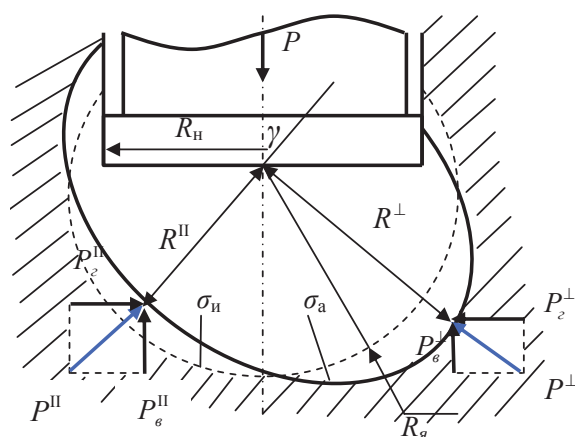


Рис. 6. Схема для анализа деформаций и напряжений под торцом бурового инструмента

Контактное напряжение под торцом долота рассчитывается по формуле

$$p_{\text{к}} = \frac{P_{\text{ос}}}{\pi R_{\text{н}}^2}.$$

Из данных формул можно получить зависимости для расчета  $R_{\text{я}}$ :

$$R_{\text{я}} = \sqrt{\frac{3P_{\text{ос}}}{8\pi\sigma}} = R_{\text{н}} \sqrt{\frac{3p_{\text{к}}}{8\sigma}}.$$

Полученные формулы можно использовать для расчета величины опрокидывающего момента в зависимости от осевой нагрузки или величины контактного давления на забой, т. е. с учетом площади торца бурового инструмента.

В соответствии с оценками специалистов наиболее рациональным и перспективным способом повышения эффективности разрушения твердых горных пород может быть комбинирование механического разрушения резанием и скалыванием с термическим или электротермическим разрушением. В данном случае интенсификация разрушения достигается за счет нагрева твердой породы до состояния, при котором в поверхностном слое порода размягчается, теряет свою первоначальную твердость и может разрушаться резанием. Предварительные исследования показали, что скорость бурения может возрасти от 2 до 100 раз в сравнении с механическим бурением.

Влияние термомеханического разрушения на искривление скважин можно рассмотреть, учитывая законы распространения в анизотропной породе поля температуры и поля механических напряжений.

При тепловом воздействии на горную породу с целью её разупрочнения или плавления важным становится коэффициент теплопроводности, который определяется по известной зависимости [4]:

$$\lambda_{\phi} = \frac{1}{3} cv\rho l_{\phi},$$

где  $c$  – удельная теплоемкость;  $v$  – скорость фотонов, равная скорости распространения упругих колебаний в породе;  $\rho$  – плотность породы;  $l_{\phi}$  – средняя длина свободного пробега фотонов.

В слоистых породах наблюдается большая теплопроводность вдоль слоистости  $\lambda_{\text{II}}$ , чем перпендикулярно слоистости  $\lambda_{\perp}$ . Коэффициент анизотропии теплопроводности слоистых пород в среднем составляет 1,1–1,5.

При этом следует отметить, что по оценкам таких специалистов, как Ю.Л. Боярко, В.Д. Ларионов и В.В. Кривошеев [1], анизотропия по теплопроводности связана с анизотропией по упругости горных пород соотношением

$$\frac{E_{\text{II}}}{E_{\perp}} = \left( \frac{\lambda_{\text{II}}}{\lambda_{\perp}} \right)^2.$$

Данная зависимость показывает, что анизотропия механических свойств, таких как упругость, более выражена, в сравнении с анизотропией теплопроводящих свойств горных пород.

Причины более активного распространения тепла через слоистые или сланцеватые породы в направлении слоистости предопределены их строе-

нием. Слоистая горная порода включает более плотные слои-пластины, между которыми располагается менее плотный материал, характеризующийся повышенной пористостью и меньшей плотностью. При распространении тепловой энергии менее плотный и пористый материал, отличающийся температурно-изоляционными свойствами, пропускает тепло ограниченно, а плотные слои-пластины становятся активными проводниками тепловой энергии. В результате распространение тепловой энергии происходит более активно не перпендикулярно слоистости, а вдоль неё.

Большое значение имеет также анизотропия теплопроводности за счет ориентации порового пространства, соответствующая, как правило, внешней анизотропии кристаллов. То есть это пористость, ориентированная в направлении слоистости, сланцеватости, флюиальности и др. [5].

На рис. 7. приведена фотография забоя скважины, пробуренной в блоке анизотропного туфо-дацита Приаргунского рудного поля (Забайкалье). Забой после бурения и распиловки блока пропитан керосином. Сплошной линией и штриховкой уточнен контур забоя, штриховой линией – зона распространения керосина в породе. Форма области распространения керосина в породе показывает преимущественное распространение пористости вдоль слоев породы.

Ориентировка пористости вдоль текстурных элементов породы определяет её повышенную деформируемость в направлении перпендикулярно слоистости, сланцеватости, определяя степень неравномерности и асимметрию объемов деформации и скалывания.

Вследствие ориентированной вдоль слоистости, сланцеватости или флюиальности пористости породы в направлении слоев будет и более активное проникновение бурового раствора в горную породу. В результате подобного неравномерного пропитывания разрушаемой на забое скважины породы будет задана и асимметрия породоразрушающего действия бурового инструмента при бурении, которая состоит в том, что в направлении распространения слоев горная порода может раз-

рушаться более интенсивно. В этом случае можно говорить о влиянии буровых агентов не только на процесс разрушения горной породы при бурении, но и на процесс формирования направления ствола скважины.

Ориентированная пористость ограничивает скорость прохождения упругих волн и тепла как вдоль рыхлых слоев, так и перпендикулярно ориентировке слоев горной породы.

Величина пористости тесно связана с вещественным составом горных пород, с размерами, формой и упаковкой зёрен породы. В осадочных породах пористость может достигать 35 % объема породы, в вулканогенно-осадочных (туфопесчаники, туффиты) и метаморфических породах – 5...20 %, в магматических породах – не более 5 %.

Механические деформации в анизотропной породе активнее развиваются в направлении перпендикулярно слоистости (на рис. 8, линия  $\sigma_3$ ), а температурное поле более активно распространяется в направлении простирания слоев (линия  $t_3$ ). Причиной более активного температурного потока вдоль слоев является то, что порода в этом направлении имеет более высокую сосредоточенность плотности.

Таким образом, можно отметить, что нагрев горной породы способствует выравниванию неравномерности разрушения анизотропной породы за счет снижения её твердости преимущественно в направлении слоистости или сланцеватости, т. е. в направлении максимальной твердости породы.

Другим фактором снижения искривления скважин при термомеханическом бурении может быть фактор повышения механической скорости бурения без повышения осевого усилия, что обеспечивает снижение естественного искривления скважин.

Таким образом, можно отметить, что перспективный по производительности термомеханический способ разрушения горных пород может характеризоваться способностью к снижению или даже полному устранению искривления скважин, буримых механическими способами в анизотропных горных породах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривошеев В.В. Искривление скважин в анизотропных породах. – Томск: Изд-во НТЛ, 1999. – 240 с.
2. Нескоромных В.В. Механика разрушения анизотропных горных пород при бурении скважин заданного направления. – М.: МГП «Геоинформмарк», 1997. – 57 с.
3. Нескоромных В.В. Направленное бурение и основы кернотри. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 328 с.
4. Быченков Е.И. К вопросу исследования напряженного состояния горных пород в призабойной зоне буровых скважин // Методика и техника разведки. – 1971. – № 74. – С. 11–14.
5. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1984. – 359 с.

Поступила 15.04.2013 г.