

basic inactive borehole. Not unimportant problem is also economically reasonable profile calculation of additional borehole for concrete geological boring condition. This work is devoted to the composite decision of the tasks mentioned above.

УДК 622. 243

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ АЛМАЗНОМ БУРЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ

Кривошеев В.В., **Нейштетер И.А.**, Ларин А.А.

Работа посвящена исследованиям процесса разрушения анизотропных горных пород при алмазном бурении с целью совершенствования теории естественного искривления скважин. При проведении исследований использован новый для бурения метод регистрации характеристик импульсного электромагнитного поля, генерируемого из приповерхностного слоя горной породы при ее разрушении. Доказана информативность этого метода, преимущества по сравнению с методом регистрации акустической эмиссии, а также его применимость для изучения процессов разрушения горных пород при бурении. В результате работы экспериментально доказан и теоретически обоснован эффект искривления скважин в направлении линии наибольшего сопротивления анизотропных пород при малых углах встречи главной плоскости скальвания. Определены закономерности изменения величины отклоняющей силы при различных параметрах режима бурения.

В современных условиях особенно актуален вопрос снижения стоимости работ, что вызывает повышенные требования к качеству проведения скважин по проектным траекториям. Особенно остро стоят вопросы направленного бурения скважин в анизотропных породах, в которых скважины искривляются наиболее интенсивно.

Исследованиями проблемы направленного бурения скважин в анизотропных породах занимались многие отечественные и зарубежные ученые: С.С. Сулакшин, В.В. Кривошеев, Ю.Л. Боярко, Калинин, Е.Л. Лиманов, И.П. Мельничук, Ю.Л. Михалкевич, Ю.Т. Морозов, В.В. Нескоромных, В.М. Питерский, В. П. Рожков, Е.Т. Браун, В.Б. Бредли, Р.Т. Макламор, С.Е. Мэрфи и др.

Несомненна ценность полученной информации о процессах разрушения анизотропных горных пород, однако для решения практических задач в бурении вопрос недостаточно изучен. Это связано, с одной стороны, с существенными различиями в процессах деформации и разрушения при испытаниях с применением традиционных схем нагружения пород различными инденторами и при разрушении породы непосредственно в процессе бурения и, с другой стороны, с трудностью исследования процессов разрушения пород, происходящих на забое скважин. Бурение, вообще, и естественное искривление скважин, в частности, являются крайне многофакторными процессами. Это приводит к тому, что на сегодняшний день наиболее приемлемой методикой прогнозирования естественного искривления скважин является статистический анализ результатов искривления скважин в сходных геолого-технических условиях. Это требует наличия представительной выборки данных для анализа и может быть осуществлено не всегда.

Существующие разночтения в представлениях о формировании отклоняющих сил при взаимодействии породоразрушающего инструмента с анизотропной породой связаны с неопределенностью, возникающей на стадии трансляции результатов статических экспериментов на динамические процессы разрушения породы при бурении. Это обусловлено тем, что прочностные свойства горных пород зависят от вида и характеристик силового воздействия, поэтому исследования процессов разрушения горных пород, выполняемые применительно к бурению, наиболее целесообразно производить непосредственно при бурении.

Возможности традиционных методов экспериментальных исследований в значительной мере исчерпаны. Для изучения разрушения горных пород непосредственно в процессе бурения удобны и перспективны современные эмиссионные методы, потому что они позволяют оценивать фактическое сопротивление, проявляемое породой при разрушении, а также получать представление о частоте элементарных актов разрушения.

В исследованиях естественного искривления скважин при бурении в анизотропных породах возникает задача оценки сопротивляемости анизотропной породы разрушению в различных секторах забоя. В этой ситуации незаменимы эмиссионные методы оценки прочностных свойств.

В экспериментальных исследованиях в области бурения ранее использовался метод регистрации акустической эмиссии, однако он обладает существенными недостатками. В подавляющем большинстве случаев уровень акустических шумов, создаваемых работающим оборудованием, значительно превышает уровень полезного сигнала. Так, рядом исследователей, занимавшихся изучением акустических шумов, возникающих при работе породоразрушающего инструмента во время бурения, сделан вывод, что наилучшие результаты получаются в случае размещения датчика на забое вспомогательной скважины, пробуренной рядом с экспериментальной.

Этот недостаток в значительной степени устраняется применением метода регистрации электромагнитной эмиссии. Первые опыты регистрации электромагнитной эмиссии при алмазном бурении горных пород были проведены на кафедре ТР МПИ в ТПУ и показали перспективность использования этого метода [17,18].

Использованный в настоящей работе метод регистрации ЭМЭ, начало которому было положено под научным руководством профессора А.А. Воробьева, разработан коллективом проблемной научно - исследовательской лаборатории диэлектриков и полупроводников Томского политехнического университета. Большой вклад в создание метода внесли Ю.П. Малышков, В.Ф. Гордеев, Ш.Р. Мастов, Т.В. Фурса и др. Этими исследователями экспериментально доказано, что параметры электромагнитной эмиссии зависят от силы связей, разрываемых при разрушении твердого тела, и являются точным индикатором фактической прочности материалов при силовом воздействии [14].

Для изучения процессов разрушения анизотропных горных пород непосредственно в процессе бурения необходимо, в первую очередь, оценить возможность применимости метода при бурении. С этой целью проведено экспериментальное бурение изотропных горных пород. Эксперименты проводились на лабораторном буровом стенде алмазными коронками диаметром 36 мм с продувкой сжатым воздухом после каждого цикла бурения для охлаждения коронки и удаления продуктов разрушения.

Измерение электромагнитной эмиссии проводилось с помощью измерителя электромагнитной эмиссии "EMISSION -1", разработанного и созданного в проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники диэлектриков и полупроводников Томского политехнического университета.

Структурная схема измерения электромагнитной эмиссии при бурении с помощью измерителя EMISSION-1 представлена на рис.1.

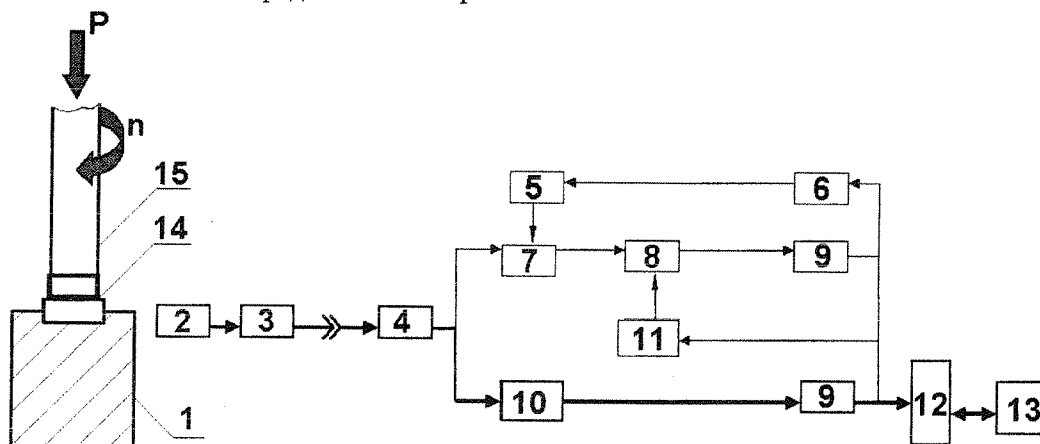


Рис.1. Структурная схема измерения электромагнитной эмиссии при бурении с помощью измерителя EMISSION-1: 1-образец горной породы, 2-приемник, 3-предварительный усилитель, 4-усилитель, 5-цифрово-аналоговый преобразователь, 6-буферный регистратор, 7-компаратор, 8-счетчик, 9-шинный формирователь, 10-аналого-цифровой преобразователь, 11-триггер, 12-интерфейс, 13-персональный компьютер, 14-алмазная коронка, 15-колонковая труба

Возникающее в горной породе 1 в процессе механического воздействия электромагнитное поле воспринимается емкостным дифференциальным приемником поля 2 и усиливается предварительным усилителем 3. С помощью аналого-цифрового преобразователя 10 происходит оцифровка и передача в ЭВМ значений амплитуды аналоговых сигналов электромагнитной эмиссии. По окончании оцифровки полученная информация выводится на экран монитора в виде осциллограмм импульсов и записывается в виде файлов данных.

Статистическая обработка и анализ полученных результатов осуществлялись на ПЭВМ с использованием пакетов стандартных программ Statistika, MikroCal Origin, и др.

Общий вид спектров электромагнитных сигналов, получаемых при бурении, приведен на рис. 2.

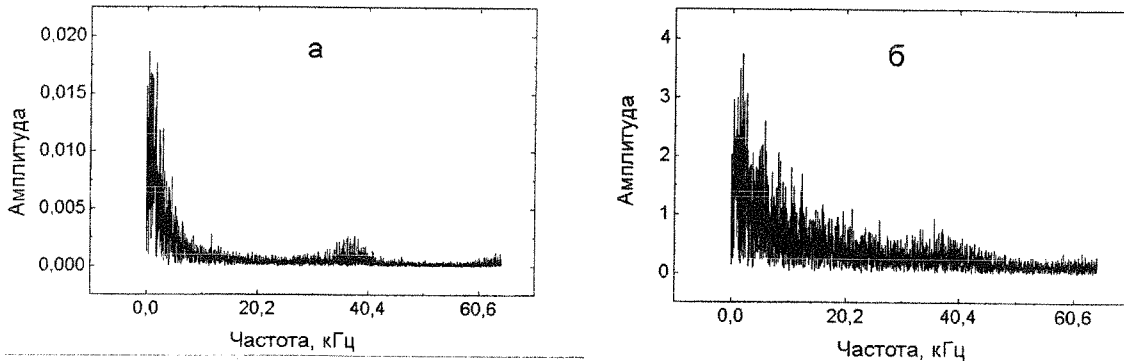


Рис. 2. Спектры электромагнитного сигнала при бурении горных пород алмазными коронками с осевой нагрузкой  $P=160$  даН, частотой оборотов  $n=400$  об/мин : а - милонит (твердость по штампу 201 даН/мм<sup>2</sup>); б - базальтовый порфирит (твердость по штампу 622 даН/мм<sup>2</sup>)

Интерпретация результатов велась по известной методике обработки электромагнитных сигналов [15]. По выражениям 1,2,3 определялись следующие спектральные характеристики сигналов: спектральная функция амплитуды сигнала (от частоты)  $U(f)$  по функции времени  $u(t)$  в соответствии с преобразованием Фурье, энергия сигнала  $E$ , эффективная ширина спектра  $\Delta f$ .

$$U(f) = \int_0^n u(t) e^{-j\omega t} dt ; \quad (1)$$

$$E = \int_0^k E(f) df = \int_0^k |U(f)|^2 df ; \quad (2)$$

$$\Delta f = \int_0^k \frac{U(f) df}{U_{\max}} = \frac{\sigma^2}{2U_{\max}} , \quad (3)$$

где  $\omega$  – угловая частота;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение;  $U_{\max}$  – максимальное значение амплитуды в спектре.

Несущая частота  $f$  сигнала определялась как частота гармоники спектра, обладающей наибольшей амплитудой.

Проведен корреляционный анализ параметров сигнала с физико-техническими свойствами разбуриваемых горных пород при постоянных параметрах режима бурения и установлена статистически значимая положительная связь со свойствами, характеризующими сопротивление разрушению (табл. 1,2,3).

Установлено, что энергия спектра сигнала имеет статистически значимую положительную корреляцию с твердостью по штампу, пределом упругости, коэффициентом динамической прочности, удельной объемной и удельной контактной работой разрушения. Наиболее тесная положительная связь наблюдается между твердостью по штампу и энергией сигнала,

Таблица 1

Зависимость энергии сигнала от физико-технических свойств горных пород

Физико-технические свойства	Твёрдость по штампу Н, даН/мм <sup>2</sup>	Коэффициент динамической прочности, Fд	Удельная объёмная работа разрушения Av, Дж/мм <sup>3</sup>	Жесткость C, tg α	Предел упругости Ru, даН/мм <sup>2</sup>	Удельная контактная работа разрушения As, Дж/мм <sup>2</sup>
Вид функции	Параболическая				Степенная	
Среднее корреляционное отношение между свойством и энергией сигнала	0,98	0,92	0,75	0,72	0,83	0,87
Среднеквадратическое отклонение корреляционного отношения	0,01	0,02	0,17	0,22	0,05	0,05
Коэффициент вариации корреляционного отношения	1,04	2,38	22,50	30,16	6,33	5,39
Статистика t	13,93	6,82	3,21	2,96	4,23	5,07
Уровень значимости ε	< 0,001	0,002	0,05	0,05	0,01	0,005

генерируемого при бурении горных пород. Эти закономерности согласуются с результатами исследований по регистрации электромагнитной эмиссии при статическом нагружении диэлектриков. Таким образом, энергия сигнала является показателем сопротивления разрушению для твердых диэлектриков и, в отличие от известных показателей, электромагнитная эмиссия может быть измерена при различных видах силового воздействия на материал.

В ВИТРе В.И. Беляковым, Г.А. Блиновым, П.М. Григоренко и др. [5] были проведены исследования зависимости работы упругой энергии акустического сигнала от физико-технических свойств горных пород при алмазном бурении по 10 различным горным породам с известными физико-техническими свойствами.

В таблице 2 для сравнения приведены результаты исследований ВИТР и ТПУ.

В таблице 3 приведены корреляционные характеристики зависимости энергии электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) и акустической эмиссии (АЭ) от физико-технических свойств горных пород при алмазном бурении.

Сравнение показателей степени степенной зависимости энергии ЭМЭ и работы упругой энергии от одних и тех же физико-технических свойств (табл. 2) позволяет сделать вывод о более высокой чувствительности энергии ЭМЭ к изменению этих свойств.

Как видно из таблицы 3, корреляция энергии электромагнитного сигнала со свойствами, характеризующими сопротивление разрушению горной породы, более тесная, чем корреляция работы упругой энергии.

Установленные закономерности позволяют сделать вывод, что энергия регистрируемого при бурении сигнала электромагнитной эмиссии является высокочувствительным показателем прочности породы, проявляемой при разрушении.

В соответствии с силовой теорией естественного искривления скважин в анизотропных горных породах отклоняющая сила определяется следующим образом.

Резец породоразрушающего инструмента, перемещающийся по часовой стрелке (рис. 3) от точки Н до точки G (по дуге НАG), движется в направлении восстания плоскости сланцева-

Уравнения степенной зависимости работы упругой энергии акустического сигнала и энергии электромагнитного сигнала от физико-технических свойств горных пород при алмазном бурении

Уравнения степенной зависимости работы упругой энергии акустического сигнала $A_y$ от физико-технических свойств горных пород при алмазном бурении (по данным ВИТР)		
Параметр	Эмпирическое уравнение	Корреляционное отношение
Твердость по штампу, Н	$A_y = 50,29H^{0,267}$	0,392
Удельная объемная работа разрушения, $A_v$	$A_y = 168,42A_v^{0,2814}$	0,404
Удельная контактная работа разрушения, $A_s$	$A_y = 132,59A_s^{0,1774}$	0,284
Уравнения степенной зависимости энергии электромагнитного сигнала $E$ от физико-технических свойств горных пород при алмазном бурении (по данным ТПУ)		
Твердость по штампу, Н	$E = 1,550 \cdot 10^{-10} H^{3,716}$	0,908
Удельная объемная работа разрушения, $A_v$	$E = 1,40 \cdot 10^{-2} A_v^{1,361}$	0,387
Удельная контактная работа разрушения, $A_s$	$E = 8,50 \cdot 10^{-6} A_s^{2,430}$	0,865

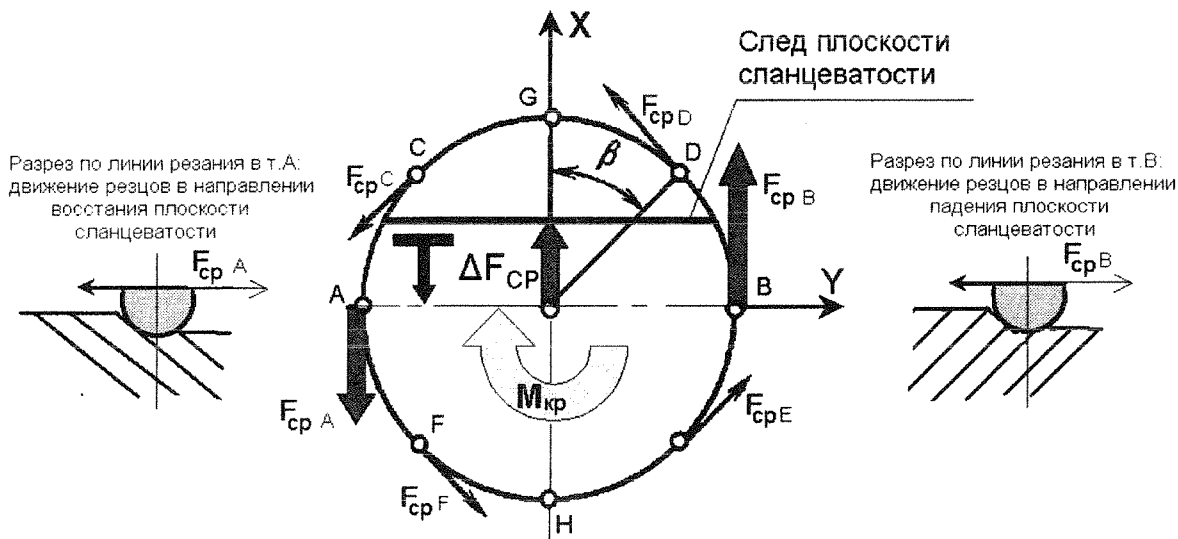


Рис. 3. Схема силовых взаимодействий породоразрушающего инструмента с анизотропной горной породой (по В.В. Кривошееву)

тости и, таким образом, вслед отдельным кристаллам, но встречает их под разными углами, что обуславливает неодинаковую силу сопротивления породы этому перемещению в различных точках. От точки G до точки H, двигаясь по дуге GBH, резец перемещается в направлении падения плоскости сланцеватости, причем в точках G и H сопротивление перемещению минимально (если рассматривать дугу GBH), а в точке B сопротивление наибольшее.

Сумма всех сил сопротивления перемещению резцов в плоскости забоя – сил сопротивления резанию  $F_{cp}$ , действующих на коронку параллельно оси y, равна нулю, а сумма сил, действующих на коронку параллельно оси x,

Таблица 3

Корреляционные характеристики зависимости энергии электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) и акустической эмиссии (АЭ) от физико-технических свойств горных пород при алмазном бурении

Физико-технические свойства горных пород	Исследование ЭМЭ (ТПУ, 1998)						Исследование АЭ (ВИТР, 1978)					
	Среднее значение свойства	Среднеквадратическое отклонение свойства	Коэффициент корреляции $r$	Статистика $t$	Уровень значимости $\varepsilon$	Количество пород	Среднее значение свойства	Среднеквадратическое отклонение свойства	Коэффициент корреляции $r$	Статистика $t$	Уровень значимости $\varepsilon$	Количество пород
Твёрдость по штампу $H$ , даН/мм <sup>2</sup>	372,0	148,4	0,889	5,681	0,004	12	346,7	145,2	0,613	2,053	0,079	9
Удельная контактная работа разрушения $A_c$ , Дж/мм <sup>2</sup>	46,8	27,6	0,802	4,139	0,020	12	27,9	15,5	0,415	1,207	0,267	9
Удельная объёмная работа разрушения $A_v$ , Дж/мм <sup>3</sup>	11,9	5,8	0,656	2,533	0,063	12	4,7	4,4	0,761	3,105	0,017	9
Предел упругости $R_u$ , даН/мм <sup>2</sup>	210,2	63,9	0,782	3,928	0,032	12						
Модуль упругости							6,7	3,9	0,404	1,168	0,281	9
Коэффициент динамической прочности $F_d$	17,2	4,9	0,853	4,738	0,007	12						
Жесткость $C$ , даН/мм <sup>2</sup>	1,3	0,3	0,659	2,894	0,084	12						

$$\Delta F_{CP} = \sum F_{CPi} \sin \beta_i . \quad (4)$$

Причем, если сопротивление породы перемещению резца в направлении восстания плоскости сланцеватости меньше, чем в противоположном направлении, то результирующая сила сопротивления DFP направлена так, как это показано на рис. 3, а скважина отклоняется в сторону восстания плоскости сланцеватости.

Для экспериментальных исследований отклоняющей силы на кафедре ТР МПИ в ТПУ разработана методика бурения по комбинированным образцам анизотропных пород, позволяющая воспроизвести процессы разрушения анизотропных горных пород при бурении, с возможностью измерения параметров, характеризующих разрушение. Комбинированный образец изготавливается из керна анизотропной породы, разрезанного на четыре равных полуцилиндра, обозначенных на рис.4 цифрами от 1 до 4. Полуцилиндр 1 разворачивается относительно продольной плоскости разреза на 180° и склеивается с полуцилиндром 2, составляя образец, предназначенный для бурения в направлении восстания плоскости сланцеватости. Полуцилиндр 3 разворачивается относительно продольной плоскости разреза на 180° и склеивается с полуцилиндром 4, составляя образец, предназначенный для бурения в направлении падения плоскости сланцеватости.

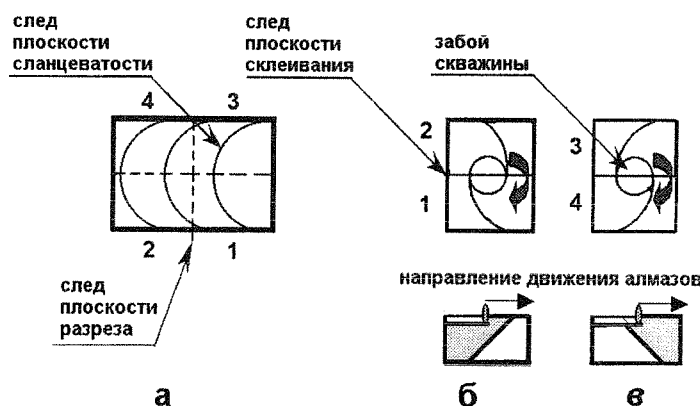


Рис.4. Схема изготовления комбинированных образцов анизотропных пород: а – схема резки анизотропного образца; б – образец, предназначенный для имитации бурения в направлении восстания плоскости сланцеватости; в – образец, предназначенный для имитации бурения в направлении падения плоскости сланцеватости

При правом вращении коронки алмазы разбуривают один из парных комбинированных образцов в направлении восстания плоскости сланцеватости (рис. 4, б), а второй в направлении падения плоскости сланцеватости (рис. 4, в).

Измерение суммы всех сил сопротивления резанию по первому образцу позволяет получить силу  $2 \sum F_{CP \text{ HAG}}$  (рис.3), а по второму образцу, соответственно, силу  $2 \sum F_{CP \text{ GBH}}$ .

Отклоняющая сила  $\Delta F_{CP}$  определяется по уравнению (5).

$$\Delta F_{CP} = \frac{2 \sum F_{CP \text{ GBH}} - 2 \sum F_{CP \text{ HAG}}}{2} \quad (5)$$

Сила сопротивления резанию определяется

$$F_{CP} = \frac{M_{KC}}{R_{CP}} , \quad (6)$$

где  $M_{KC}$  - комплексный момент сопротивления перемещению резца;  $R_{CP}$  - средний радиус коронки.

В соответствии с обозначениями на схеме, представленной на рис.3, выражениями 5 и 6 отклоняющая сила  $\Delta F_{CP}$  определяется

$$\Delta F_{CP} = \frac{1}{2} \left( \frac{M_{KC\ GBH}}{R_{CP}} - \frac{M_{KC\ HAG}}{R_{CP}} \right). \quad (7)$$

Обработка результатов бурения по комбинированным образцам анизотропных пород показала, что механические скорости бурения для парных образцов комбинированных образцов различны (табл.4, [9,12,13]). В исследованиях [11], ранее проведенных на кафедре техники разведки МПИ ТПУ, также было получено различие механических скоростей бурения для парных комбинированных образцов анизотропных пород.

В результате проверки гипотезы о равенстве средних значений получено, что эти различия механических скоростей бурения статистически значимы (табл.4, [13]).

Эти новые экспериментальные результаты показывают целесообразность определения отклоняющей силы с использованием удельных величин, характеризующих сопротивление анизотропной породы разрушению.

В случае бурения по целой анизотропной породе угловой поворот забоя ограничивается жесткостью инструмента, и в экспериментах наблюдается плоскопараллельное смещение забоя.

Если при бурении по целой анизотропной породе неравномерное разрушение забоя по глубине все же имеет место, то в гораздо меньшей степени, чем при сравнении результатов бурения парных комбинированных образцов.

Сила сопротивления резанию определяется по значению комплексного момента сопротивления  $M_{KC}$  (6). Комплексный момент сопротивления зависит не только от показателя сопротивляемости породы разрушению, в качестве которого принята энергоемкость разрушения, но и от интенсивности разрушения, характеризуемой механической скоростью бурения.

Поэтому для расчета отклоняющей силы, действующей при бурении целой анизотропной породы, следует пересчитать значения  $M_{KC}$ , полученные при бурении парных комбинированных образцов, для условия равной механической скорости бурения.

Следовательно, в расчете отклоняющей силы необходимо использовать удельные значения комплексного момента сопротивления, отнесенные к единице разрушенного объема.

Комплексный момент сопротивления (крутящий момент) имеет размерность энергии. Отношение комплексного момента сопротивления к разрушенному за оборот объему является энергоемкостью разрушения [3]. Мощность при вращательном движении определяется:

$$N = 2\pi M_{KC} n, \quad [\text{Вт}] \quad (8)$$

Работа, выполненная за оборот,

$$A = 2\pi M_{KC}, \quad [\text{Дж}] \quad (9)$$

Энергия, затраченная на разрушение единицы объема породы за оборот [9],

$$W = \frac{2\pi}{0,785(D^2 - d^2)h_{об}} \frac{M_{KC}}{1}, \quad \left[ \frac{\text{с}^{-1} \text{ Дж}}{\text{мм}^2 \text{ мм с}^{-1}} = \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^3} \right]. \quad (10)$$

Энергоемкость разрушения в процессе бурения

$$W = \frac{2\pi}{0,785(D^2 - d^2)V_m} \frac{M_{KC}}{n}, \quad \left[ \frac{\text{с}^{-1} \text{ Дж}}{\text{мм}^2 \text{ мм с}^{-1}} = \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^3} \right]. \quad (11)$$

Пусть при бурении по комбинированному образцу, моделирующему разрушение при движении резцов в направлении восстания плоскости сланцеватости, получены значения комплексного момента сопротивления  $M_{KC1}$ , механической скорости бурения  $V_{M1}$  (углубки за оборот  $h_{об1}$ ), мощности, затраченной на разрушение забоя  $N_{31}$ , а при бурении по комбинированному образцу, моделирующему разрушение при движении резцов в направлении восстания плоскости сланцеватости, —  $M_{KC2}$ ,  $V_{M2}$  ( $h_{об2}$ ),  $N_{32}$ .

В соответствии с обозначениями на рис.3, энергоемкость разрушения при движении резцов в направлении падения плоскости сланцеватости определяется по выражению



$$W_{GBH} = \frac{2\pi M_{KC1}}{0,785 (D^2 - d^2) h_{об1}}, \quad (12)$$

а в направлении восстания плоскости сланцеватости

$$W_{HAG} = \frac{2\pi M_{KC2}}{0,785 (D^2 - d^2) h_{об2}}, \quad (13)$$

где  $D, d$  – соответственно наружный и внутренний диаметры коронки.

Значения комплексного момента сопротивления резанию при бурении цельной анизотропной породы (при условии равенства механической скорости бурения в противоположных секторах забоя):

$$M_{KCGBH} = \frac{W_{GBH} 0,785 (D^2 - d^2) h_{об\text{ ср}}}{2\pi}, \quad (14)$$

$$M_{KCHAG} = \frac{W_{HAG} 0,785 (D^2 - d^2) h_{об\text{ ср}}}{2\pi}, \quad (15)$$

где  $h_{об\text{ ср}}$  – средняя углубка за оборот;  $h_{об\text{ ср}} = (h_{об1} + h_{об2}) / 2$ .

Площадь кольцевого забоя  $S_3$  может быть записана в виде

$$S_3 = 0,785 (D^2 - d^2) = 2\pi R_{cp} b, \quad (16)$$

где  $R_{cp}$  – средний радиус коронки;  $b$  – ширина торца коронки.

Выполнив в формулах 14 и 15 замену в соответствии с 16 и подставив полученные выражения в формулу 7, получим

$$\Delta F_p = \frac{1}{2} \left( \frac{W_{GBH} 2\pi R_{cp} b h_{об\text{ ср}}}{2\pi R_{cp}} - \frac{W_{HAG} 2\pi R_{cp} b h_{об\text{ ср}}}{2\pi R_{cp}} \right), \quad (17)$$

$$\Delta F_{CP} = \frac{\Delta W \cdot 10^3 \cdot b \cdot h_{об\text{ ср}}}{2}, \left[ \frac{\text{Н мм}}{\text{мм}^3} \text{ мм мм} = \text{Н} \right], \quad (18)$$

где  $\Delta W = W_{GBH} - W_{HAG}$ .

В соответствии с полученным выражением (18), отклоняющая сила пропорциональна разности энергоемкости разрушения породы в противоположных секторах забоя, ширине торца матрицы коронки и величине углубки резцов за оборот.

Исходя из физического смысла, при отсутствии экспериментальных данных по измерению крутящего момента, для определения отклоняющей силы можно использовать энергоемкость разрушения, определенную, исходя из мощности, затраченной на разрушение забоя.

$$Av = \frac{N_3}{V_M * S_3}, \quad (19)$$

$$\Delta F = \frac{(Av_{GBH} - Av_{HAG}) b h_{об\text{ ср}}}{2}. \quad (20)$$

В приведенных выше формулах нами использовалась величина углубки за оборот, для того чтобы показать влияние этого параметра на отклоняющую силу. Уравнение (18) также

может быть представлено в виде

$$\Delta F_p = \frac{1}{2} \left( \frac{W_{GBH} 2\pi R_{cp} b V_{M_{cp}}}{2\pi R_{cp} n} - \frac{W_o 2\pi R_{cp} b V_{M_{cp}}}{2\pi R_{cp} n} \right) = \frac{(W_{GBH} - W_{HAB}) b V_{M_{cp}}}{2n}. \quad (21)$$

Из выражения (22) видно, что подстановка механической скорости и частоты вращения в уравнение (18) не приводит к изменению конечного результата.

$$\frac{V_M}{n} = h_{об}. \quad (22)$$

Выражения (18, 20) позволяют сделать вывод о том, что если увеличение механической скорости бурения достигается за счет увеличением частоты вращения, но при этом углубка за оборот не возрастает, то не возрастает и отклоняющая сила.

Экспериментальные исследования проводились двумя методами: бурением с промывкой, с регистрацией комплексного момента сопротивления, мощности, затраченной на разрушение забоя, механической скорости бурения, а также бурением без промывки с регистрацией электромагнитной эмиссии, возникающей при разрушении породы, мощности, затраченной на разрушение забоя, и механической скорости бурения. Рассчитывались энергоёмкость разрушения, величина сил резания, величина отклоняющей силы.

Статистическая обработка результатов экспериментов показала, что параметры, характеризующие энергоёмкость разрушения анизотропной породы при бурении: энергоёмкость разрушения, определенная по двум независимым каналам - по мощности, затраченной на разрушение забоя (19), и по крутящему моменту (11), а также энергия электромагнитной эмиссии больше при больших углах встречи в случае движения резцов в направлении падения плоскости сланцеватости, а при малых углах встречи - в случае движения резцов в направлении восстания плоскости сланцеватости. Соотношение механических скоростей бурения обратно соотношению энергоёмкости.

Проверка гипотезы о равенстве средних значений показала, что эти различия статистически значимы. Результаты t-тестов представлены в таблице 4. Графики результатов экспериментов, построенные по средним значениям выборок, приведены на рис. 5,6,7.

Как видно из таблицы 4, при определенной величине угла встречи и движении резцов коронки в одном направлении относительно плоскости сланцеватости имеет место большая механическая скорость бурения и мощность, затраченная на разрушение забоя, но меньшая энергоёмкость разрушения и энергия электромагнитного сигнала, чем при движении резцов в противоположном направлении относительно плоскости сланцеватости.

Результаты, полученные при бурении по комбинированным образцам, подтверждены при бурении по цельным (не комбинированным) образцам анизотропных пород с регистрацией электромагнитной эмиссии. Эксперименты представляли собой бурение серийными алмазными коронками диаметром 36 мм с последовательной установкой емкостного дифференциального приемника поля со сторон образца, соответствующих движению резцов в направлении падения и в направлении восстания плоскости сланцеватости. Результаты проверки статистической значимости различия средних значений энергии электромагнитного сигнала приведены в таблице 5.

Количественное различие параметров, характеризующих процессы разрушения при различном направлении движения резцов коронки относительно плоскости сланцеватости, объясняется следующим образом. Исследованиями, проведенными И.А. Нейштетером [16] на кафедре ТР МПИ в ТПУ, установлена высокая степень корреляции механической скорости бурения и мощности, затрачиваемой на разрушение забоя. При бурении горных пород V-XII категории по буримости алмазными коронками среднее корреляционное отношение между механической скоростью бурения и мощностью, затрачиваемой на разрушение забоя, составляет 0,9.

Энергия электромагнитного сигнала имеет статистически значимую корреляционную связь с прочностными свойствами пород при их разбурировании и является показателем фактического сопротивления породы разрушению.

Твердость по штампу анизотропной породы при постоянной величине угла встречи оси

Таблица 4

Результаты проверки гипотезы о равенстве средних значений параметров, характеризующих разрушение анизотропной породы при бурении комбинированных образцов анизотропных пород

Угол встречи, градус	Параметр	Движение разрывов в направлении падения плоскости сланцеватости		Движение разрывов в направлении плоскости сланцеватости		Статистика $t$	Уровень значимости $\varepsilon$
		Среднее значение	Среднеквадратическое Отклонение	Среднее значение	Среднеквадратическое Отклонение		
70	Энергия сигнала	0,114	0,026	0,085	0,018	2,480	0,029
	Энергоемкость разрушения породы, Дж/мм <sup>3</sup>	13,452	0,525	8,316	1,253	10,002	$3,57 \cdot 10^{-7}$
	Мощность, затраченная на разрушение забоя, Вт	501,571	115,144	556,971	241,131	0,549	0,593
	Механическая скорость бурения, мм/с	0,059	0,016	0,112	0,06	2,260	0,043
45	Энергия сигнала, отн. ед.	0,298	0,075	0,126	0,044	5,204	$2,21 \cdot 10^{-4}$
	Энергоемкость разрушения породы, Дж/мм <sup>3</sup>	14,194	0,786	10,281	0,989	8,194	$2,94 \cdot 10^{-6}$
	Мощность, затраченная на разрушение забоя, Вт	413,571	149,571	544,157	105,298	1,889	0,083
	Механическая скорость бурения, мм/с	0,047	0,019	0,085	0,025	3,190	0,008
10-15	Энергия сигнала, отн. ед.	0,091	0,007	0,169	0,018	10,471	$2,17 \cdot 10^{-7}$
	Энергоемкость разрушения породы, Дж/мм <sup>3</sup>	8,577	0,231	11,842	2,261	3,801	0,003
	Мощность, затраченная на разрушение забоя, Вт	385,679	79,138	350,771	95,312	0,746	0,470
	Механическая скорость бурения, мм/с	0,071	0,017	0,050	0,020	2,176	0,050

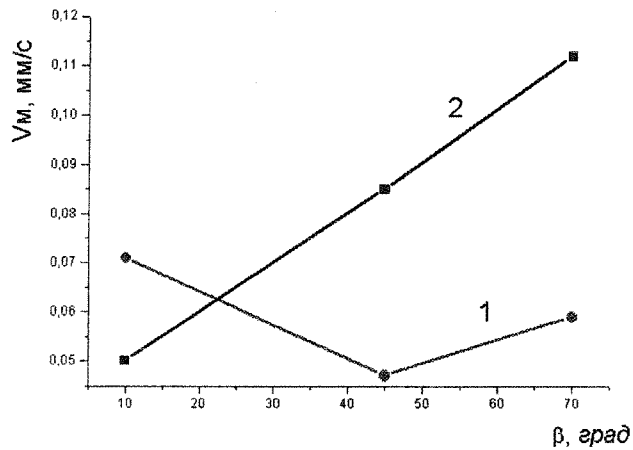


Рис. 5. Зависимость средней механической скорости бурения ( $V_m$ ) от угла встречи оси скважины с плоскостью сланцеватости ( $\beta$ ) при бурении по образцам комбинированного керна: 1-движение резцов в направлении падения плоскости сланцеватости; 2- движение резцов в направлении восстания плоскости сланцеватости

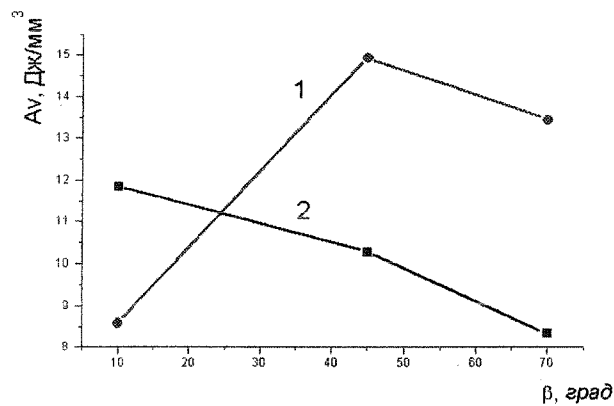


Рис. 6. Зависимость средней энергоемкости разрушения породы ( $A_v$ ) от угла встречи оси скважины с плоскостью сланцеватости ( $\beta$ ) при бурении по образцам комбинированного керна: 1-движение резцов в направлении падения плоскости сланцеватости; 2- движение резцов в направлении восстания плоскости сланцеватости

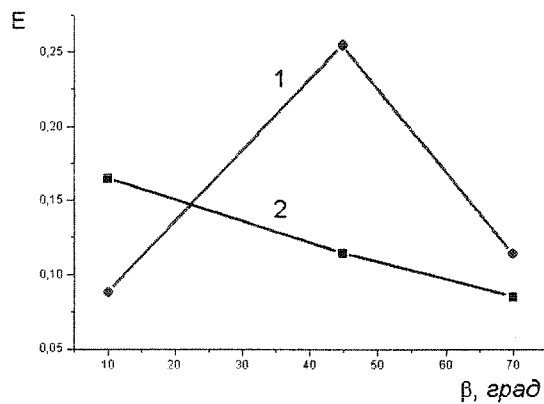


Рис. 7. Зависимость средней энергии спектра электромагнитного сигнала ( $E$ ) от угла встречи оси скважины с плоскостью сланцеватости ( $\beta$ ) при бурении по образцам комбинированного керна: 1 - движение резцов в направлении падения плоскости сланцеватости; 2 - движение резцов в направлении восстания плоскости сланцеватости

Таблица 5

Результаты проверки гипотезы о равенстве средних значений энергии электромагнитного сигнала при движении резцов в направлении падения и в направлении восстания плоскости сланцеватости (бурение по цельным образцам анизотропных пород при  $P=40-360$  даН,  $n=400$  об/мин)

Угол встречи, градус	Движение резцов в направлении падения плоскости сланцеватости		Движение резцов в направлении восстания плоскости сланцеватости		Статистика $t$	Уровень значимости $\epsilon$
	Среднее значение	Средне-квадратическое отклонение	Среднее значение	Средне-квадратическое отклонение		
70	0,267	0,043	0,182	0,045	4,339	0,0004
60	0,128	0,022	0,080	0,005	6,779	$2,4 \cdot 10^{-6}$
45	0,100	0,054	0,060	0,014	2,709	0,0118
45	0,188	0,061	0,164	0,054	1,485	0,1440
15	0,102	0,015	0,227	0,105	4,057	0,0005

индентора с плоскостью сланцеватости (для парных комбинированных образцов) постоянна. В.С. Владиславлевым [1] получено уравнение зависимости предельной глубины внедрения резца  $h_{\max}$  в установившемся режиме резания от осевой нагрузки на резец  $P$ , коэффициента трения  $\mu$ , ширины контактной площадки резца  $b$  и сопротивления скалыванию  $\sigma$ .

$$h_{\max} = \frac{P}{\mu b \sigma} \quad (23)$$

Из уравнения (23) следует, что с увеличением сопротивления скалыванию породы глубина внедрения резца уменьшается. Выразив частоту элементарных актов разрушения через глубину внедрения резца (правая часть выражения (23)), получаем возрастание частоты элементарных актов разрушения с увеличением сопротивления породы скалыванию.

$$f = \frac{\pi}{60} \frac{Dn \mu b \sigma \operatorname{tg} \alpha}{P} \quad (24)$$

Таким образом, с увеличением сопротивления скалыванию уменьшается механическая скорость бурения, увеличивается частота элементарных актов разрушения и, следовательно, суммарная площадь образуемой свободной поверхности. Увеличение площади вновь образуемой свободной поверхности приводит к возрастанию энергоемкости разрушения. Наличие связи интенсивности электромагнитной эмиссии с площадью вновь образованной свободной поверхности и прочностью разрушаемых образцов твердых диэлектриков при статическом нагружении экспериментально установлена В.Ф. Гордеевым [6].

Различие энергии сигнала при движении резцов в направлениях восстания и падения плоскости сланцеватости объясняется следующим образом.

Прочностные свойства твердого тела характеризуются энергией взаимодействия между слабосвязанными структурными элементами, на которые распадается тело. Для ионных кристаллических структур такой характеристикой является энергия решетки. Эту характеристику нельзя прямо применять к слоистым решеткам, имеющим высокую плотность энергии связи внутри слоя и малую энергию связи между слоями. Несмотря на большую величину ионной или ковалентной энергии связи в слое, механическая прочность слоистых структур определяется слабыми ван-дер-ваальсовыми связями, действующими между слоями. В слоистых структурах наименьшая энергия взаимодействия характеризуется энергией расщепления или скола по спайности. Как известно из экспериментальных работ по изучению процессов разрушения упруго-хрупких горных пород при алмазном бурении, разрушение на забое происходит в виде сколов элементарных частиц различных размеров и формы. Скол образуется за счет трещины, которая распространяется от вершины резца к забою. Зарождение трещины в горной породе приводит к выделению энергии, что проявляется в экспериментально за-

регистрированных эффектах выхода летучих продуктов разрушения, тепловой, электромагнитной и акустической эмиссии.

При больших углах встречи и бурении комбинированного образца с движением резцов в направлении восстания плоскости сланцеватости направление трещины скола совпадает с направлением слоев, и разрушение происходит преимущественно по плоскостям спайности с разрывом слабых связей. Энергия электромагнитного сигнала в этом случае меньше, чем при движении резцов в направлении падения плоскости сланцеватости.

При малых углах встречи плоскости сланцеватости трещины скола пересекают плоскость сланцеватости как при движении резцов в направлении падения, так и при движении резцов в направлении восстания. По данным ряда исследователей (И.А. Остроушко [20], В.И. Зварыгин [7] и др.), угол скалывания породы перед передней гранью резца  $\alpha$  изменяется в зависимости от твердости породы в пределах  $15 - 30^\circ$  и увеличивается в условиях всестороннего сжатия до  $45^\circ$  (по Б.В. Байдюку [4]), и до  $57-60^\circ$  (по Г.В. Арцимовичу [2]). Именно с этим связано снижение механической скорости бурения с ростом гидростатического давления на забой скважины.

При малых углах встречи  $\beta$  и движении резцов в направлении падения плоскости сланцеватости направление распространения трещин скола совпадает с направлением плоскости, перпендикулярной сланцеватости, также характеризующейся ослабленной прочностью. Угол  $\gamma$  между направлением распространения трещины скола и этой плоскостью  $\gamma = |\alpha - \beta|$  имеет величину  $5-20^\circ$  (рис. 8,а), а при движении резцов в направлении восстания плоскости сланцеватости направление распространения трещин скола не совпадает с этой плоскостью, угол  $\gamma = \alpha + \beta$  составляет  $25-40^\circ$  (рис. 8,б). Поэтому сопротивление скалыванию  $\sigma$  и сила, необходимая для разрыва связей, при движении резца в направлении восстания плоскости сланцеватости при малых углах встречи этой плоскости больше.

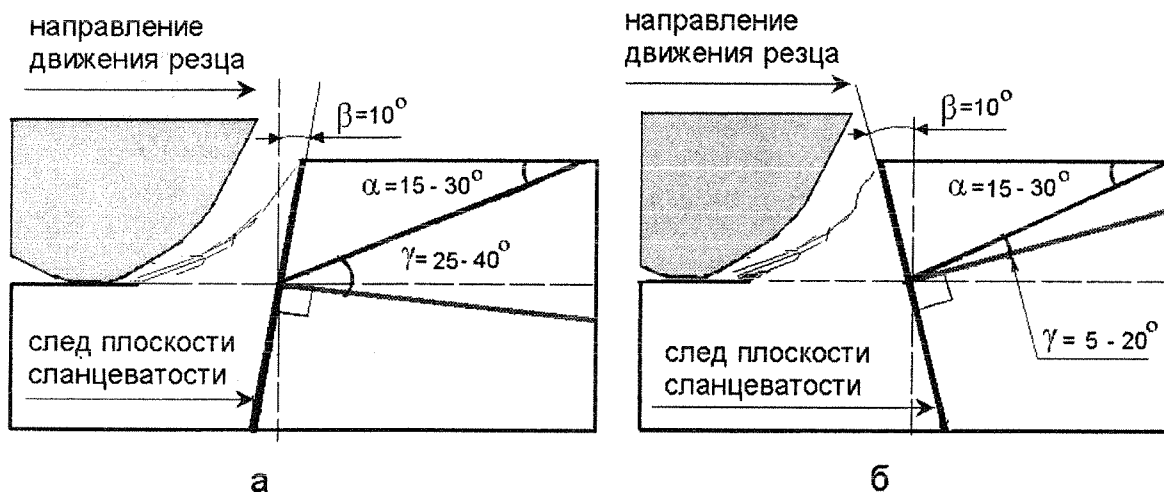


Рис.8. Схема скола породы алмазным резцом при малых углах встречи оси скважины с плоскостью сланцеватости: а - движение резца в направлении восстания плоскости сланцеватости; б - движение резца в направлении падения плоскости сланцеватости

В соответствии с исследованиями В.С. Владиславлева и С.А. Ариффулина [1], сила сопротивления резанию  $F_{СРК}$  для алмазной коронки, имеющей  $z$  рядов резцов, определяется по выражению

$$F_{СРК} = \mu z P_y + z h \sigma b [1 - \mu (\mu_1 + 2 \operatorname{ctg}\psi)] \quad (25)$$

где  $P_y$  — осевая нагрузка на резец;  $\mu$  — коэффициент трения на торцевой грани резца;  $\mu_1$  — коэффициент трения на передней грани резца;  $h$  — углубка резца за 1 оборот коронки;  $\sigma$  — сопротивление скалыванию породы перед передней гранью резца;  $b$  — длина резца;  $\psi$  — угол резания.

В случае рассмотренного соотношения сопротивлений скалыванию в противоположных

Таблица 6  
 Коэффициенты нормированных уравнений зависимости параметров процесса бурения от осевой нагрузки и частоты вращения  $y = \alpha_0 + \alpha_1 P + \alpha_2 n + \alpha_3 Pn$

Параметр	Коэффициенты уравнений ПФЕ							
	Движение резцов коронки в направлении восстания плоскости сланцеватости				Движение резцов коронки в направлении падения плоскости сланцеватости			
	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
Механическая скорость бурения, мм/с	0,1460	0,0940	0,0595	0,0505	0,1928	0,1273	0,0758	0,0643
Мощность, затраченная на разрушение, Вт	646,47	187,03	59,53	-13,03	728,85	186,15	82,65	-2,65
Энергоемкость разрушения породы, Дж/мм <sup>3</sup>	10,3097	-3,5888	-1,4964	-1,2801	9,1887	-3,8531	-1,0944	-0,8477
Энергия сигнала	0,2565	-0,0055	0,0259	-0,0486	0,1198	0,0223	0,0367	0,0022

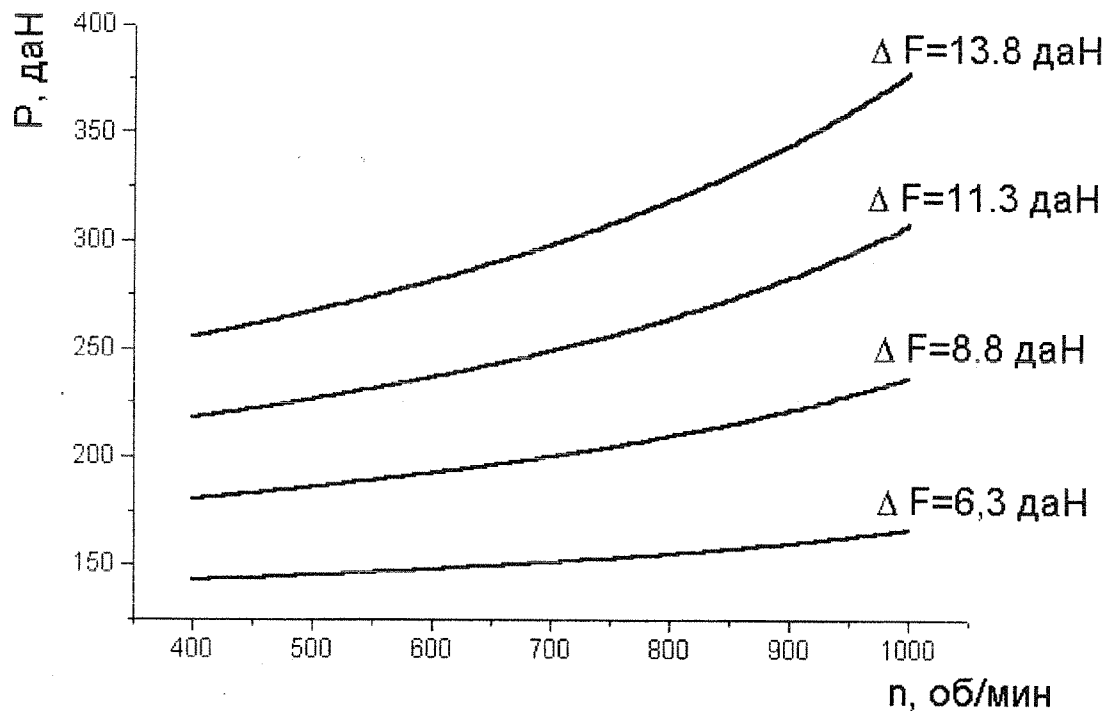


Рис.9 Изолинии отклоняющей силы ( $\Delta F$ ) в координатах осевой нагрузки ( $P$ ) и частоты оборотов ( $n$ )

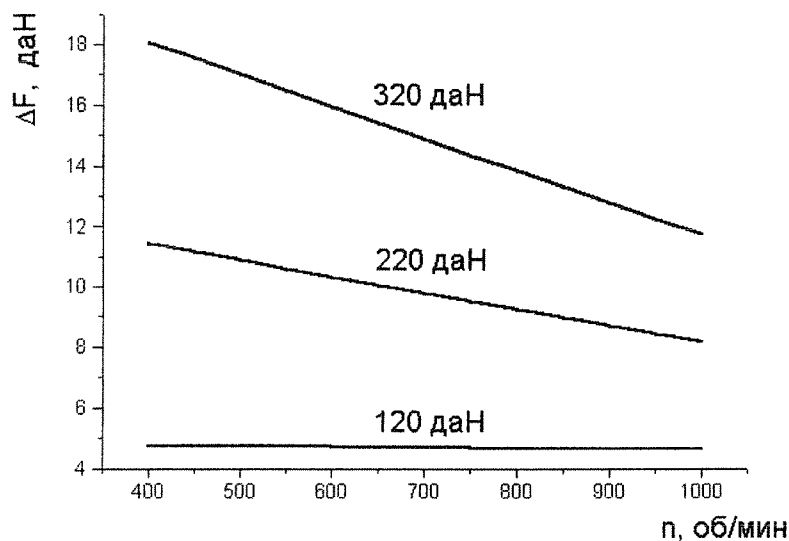


Рис.10. Зависимость отклоняющей силы ( $\Delta F$ ) от частоты оборотов ( $n$ ) при различных осевых нагрузках

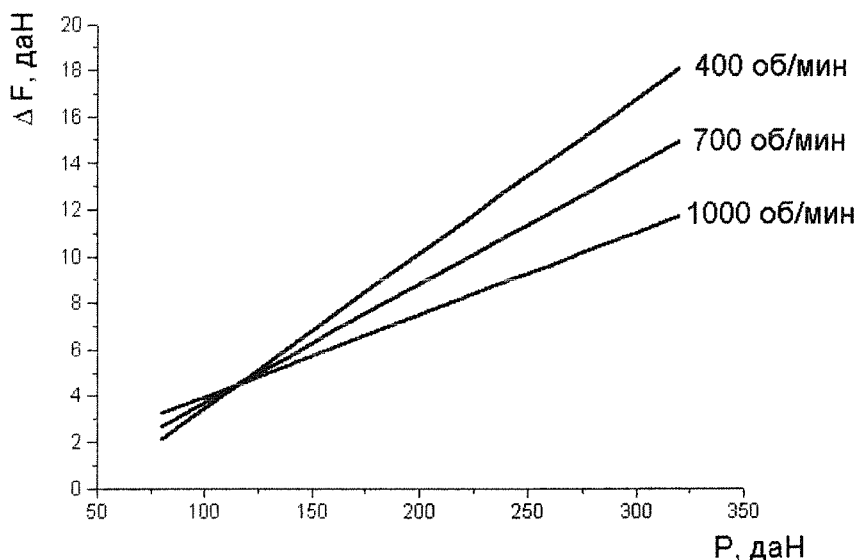


Рис.11. Зависимость отклоняющей силы ( $\Delta F$ ) от осевой нагрузки ( $P$ ) при различных частотах оборотов

секторах забоя в соответствии со схемой, приведенной на рис.3, отклоняющая сила действует в направлении падения плоскости сланцеватости.

Полученные результаты позволяют полагать, что направление действия отклоняющей силы относительно плоскости сланцеватости анизотропной породы определяется углом встречи оси породоразрушающего инструмента с плоскостью сланцеватости: при больших углах встречи отклоняющая сила действует в направлении восстания плоскости сланцеватости, а при малых углах встречи - в направлении падения плоскости сланцеватости. Отклоняющая сила зависит от разности энергоемкости разрушения породы при движении резцов в направлении падения и в направлении восстания плоскости сланцеватости, от площади торца породоразрушающего инструмента и углубки за оборот.

Явление действия отклоняющей силы в направлении восстания плоскости сланцеватости хорошо известно. При бурении комбинированных образцов это экспериментально подтверждено работами В.В. Кривошеева [8]. Последующими экспериментальными работами коллективом авторов данной статьи экспериментально подтверждено и теоретически обосновано действие отклоняющей силы в направлении падения плоскости сланцеватости при ма-



лых углах встречи. Эти результаты являются новыми и потребовали проверки в более широком диапазоне изменения параметров режима бурения. При этом также была поставлена задача исследования влияния параметров режима бурения на величину отклоняющей силы.

Экспериментальное бурение было проведено по ортогональной схеме полного факторного эксперимента (ПФЭ) по комбинированным образцам анизотропного сланца с углами встречи 10-15°. Бурение проводилось однослойными алмазными коронками диаметром 36 мм. Интервал варьирования осевой нагрузки составлял 80-320 даН, частоты вращения - 400-1000 об/мин.

Коэффициенты уравнений ПФЭ, полученные по осредненным результатам, приведены в таблице 6. Коэффициент  $\alpha_0$  является средним значением параметра по четырем точкам схемы ПФЭ. Сравнение этих коэффициентов для движения резца в направлении падения и в направлении восстания плоскости сланцеватости подтверждает выводы о процессе разрушения, сделанные на основании экспериментов со ступенчатым увеличением осевой нагрузки. При движении резцов в направлении падения плоскости сланцеватости коэффициенты  $\alpha_0$  выше в уравнениях механической скорости бурения и мощности, затраченной на разрушение забоя, и ниже в уравнениях энергоемкости разрушения и энергии сигнала. Сила сопротивления резанию выше при движении резцов в направлении восстания плоскости сланцеватости. Следовательно отклоняющая сила действует в направлении падения плоскости сланцеватости.

Уравнение зависимости отклоняющей силы от параметров режима бурения имеет вид

$$\Delta F = 8,7745 + 6,1156P - 1,3095n - 1,8642Pn. \quad (26)$$

Расчетные зависимости отклоняющей силы от параметров режима бурения приведены на рис.9,10,11.

Как видно из таблицы 6 и рис.8,9,10, отклоняющая сила в области малых углов встречи оси породоразрушающего инструмента с плоскостью сланцеватости увеличивается с ростом осевой нагрузки и уменьшается с ростом частоты вращения, причем при высоких осевых нагрузках снижение абсолютной величины отклоняющей силы с увеличением частоты вращения происходит более интенсивно.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что величина отклоняющей силы при малых углах встречи оси скважины с плоскостью сланцеватости анизотропной породы зависит от параметров режима бурения. Отклоняющая сила возрастает с увеличением осевой нагрузки и уменьшается с ростом частоты оборотов.

Ранее зависимость отклоняющей силы от параметров режима бурения объяснялась изменением степени изгиба КНБК [21] и изменением напряженно-деформированного состояния анизотропной горной породы [19] под действием осевой нагрузки. Проведенные нами эксперименты показывают, что зависимость отклоняющей силы от параметров режима бурения связана с закономерностями разрушения анизотропных горных пород.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Арифалин С.А. Исследование энергетических затрат на забое скважины при высоких частотах вращения алмазной коронки. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., МГРИ, 1981, 226 с.
2. Арцимович Г. В. Создание и внедрение коронок и долот для бурения различных, в том числе многолетнемерзлых, пород. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Якутск, АН СССР Якутский филиал Институт горного дела Севера, 1984, 487 с.
3. Арцимович Г. В., Поладко Е.И., Свешников И.А. Исследование и разработка породоразрушающего инструмента для бурения. Новосибирск, Изд-во «Наука», 1978, 181 с.
4. Байдюк Б.В. Механические свойства горных пород при высоких давлениях и температурах. М., Гостоптехиздат, 1963, 102 с.
5. Беляков В.И., Блинов Г.А., Григоренко П.М. и др. Исследование упругих колебаний породоразрушающего инструмента. Методика и техника разведки, Л., ВИТР, 1974, № 90, с. 15-25.
6. Гордеев В.Ф. Поисковые работы по исследованию электромагнитного излучения образцов из кварцевой керамики при механическом нагружении. ТПУ, 1987, 128с.

7. Зварыгин В.И. Исследование процесса разрушения пород твердосплавными резцами с целью выявления оптимальных условий работы коронок, применяемых при колонковом бурении геологоразведочных скважин. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томск, ТПИ, 1965, 181 с.
8. Кривошеев В.В. Управление искривлением скважин при алмазном бурении в анизотропных породах. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. Томск, ТПУ, 1991, 369 с.
9. Кривошеев В.В., Ларин А.А., Нейштетер И.А. Некоторые закономерности искривления скважин при различных углах встречи плоскости сланцеватости. Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые. Вып. 22: Межвуз. науч. темат. сб. Екатеринбург: Изд-во Уральской гос. горно-геол. академии, 1999, с.174-183.
10. Кривошеев В.В., Ларин А.А., Нейштетер И.А., Гордеев В.Ф. Некоторые закономерности генерирования импульсного электромагнитного поля при бурении анизотропных пород. Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые. Вып.23. Межвуз. науч. темат. сборник. Екатеринбург: Изд-во Уральской гос. горно-геологической академии, 2000, – с.205–212.
11. Кривошеев В.В., Нейштетер И.А. Исследование вопросов теории и практики управления искривлением скважин в анизотропных горных породах. Отчет о научно-исследовательской работе. Томск, ТПУ, 1995, 39 с.
12. Кривошеев В.В., Нейштетер И.А., Ларин А.А., Гордеев В.Ф. Изучение электромагнитной эмиссии при бурении анизотропных пород. Материалы докладов 4-го Международного симпозиума по бурению скважин в осложненных условиях. С -Петербург: РИЦ С -Петербургского ГГИ, 1998, с.48.
13. Ларин А.А. Исследование процесса взаимодействия алмазного породоразрушающего инструмента с анизотропной горной породой с целью выявления закономерностей естественного искривления скважин. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томск, ТПУ, 2000, 192с.
14. Малышков Ю.П. Диагностика разрушения твердых тел по характеристикам электромагнитной эмиссии. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томск, 1986, 196 с.
15. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. М. Радио и связь, 1990. 512 с.
16. Нейштетер И.А., Кривошеев В.В., Истомина А.А., Шмалько Е.В. Исследование связи между критериями оптимизации. Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые. Екатеринбург, Изд-во УГГА, 1998, с.75-84.
17. Нейштетер И.А., Кривошеев В.В., Ларин А.А. О возможности разделения псевдопластичной и квазихрупкой компонент процесса разрушения горных пород при бурении. Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые. Вып. 22: Межвуз. науч. темат. сб. Екатеринбург: Изд-во Уральской гос. горно-геол. академии, 1999, с.183-190.
18. Нейштетер И.А., Кривошеев В.В., Ларин А.А., Гордеев В.Ф. Генерирование электромагнитного сигнала анизотропной горной породой при изменении параметров режима бурения. Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые. Вып. 21: Межвуз. науч. темат. сб. Екатеринбург: Изд-во Уральской гос. горно-геол. академии, 1998, с.95-109.
19. Нескоромных В.В. Теоретические и экспериментальные исследования основ механики разрушения горных пород в процессе формирования стволов скважин заданного направления и кривизны. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Томск, ТПУ, 1988, 264 с.
20. Остроушко И.А. Разрушение горных пород при бурении. М., Гос. изд. геологической литературы, 1952, 254 с.
21. Сулакшин С.С. Направленное бурение. М., Недра, 1987, 272 с.