Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLI, вып. 2, 1961 г.

О ФАКТОРАХ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИСКРИВЛЕНИЕ КОЛОНКОВЫХ СКВАЖИН

Ю. Т. Морозов

Искривление скважин, т. е. отклонение оси скважины от ее проектного профиля, явление в высшей степени нежелательное, часто приводящее к невыполнению буримой скважиной поставленных перед ней геологических задач и приносящее большие убытки народному хозяйству. Поэтому выявление и изучение всех факторов, влияющих на искривление колонковых скважин, является актуальным и важным вопросом.

Так, недостаточно установлена и освещена величина действительного диаметра колонковых скважин, т. е. разбуриваемость их стенок (разработка ствола). Утверждается, например, что величина разбурки при дробовом бурении составляет 10—12 *мм* (3—4 диаметра буровой дроби) [4], хотя еще в 1935 г. М. А. Шибаков считал ее равной 20—25% от диаметра буровой коронки [6]. Недостаточная изученность и недооценка этого важного вопроса часто приводят к неправильному или неудачному решению ряда практических задач.

Особенно актуален этот вопрос для наклонно направленного бурения, например для определения действительного диаметра буровой скважины в интервале постановки отклоняющих клиньев, зарезки нового ствола, выяснения причин интенсивного искривления скважин и т. д.

Величину разбуривания стенок колонковых скважин определяют следующие факторы: а) физико-механические свойства проходимых горных пород; б) вид бурения; в) конструкция колонкового снаряда; г) технологический режим бурения; д) диаметр и количество буровой дроби на забое скважины (способ питания) при дробовом бурении. Некоторые из этих факторов рассмотрены в настоящей статье.

Физико-механические свойства горных пород. Прямая зависимость разбуривания стенок колонковых скважин от физико-механических свойств горных пород очевидна и никогда сомнений не вызывала. Однако величина разбуривания стенок колонковых скважин в породах различного литологического состава при равных условиях до сих пор практически оставалась неустановленной.

Как видно из табл. 1, где приведены результаты исследования кавернограмм, снятых на месторождениях Нижнего Тагила и Бакала, породы различного литологического состава, относимые к одной и той же категории по буримости, имеют различную величину разбуривания стенок скважин при равных диаметрах бурового наконечника, при этом скважины в породах однородного состава имеют большую величину разбуривания стенок, чем скважины в породах, перемежающихся по твер-

Таблица 1

Порода	Диаметр бурового наконечника $D_{б.н}$, *мм*	Действительный диаметр скважины $D_д$, *мм*		Категория породы по буримости	Исследованный метраж
		интервал колебаний $D_{и.к}$	средневзвешенный $D_{св}$		
Чугунная дробь, Н. Тагил					
Порфирит	110	170—210	195	VII	128,5
То же	110	165—210	190	VII—VIII	38
„	110	165—210	187	VIII	21
„	110	160—195	170	VIII—IX	16
„	110	132—180	145	VIII—X	32
Известково-хлоритовые сланцы	110	155—230	190	VII	35,5
То же	110	160—220	170	VII—VIII	34
„	110	160	160	VIII	5
Сланцы хлоритовые	110	160—175	165	VII	10
То же	110	140—160	148	VIII	29
„	110	140	140	VIII—X	4
Брекчия известняка	110	155—210	185	VII	24
	110	165—185	170	VII—VIII	8
Роговик	91	210—220	210	VII	7
То же	91	125—190	155	VIII	8,4
„	91	117—140	125	IX	35,5
„	91	117—125	120	X	30
„	91	117—120	118	X—XI	46
„	91	117	117	XI	4
Скарн	91	140—190	178	VIII	14
Сиенит	91	120	120	XI	4
Стальная дробь-сечка, Бакал					
Кварцит	130	146	146	X	13,5
То же	130	140—160	145	XI	92,5
„	110	175	175	VIII	5
„	110	132	132	IX	6
„	110	133—155	144	X	21,5
„	110	135—160	144	X—XI	24
„	110	118—145	130	XI	399
„	110	127—132	129,5	XI—XII	54
Известняк	110	146—170	160	VIII	6,2
Доломит	110	137—170	146	VIII	17,5
Сидерит	110	137—160	145	VIII	87
Углисто-глинистые сланцы	110	135—155	140	VIII	14
Чугунная дробь, Бакал					
Диабаз	130	165—230	220	VII	9,5
То же	130	160—190	180	VIII—IX	26
„	130	160—190	170	IX	14
Известняк	130	175	175	VIII	6
Доломит	130	155—220	168	VIII	111,5
Ороговикованные сланцы	130	175—180	178	VIII	9
	130	162	162	IX	17
Кварцит	110	118—175	127	XI	89,5
Известняк	110	115—180	150	VIII	719
То же	110	144	144	IX	2
Доломит	110	150	150	VII	3
То же	110	115—175	148	VIII	1048,5
„	110	123—155	146,5	IX	128,5
Сидерит	110	115—175	139	VIII	437
Магнезит	110	123—150	135,5	VIII	32,5
Доломито-углисто-глинистые и доломитовые сланцы	110	136—170	143	VII	24
	110	116—175	132	VIII	115
Песчано-глинистые сланцы	110	148—165	151	VII	69

Продолжение табл. 1

Порода	Диаметр бурового наконечника $D_{б.н}$, *мм*	Действительный диаметр скважины $D_д$, *мм*		Категория породы по буримости	Исследованный метраж
		интервал колебаний $D_{и.к}$	средневзвешенный $D_{св}$		
Песчано-глинистые сланцы . .	110	120—155	141,5	VIII	211
То же	110	115—147	132	IX	75
Песчано-углисто-глинистые сланцы	110	137—160	148,5	VII	37,5
	110	125—150	141	VIII	67,5
Толща переслаивания известняка с глинистым сланцем .	110	153—170	160	VII	41
	110	138—150	145	VIII—IX	50
Толща переслаивания доломитов и ороговикованных сланцев	110	135—150	145	VII	14,5
	110	130—155	139	VIII	73,0

дости. С увеличением диаметра буровой дроби величина разбуривания стенок скважин во всех породах несколько повышается. Минимальное разбуривание отмечается у доломито-углисто-глинистых, песчано-углисто-глинистых сланцев и толщи переслаивания доломитов и ороговикованных сланцев.

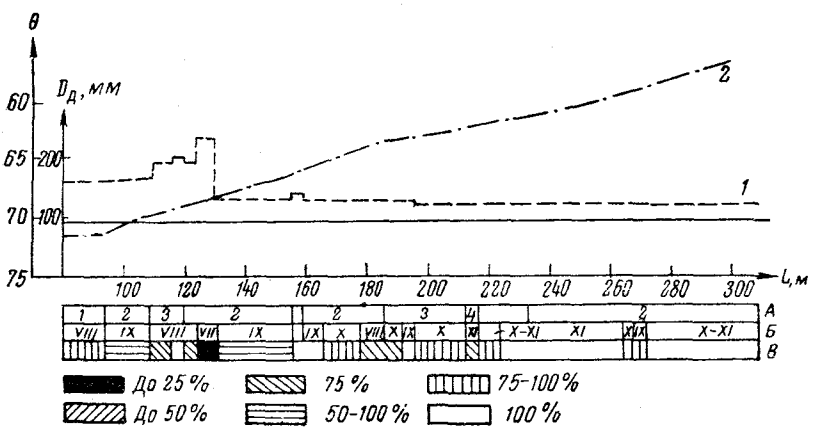


Рис. 1. Кавернограмма (*1*) и кривая зенитного искривления (*2*) скважины 268 в Нижнем Тагиле:

А — геологический разрез скважины; *Б* — категории пород по буримости; *В* — выход керна, %; *1* — туф порфиритов; *2* — *Pr* — *Pl* роговик; *3* — *Pr* — гранатовый скарн; *4* — сиенит

С увеличением категорий пород по буримости величина разбуривания всех пород убывает в той же последовательности. Интервал колебаний действительного диаметра показывает величину разбуривания стенок по разным скважинам, причем большая разбуриваемость наблюдается в приповерхностных зонах до глубины 200—300 *м*. В табл. 2 в зависимости от категорий пород по буримости и диаметров буровых наконечников приводятся средневзвешенные величины разбуривания стенок скважин по породам различного литологического состава, что характеризует общую разбуриваемость скважин по месторождению. Здесь

также с увеличением категорий пород разбуриваемость стенок последовательно уменьшается. Интервал колебаний скважин по диаметру характеризует средневзвешенные величины разбуривания стенок скважин по различным породам. Установленные действительные диаметры колонковых скважин $D_д$ в значительной мере превышают диаметры соответствующих им буровых наконечников. Величины разбуривания стенок скважин, приводимые в литературе, приблизительно соответствуют только самым высоким категориям пород (XI—XII), все же другие разбуриваются значительно больше, достигая иногда размеров двух и более диаметров коронки. Такое значительное разбуривание имеют чаще всего сильно рассланцованные, метаморфизованные, трещиноватые зоны, которые встречаются среди пород всех категорий (рис. 1).

Различная степень разбуривания скважин в исследованных районах объясняется большей метаморфизацией и трещиноватостью пород (табл. 2) и, кроме того, применением в основном рейсовой засыпки дроби Н. Тагила.

Таблица 2

$D_{б.н}$, *мм*	$D_{св}$, *мм*	$\frac{D_д}{D_{б.н}} 100\%$	$D_{и.к}$, *мм*	Категория по буримости	Исследованный метраж
		Чугунная дробь, Н. Тагил			
110	191	173,5	165—195	VII	206
110	179,5	163	170—190	VII—VIII	80
110	167	152	148—195	VIII	55
110	152,5	138,5	140—170	VIII—IX	152,5
91	170,5	187,5	150—210	VII	106
91	163	179	125—178	VIII	26,4
91	125	137,5	125	IX	39,5
91	121	133	120—125	X	36
91	118	130	117—120	XI	54
		Чугунная дробь, Бакал			
130	220	169	220	VII	9,5
130	164,5	126,5	160—180	VIII	152,5
130	165	127	162—170	IX	31
110	154	140	135—220	VII	182,5
110	145	132	115—180	VIII	3184,5
110	140,5	128	115—170	IX	933,5
110	127,5	116	118—150	X	28
110	127	115,5	118—175	XI	89,5
		Стальная дробь-сечка, Бакал			
130	146	111,2	146	X	13,5
130	145	111,15	140—160	XI	92,5
110	147,5	134	135—175	VIII	179,8
110	138,5	126	132—150	IX	9
110	144	131	133—160	X	55,5
110	130,5	118	118—145	XI	405
110	129,5	117,5	127—132	XI—XII	54
		Твердосплавное бурение, Н. Тагил			
110	179	163	170—185	VI—VII	36
110	178	162	150—230	VII	119,6
110	174	158	170—185	VII—VIII	57,4
110	166	151	145—210	VIII	47
110	151,5	137,5	140—170	VIII—IX	8

Для того и другого района степень разбуривания стенок колонковых скважин увеличивается при уменьшении диаметра бурового наконечника (рис. 2). Вследствие этого угол перекоса Θ (отклонение оси колонкового снаряда от оси скважины) у снарядов меньших диаметров при их меньшей жесткости и продольной устойчивости будет выше, чем у снарядов больших диаметров при равной длине. Таким образом, уменьшение диаметра бурового наконечника будет обеспечивать увеличение интенсивности искривления колонковых скважин. Увеличение длины жесткого колонкового снаряда вызовет уменьшение Θ и сокращение интенсивности искривления скважин.

Работа бурового наконечника на забое в процессе разбуривания стенок колонковых скважин представляется следующим образом

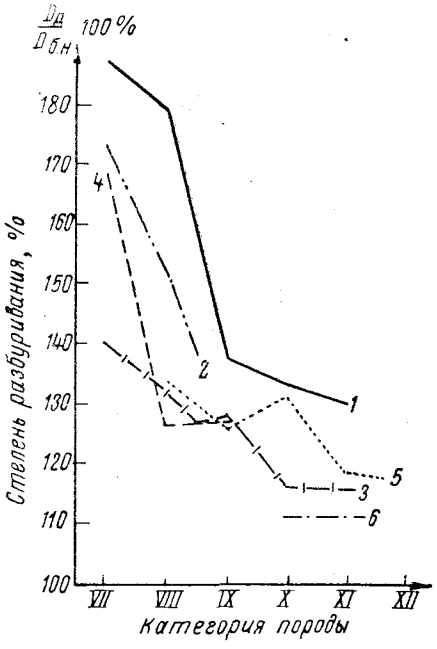


Рис. 2. Зависимости степени разбуривания стенок колонковых скважин от категории проходимых пород.
Чугунная дробь; $D_{б.н}$:
1 — 91 *мм*, Н. Тагил; *2* — 110 *мм*, Н. Тагил; *3* — 110 *мм*, Бакал; *4* — 130 *мм*, Бакал.
Стальная дробь-сечка; $D_{б.н}$:
5 — 110 *мм*, Бакал; *6* — 130 *мм*, Бакал

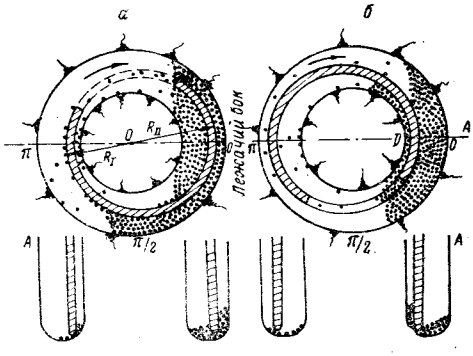


Рис. 3. Положение дробовой коронки и распределение дроби на забое скважины. Коронка со стороны лежачего (*а*) и висячего (*б*) боков скважины

Нижняя нагруженная часть колонны в процессе работы теряет свою прямолинейность и принимает форму, близкую пространственной синусоиде. Действительные размеры скважин, значительно превышающие диаметр бурового наконечника, позволяют колонне на отдельных участках изогнуться с числом полуволн даже выше расчетного. При этом буровая колонна вращается вокруг оси скважины так, что одна сторона коронки эксцентрично окатывается вокруг столбика керна, в то время как ее противоположная сторона производит разрушение стенок скважины (рис. 3). Это подтверждается следующим положением.

Для рассматриваемых районов размеры керна в среднем на 20—25 *мм* меньше внутреннего диаметра коронки. Действительный диаметр скважин в таком случае определится следующим расчетом (см. рис. 3).

1. Для $D_{б.н} = 130$ *мм*

$$R_I = \frac{D_к}{2} + \delta + d_1 = \frac{90}{2} + 7 + 3 = 55 \text{ мм};$$

$$R_{II} = D_{б.н} - R_I = 75 \text{ мм},$$

где $D_к$ — диаметр керна;
R_I — меньший, а R_{II} — больший радиусы при эксцентричном положении бурового наконечника;
δ — толщина стенки коронки;
d_1 — диаметр дроби;

$$D_д = 2R_{II} + 4d_1 = 162 \text{ мм}.$$

2. Для $D_{б.н} = 110$ мм $D_д = 142$ мм.
3. Для $D_{б.н} = 91$ мм $D_д = 116$ мм.

Сравнивая эти цифры с данными табл. 2, видим, что во всех случаях коронка эксцентрично окатывается вокруг столбика керна (т. е. вращается вокруг оси скважины) и лишь в единичных случаях приближается к вращению, соосному с осью скважины. При этом процесс разбуривания стенок скважины и разрушение пород забоя представляется следующим образом.

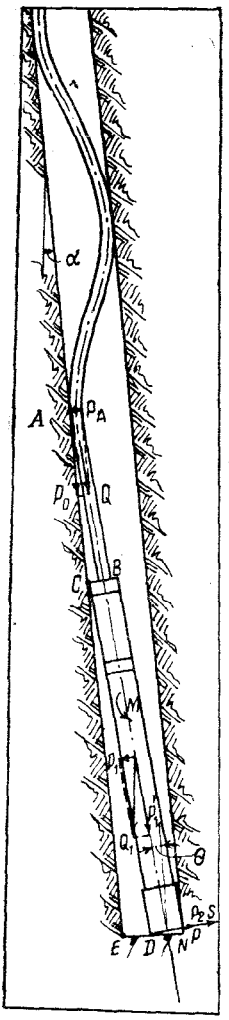


Рис. 4. Положение колонкового снаряда в наклонной скважине

Буровая колонна находится в скважине под совместным действием продольных и поперечных сил. Продольный изгиб образуется из-за несоответствия осевых нагрузок Q на коронку жесткости буровых штанг, поперечный — из-за центробежных сил, колеблющихся в зависимости от изменения угловой скорости и степени разбуривания скважины.

При продольном изгибе в буровой колонне (рис. 4) в точке A возникает поперечная сила P_A (реакция опоры) и изгибающий момент M, который стремится прижать нижнюю часть колонкового снаряда к противоположной от расположения силы P_A стороне скважины, т. е. в точке N коронка давит на стенку скважины с силой P, причем можно принять $P = P_A k$ ($k \leqslant 1$ — коэффициент пропорциональности).

При вращении коронки в точке N возникает центробежная сила P_2, совпадающая по направлению с силой P. Равнодействующая сила

$$S = (P + P_2) \pm P_1,$$

где P_1 — составляющая веса колонкового снаряда от точки опоры до наконечника;

$$P_1 = \frac{Q' \sin(\alpha + \Theta)}{2};$$

α — угол наклона скважины, *град*;
Θ — угол перекоса в скважине, *град*;
Q' — вес колонкового снаряда, *кг*.

Ввиду незначительного веса колонковых снарядов P_1 можно пренебречь (коэффициент k в этом случае равен единице). При применении тяжелого низа силу P_1 и коэффициент $k < 1$ необходимо учитывать.

При вращении снаряда суммарная сила S (когда $P_1 = 0$) действует равномерно по окружности скважины. При равномерном распределении

дроби на забое разбуривание также было бы равномерным. Однако под действием гравитационного поля и в зависимости от угла наклона скважины дробь скапливается на лежачей стенке и лишь действием центробежных сил выбрасывается во внешний зазор, между стенкой скважины и коронкой, по ходу вращения последней. Постоянный больший или меньший перекос снаряда в скважине приводит к тому, что рабочая поверхность дробовой коронки также будет иметь некоторый элементарный перекос (в нашем случае при коронке диаметром 91 *мм* перекос равен 0,67 *мм*), поэтому давление на забой по торцу коронки в каждый конкретный момент будет распределяться неравномерно.

Наибольшее давление на забой будет в той точке (см. рис. 4, точка *D*) коронки, со стороны которой верхняя часть снаряда опирается на стенку скважины (точки *A*, *C*). Противоположная часть коронки в этот же момент (точка *N*) действует с наибольшей силой на стенку скважины, т. е. точка максимального давления на забой опережает точку максимального давления на стенку скважины на 180° (см. рис. 3).

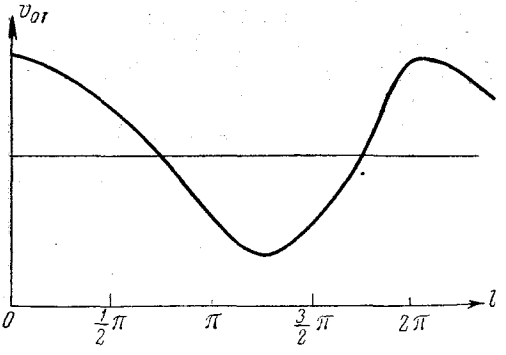


Рис. 5. Кривая скорости разрушения пород забоя и стенок скважины:

$v_{от}$ — относительная скорость разрушения пород забоя и стенок скважины; l — длина кольцевого забоя; 0 — низшая точка лежачей стенки скважины

При распределении дроби в скважине, о котором упоминалось выше, в положении снаряда, указанном на рис. 4 и 3, *б*, наибольшее разрушение породы на забое будет происходить в точке *D* (см. рис. 4). При повороте снаряда на 180° максимальное усилие будет в верхней части коронки, однако при некотором недостатке дроби со стороны висячей стенки скважины и при избытке со стороны лежачей стенки разрушение в обеих частях будет происходить более или менее равномерно. В этом положении, т. е. при минимальном давлении на забой, к лежачей стенке скважины будет приложено максимальное усилие *S* (см. рис. 3). При избытке дроби на лежачей стенке разрушение ее будет происходить весьма интенсивно. Верхняя часть скважины в это время практически не разбуривается. При повороте на 180° усилие *S* будет приложено к висячей стенке скважины рис. 4 и 3, *б* (точка *D*). Однако при недостатке дроби со стороны висячей стенки скважины разрушение ее не будет столь интенсивным, как в предыдущем случае. В то же время при избытке дроби на лежачей стенке скважины произойдет некоторое разрушение лежачей стенки.

Таким образом, подобное распределение дроби и усилий по забою и стенкам скважины вызывает интенсивное разрушение лежачей стенки и левой части скважины и ведет к постепенному выполаживанию и правому азимутальному искривлению буровой скважины. При этом, чем больше степень разбуривания и чем меньше угол наклона скважины, тем большая часть дроби будет скапливаться на лежачей стенке и тем интенсивнее выполаживание скважины. Кривая скорости разрушения породы забоя и скорости разрушения стенок скважины имеет вид ассимметричной косинусоиды (рис. 5).

Для аналогичных условий силу P_A расположенную в точке опоры, А. С. Станишевский [3] считает местом защемления и, принимая конце-

вые условия, выводит следующую формулу:

$$P_A = \frac{\sqrt[3]{Q^2 f}}{\pi \sqrt{EI}}$$

и, следовательно,

$$P = \frac{k\sqrt[3]{Q^2 f}}{\pi \sqrt{EI}},$$

где f — стрела прогиба, $f = \frac{D_д - D_{к.т}}{2}$;

Q — давление на забой;

$D_д$ — действительный диаметр скважины;

$D_{к.т}$ — диаметр колонковой трубы;

EI — жесткость колонны бурильных труб.

Силу P_2 можно определить по формуле

$$P_2 = m\omega^2 f_1.$$

Так как

$$m = \frac{ql}{g},\ \omega = \frac{\pi n}{30} \text{ и } \pi^2 \approx g,$$

$$P_2 = \frac{qn^2 l f_1}{900},$$

где m — масса тела;

q — вес единицы длины колонкового снаряда;

g — ускорение силы тяжести;

ω — угловая скорость вращения снаряда;

n и l — число оборотов и длина колонкового снаряда.

В случае проходки рассланцованных, трещиноватых пород под действием силы S происходит скол столбика керна, тогда разбуривание скважины достигает максимальных размеров (табл. 1). При этом максимальное разбуривание скважины сопровождается понижением процента выхода керна. Зависимость выхода керна от действительного диаметра скважины и категорий пород показывает табл. 3 и рис. 1.

Таблица 3

Порода	$D_{б.н}$, *мм*	$D_д$, *мм*	Выход керна, %	Категория породы	Интервал бурения, *м*
Диабаз, скважина № 1809	130	220	25	VII	202,5—212
То же	130	180	50—100	VII—VIII	212—328
„	110	161	75	VIII	338,5—340
„	110	115	100	VIII	603—612
Известково-хлоритые сланцы, скважина № 198 . . .	110	160	65—100	VIII	246—251
То же	110	170	До 75	VII—VIII	251—285
„	110	230	20—50	VII	285—296

Из данных табл. 1, 2 выведены средние значения разбуриваемости стенок колонковых скважин при бурении чугунной дробью.

В табл. 4 даны средние значения степени разбуривания и действительного диаметра скважин.

Таблица 4

$D_{б.н}$, мм	Категория породы					
	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	Степень разбуривания, %					
130 (100%)	160—140	140—125	130—120	118—113	112—108	108—106
110 (100%)	170—150	145—135	135—125	125—120	120—115	118—112
91 (100%)	185—170	165—145	145—140	140—130	130—120	125—120
	Величина действительного диаметра, мм					
130	208—182	182—162	169—156	153—147	146—140	140—138
110	187—165	159—148	148—137	137—132	132—126	129,8—123
91	168—154	150—132	132—127	127—118	118—109	114—109

В полевых условиях определение действительного диаметра скважин с достаточной степенью точности можно производить по полученной нами эмпирической формуле

$$D_д = a\left(\frac{5}{3}d_1 + \frac{410}{\sqrt{K}}\right), \text{ мм},$$

где d_1 — диаметр буровой дроби, мм;
K — категория пород по буримости;
a — опытный коэффициент, для $D_{б.н} = 130$ мм $a = 1{,}11$;
для $D_{б.н} = 110$ мм $a = 1{,}00$; $D_{б.н} = 91$ мм $a = 0{,}91$.

Таким образом, приведенные данные показывают, что разработка стволов колонковых скважин зависит от физико-механических свойств проходимых пород, диаметра бурового наконечника и диаметра буровой дроби.

Вид бурения. Одним из важных факторов в предотвращении разбуривания и искривления скважин является вид бурения. Установлено, что искривление скважин увеличивается в зависимости от вида бурения в последовательности от алмазного к твердосплавному и к дробовому. Полученные нами данные в отношении двух последних видов бурения подтверждают подобную последовательность (табл. 5) и в отношении разбуривания стенок скважин.

Таблица 5

Порода	$D_{б.н}$, мм	Категория по буримости	$D_д$, мм		Породы Бакала	$D_{б.н}$, мм	Категория по буримости	$D_д$, мм	
			чугунная дробь	твердые сплавы				стальная сечка	чугунная дробь
Порфирит	110	VII	195	180	Углисто-глинистые сланцы	110	VIII	140	140
Известково-хлористые сланцы	110	VII	190	180	Сидерит	110	VIII	146	139
Брекчия известняков	110	VII	185	170	Доломит	110	VIII	145	148
Хлоритовые сланцы	110	VII	165	160	Песчано-углисто-глинистые сланцы	110	VIII	153	141
					Известняк	110	VIII	160	150
					Диабаз	110	VIII	165	147

Последовательность, указанная в табл. 5, подтверждается и при различных категориях пород (см. рис. 2 и 6).

Большая степень разбуривания стенок скважин стальной дробью-сечкой по сравнению с чугунной объясняется угловатой формой сечки, неравномерностью ее поперечных размеров, сохранением размеров в течение продолжительного времени ввиду большей твердости ее (чугунная дробь довольно быстро раскалывается на угловатые обломки), повышенными давлениями и числами оборотов, увеличивающими отклоняющее усилие.

В интенсивности искривления скважин при проходке их твердыми сплавами и чугунной дробью наблюдается та же последовательность, что и при разбуривании стенок скважин. При этом по сравнению с твердосплавным бурением интенсивность искривления скважин, буримых чугунной дробью, выше в 1,3—3,1 раза при увеличении действительного диаметра скважин на 10—15 *мм*.

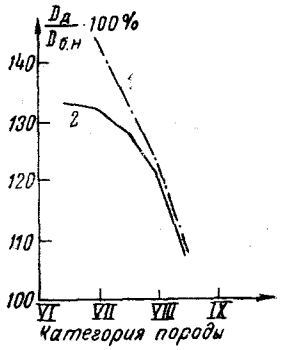


Рис. 6. Кривые разбуривания стенок колонковых скважин при дробовом (*1*) и твердосплавном (*2*) бурении $\left(\frac{D_д}{D_{б.н}} \cdot 100\%\right)$ $D_{б.н} = 110$ *мм*, Н. Тагил

Выводы

1. Породы различного литологического состава, относимые к одной и той же категории по буримости, имеют различную степень разбуривания стенок скважин. При увеличении категорийности пород степень разбуривания последовательно сокращается.

2. Действительное увеличение диаметра колонковой скважины по отношению к номинальному диаметру буровой коронки значительно превышает данные, приводимые в литературе.

3. Причиной разбуривания стенок скважин является отклоняющее усилие, возникающее в результате непрямолинейности буровой колонны и перекоса колонкового снаряда в скважине.

4. В процессе бурения колонковый снаряд вращается вокруг оси скважины.

5. Участки скважин с максимальным разбуриванием стенок сопровождаются понижением процента выхода керна.

6. Твердосплавное бурение имеет меньшую степень разбуривания колонковых скважин и меньшую интенсивность искривления по сравнению с дробовым.

7. Стальная дробь-сечка дает по сравнению с чугунной несколько повышенную степень разбуривания стенок колонковых скважин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воздвиженский Б. И., Васильев М. Г. Буровая механика. Госгеолтехиздат, 1954.

2. Динник А. Н. Статьи по горному делу. Углетехиздат, 1957.

3. Станишевский А. С. Основное направление в конструировании высокопроизводительных колонковых долот. Тр. Всесоюзного совещания нефтяников. Буровые долота. Гостоптехиздат, 1952.

4. Сулакшин С. С. Руководство по измерению искривления скважин. Госгеолтехиздат, 1954.

5. Шибаков М. А. Об истинном диаметре скважин дробового бурения. «Разведка недр», 1935, № 23.