Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCIII, 1982 г.

УДК 622.245.3

О РАЗРАБОТКЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ ДЛЯ БУРЕНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ ПОКРОВОВ АНТАРКТИДЫ

В.М.ПАШКЕВИЧ, В.К.ЧИСТЯКОВ

С увеличением глубин бурения все большее значение приобретают реологические свойства горных пород, слагающих стенки скважины.

В результате разгрузки со стороны скважины, пройденной в напряженном массиве горных пород, образуется зона перераспределения нормальных напряжений. При этом нормальные и касательные напряжения на стенках скважины, обусловленные разностью между боковым давлением в горных породах и гидростатическим давлением в скважине, претерпевают наибольшие изменения. В пределе касательные напряжения на стенке скважины могут в 2 раза превысить величину горного давления [1, 7].

При достижении напряженного состояния горных пород, близкого к пределу текучести, теряется их устойчивость и стенки скважины разрушаются. В породах с явно выраженными реологическими характеристиками (глинистые, галоидные, сернокислые и др.) это проявляется в деформации ползучести, приводящей к сужению стенок скважины вплоть до полного „заплывания" ствола.

Основным методом поддержания устойчивости стенок скважины при бурении является регулирование давления в ней путем подбора плотности промывочной жидкости. При этом необходимо обязательно учитывать влияние самой жидкости на деформирование и разрушение горных пород, слагающих стенки скважины. Для предотвращения возможных осложнений выбранная промывочная жидкость не должна взаимодействовать с горными породами, растворять их или изменять их первоначальные механические свойства.

По степени проявления реологических свойств особое место среди горных пород занимает лед, физико-механические свойства которого в большой мере зависят от его строения, температуры, характера и степени напряженного состояния, времени его проявления.

Как показывает практика проходки скважин в пластичных породах и в ледниковых толщах [2, 8-10], с увеличением глубины бурения резко воз-

растают различного рода осложнения и аварии, связанные с сужением (уменьшением диаметра) скважины, прихватом бурового инструмента, самопроизвольным забуриванием новых стволов при разбуривании суженных интервалов и пр., требующие систематических проработок ствола.

Эффективное решение проблемы обеспечения устойчивости стенок скважины в условиях непрерывно возрастающего горного давления и температуры ледовой толщи заключается в заполнении скважины специальной низкотемпературной жидкостью, гидростатическое давление которой будет противодействовать горному давлению [2, 7].

К промывочной жидкости для бурения скважин в низкотемпературных ледовых толщах с учетом климатических условий и географического положения района работ предъявляются следующие основные требования:

1) плотность жидкости должна легко регулироваться в известных пределах с целью обеспечения необходимого гидростатического давления на стенках скважины;

2) однородность и плотность жидкости не должна изменяться во времени;

3) температура кристаллизации жидкости не должна превышать минимальную температуру в ледовой толще;

4) жидкость должна обладать возможно меньшей вязкостью при низких отрицательных температурах с целью повышения скорости и снижения мощности при производстве спуско-подъемных операций в скважине;

5) жидкость не должна взаимодействовать со льдом, обеспечивая неизменность его прочностных свойств на стенках скважины и высокое качество керна;

6) жидкость должна сравнительно легко и полно разделяться как с водой, так и с ледяным шламом (шугой), обеспечивая эффективный процесс призабойной очистки при тепловом или механическом способах бурения;

7) коррозионное воздействие жидкости на буровой инструмент должно быть минимальным;

8) токсичность жидкости не должна превышать допустимых санитарных норм;

9) жидкость должна состоять из компонентов легкодоступных, недорогих, транспортабельных и легкохранимых.

В ЛПИ разработан состав низкотемпературной заливочной жидкости на основе авиационного топлива ТС-I с утяжелителем, положительные результаты испытания которой при бурении ледовых толщ в условиях Арктики и Антарктики (ледник Вавилова – арх. Северная Земля, станция Восток – Восточная Антарктида) свидетельствуют о соответствии ее вышеизложенным требованиям:

температура кристаллизации не выше -60 °С, что позволяет использовать ее в широком диапазоне температур;

плотность при 20 °С не менее 0,8 г/см^3, легко регулируется в широких пределах путем изменения концентрации утяжелителя;

кинематическая вязкость в диапазоне температур от +20 °С до -40 °С изменяется в пределах I,5–I6 сСт;

слабо взаимодействует со льдом и хорошо разделяется с водой (взаимная растворимость топлива ТС-I и воды при 20 °С составляет в среднем 0,005 %);

не оказывает коррозионного воздействия на детали бурового снаряда и кабель-троса;

компоненты низкотемпературной заливочной жидкости малотоксичны, дешевы и легкодоступны; транспортировка возможна в цистернах и бочках.

При разработке технологии бурения в ледовых толщах большое значение имеет оперативное определение необходимой плотности и высоты столба бурового раствора в скважине, гидростатическое давление которого обеспечивало бы снижение скорости деформации стенок скважины до величины, не допускающей осложнений как в процессе углубки забоя, так и при производстве спуско-подъемных операций, а также геофизических исследований.

В буровой практике для расчета минимальной плотности заливочного раствора, обеспечивающей упругое состояние породы на стенках скважины, широко используется зависимость, выведенная с учетом теории наибольших касательных напряжений [3, 7]:

$$\rho_р = \lambda\rho - \frac{\tau}{gH}, \qquad (I)$$

где $\rho_р$ и ρ – плотность бурового раствора и породы (льда), кг/м^3; λ – коэффициент бокового давления; τ – предел текучести породы при сдвиге, Па; g – ускорение свободного падения (g = 9,8 м/с^2); H – глубина залегания рассматриваемого горизонта, м.

Для льда характеристики λ и τ являются переменными во времени, зависящими от периода релаксации, температуры и степени напряженности льда. Представительность керна льда по λ и τ за время подъема снаряда (~ 40 мин при глубине скважины ~ 1000 м) и определения значений этих параметров резко падает вследствие разгрузки образца льда в колонковой трубе и изменения его температуры. Это обстоятельство делает формулу (I) непригодной для определения плотности бурового раствора при проходке скважин в ледовой толще.

Другой способ расчета необходимой плотности раствора, учитывающий изменение свойств льда во времени с изменением температуры и степени напряженности, основан на теоретической зависимости для определения скорости деформации стенок скважины, пройденной в ледниковой толще [6]:

$$R = R_0 e^{-A\left[\frac{g(\rho-\rho_р)H}{10^6\alpha}\right]^{\alpha} t}, \qquad (2)$$

откуда

$$\rho_р = \rho - \frac{10^6\alpha}{gH}\left(\frac{\ln\frac{R_0}{R}}{At}\right)^{1/\alpha}, \qquad (3)$$

где R_0 и R – начальный и текущий радиусы скважины, м; α и A – параметры, зависящие от температуры и структуры льда (A в МПа$^{-\alpha}\cdot$с$^{-1}$); t – длительность процесса, с.

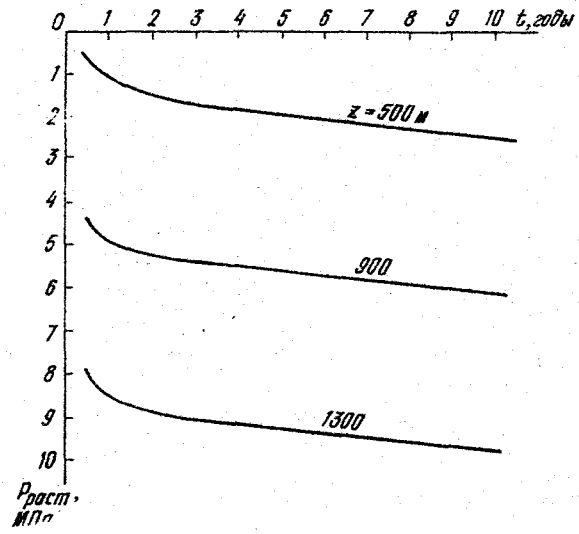


Рис.1. Расчетные кривые необходимых давлений столба бурового раствора в скважине для различных интервалов глубин и длительности выстойки скважины

Анализируя выражение (3) с учетом имеющихся данных о реологических параметрах льда и характере их изменения с глубиной [5, 6], нетрудно убедиться, что его второй член – величина переменная:

для первых сотен метров он соизмерим со средней плотностью массива;

для глубин порядка 1500 м он существенно влияет на величину необходимой плотности бурового раствора;

для горизонтов, близких к ложу, представляет очень малую величину относительно средней плотности льда, слагающего массив,

и для инженерных расчетов при разработке технологии бурения данных горизонтов ледовой толщи можно принять $\rho_р = \rho$.

Незначительное превышение гидростатического давления столба жидкости в скважине над возможным давлением в прослое подледниковых вод должно нормализоваться за счет автоматического снижения высоты столба жидкости в скважине в момент выхода последней из ледниковой толщи. Более сложным представляется вопрос прогнозирования аномально высокого давления подледниковых вод. В случае вскрытия такого пласта избыточное давление может быть компенсировано дополнительным утяжелением бурового раствора или повышением его столба в скважине.

Для условий бурения на станции Восток (Центральная Антарктида) по формуле (3) рассчитаны необходимые давления столба бурового раствора $P_{раст}$ и его плотности $\rho_р$ для отдельных горизонтов ледникового массива при различной длительности выстойки скважины t, $\alpha = 4{,}34$, $A = 4{,}15 \cdot 10^{-2}$ МПа$^{-\alpha}$·год$^{-1}$, обеспечивающих изменение диаметра скважины на величину, не превышающую 1–2 мм.

Результаты расчета сведены в таблицу и приведены на рис.1.

Как видно из расчетных данных, необходимое гидростатическое давление столба жидкости в скважине может быть значительно меньше горного давления при бурении первых сотен и даже тысячи метров.

Результаты проведенного анализа хорошо согласуются с данными экспериментального бурения скважины № 3-Г на станции Восток в 1980 г., график проходки которой изображен на рис.2.

Расчетные значения плотности бурового раствора для условий бурения скважины на станции Восток

Глубина горизонта, м	Расчетное горное давление, МПа	Температура льда, °С	$\frac{\rho_р}{p_{раст}}$ при длительности выстоя скважины t		
			$t = 0,5$	$t = 1,0$	$t = 10,0$
500	4,16	-53,2	$\frac{146}{0,716}$	$\frac{256}{1,26}$	$\frac{4,86}{2,38}$
900	7,75	-49,8	$\frac{486}{4,29}$	$\frac{546}{4,82}$	$\frac{696}{6,14}$
1300	11,35	-45	$\frac{813}{7,82}$	$\frac{855}{8,86}$	$\frac{761}{9,71}$

Как видно из рис.2, процесс бурения вплоть до глубины 1415 м велся с неполной компенсацией расчетного горного давления за счет поддержания верхнего уровня столба залитого раствора ($\rho_р$ = 810 кг/м^2) на отметке ~450 м от поверхности. В процессе бурения скважины периодически контролировалось изменение ее диаметра. Для этого во время спуска бурового снаряда сравнивались диаметры скважины в определенных интервалах глубин.

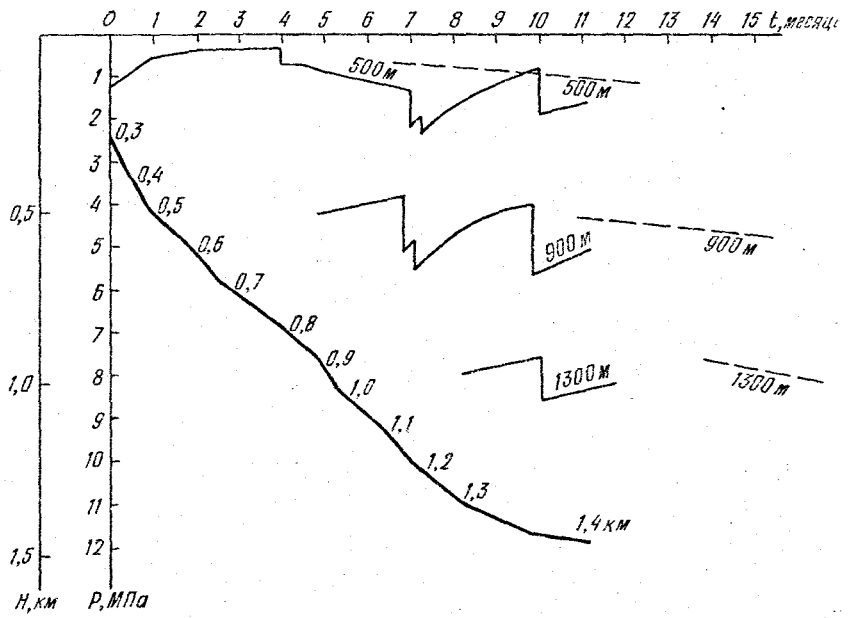


Рис.2. Изменение горного давления на забое, расчетных (пунктирные линии) и фактических (сплошные линии) давлений столба буровой жидкости на отметках 500, 900 и 1300 м в процессе бурения скважины № 8-Г на станции Восток

Изменение скорости спуска регистрировалось по величине напряжения на электроприводе лебедки.

Оперативный контроль за изменением диаметра скважины подтвердил отсутствие сужений ствола скважины в процессе проходки, превышающих 0,5-1 мм, т.е. фактическое давление столба бурового раствора в скважине № 3-Г при бурении близко к расчетному, обеспечивающему степень сужения ствола за указанный период не выше 0,5-1 мм.

Из формулы (3) может быть получено выражение для расчета возможной длительности выстойки скважины при известных значениях $H, \rho, \rho_р$ и заданном соотношении R_0/R:

$$t = \frac{\ln \frac{R_0}{R}}{A\left[\frac{g(\rho - \rho_р)H}{10^6 \alpha}\right]^{\alpha}} . \qquad (4)$$

При высоте столба бурового раствора в скважине $H_{ст}$, меньшей значения H, необходимая плотность раствора может быть определена из выражения

$$\rho_{р.ст} = \frac{\rho_р H}{H_{ст}} . \qquad (5)$$

Результаты теоретического анализа и экспериментальных данных дают основание полагать необходимость дифференцированного подхода к расчету противодавления столба заливочной жидкости в скважине при бурении ледниковых покровов. При расчетах рекомендуется использовать выражения (3)-(5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бергштейн О.Ю., Великосельский М.А., Вугин Р.Б. Совершенствование методов и средств отбора керна в глубоком бурении. М., Недра, 1977.

2. Бобин Н.Е., Степанов Г.К., Слюсарев Н.И. и др. Осложнения и аварии при глубоком бурении-протаивании, их ликвидация и предупреждение. - В кн.: Антарктика, вып. 13, М., Наука, 1974.

3. Еремеев Ю.А. О наружном давлении на обсадные трубы в соляных породах. - В кн.: Нефть и газ. М., изд. МИНХГП, 1972.

4. Кудряшов Б.Б., Чистяков В.К., Бобин Н.Е. Бурение скважин в Антарктиде. М., изд. ОНТИ ВИЭМС, 1977.

5. Савельев Б.А., Ухов С.Б. Пластические свойства льда. - В кн.: Мерзлотные исследования, 1964, вып. IУ.

6. Саламатин А.Н., Чистяков В.К., Дмитриев Д.Н. и др. Теоретический анализ и экспериментальное исследование деформации стенок ствола скважины в ледовом массиве. - В кн.: Антарктика, вып. 20. М., Наука, 1981.

7. Сеид-Рэа М.К., Исмайылов Ш.И., Орман Л.М. Устойчивость стенок скважин. М., Недра, 1981.

8. Стрелец Г.А., Филатов Б.С., Лубан К.З. и др. Пластическое течение магниевых солей в скважинах. – Нефтяное хозяйство, 1968, № 12.

9. P a t e n a u d e R.W., M a r s h a l l E.N., G o w A.J. U.S.Army. Snow, Ice & Permafrost Res. Estab., Jech. Rept., 60, Hanover, N.H., 1959.

10. U e d a T.H., G a r f i e l d D.E. USA TSC. Special Report, 126.