Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVII, вып. 2, 1969 г.

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ВЫХОДА И КАЧЕСТВА КЕРНА В МЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

Б. Б. Кудряшов, В. И. Коваленко, В. К. Чистяков, И. А. Баскилович, П. М. Степанов

Важнейшей задачей разведочного колонкового бурения является обеспечение высокого выхода и качества керна — исходного материала для геологического и инженерно-геологического опробования.

Анализ производственных данных ряда организаций, занимающихся бурением в многолетнемерзлых породах [2], показывает, что при бурении с промывкой выход керна по скважине составляет 60—70% для коренных пород с влажностью 2—5% и 20—30% в породах с влажностью 15% и более. В производственных условиях очень часто в целях повышения выхода керна переходят на бурение „всухую". При этом, однако, резко ухудшается качество керна. Происходит частичное или полное его растепление (протаивание) с нарушением структурных характеристик.

Высокий выход керна с ненарушенными геокриологическими и структурными особенностями возможен только при сохранении в процессе бурения естественного мерзлого состояния пород путем регулирования температуры циркулирующего агента-теплоносителя. Особое значение приобретает учет закономерностей изменения температуры в различных точках циркуляционной системы скважины и теплофизических свойств самого промывочного агента. Специфическим условиям бурения по многолетнемерзлым породам в качестве промывочного агента, как нельзя лучше, соответствует сжатый воздух [2] (с учетом возможности его искусственного охлаждения до отрицательных температур [1, 2]).

На основе аналитических зависимостей, описывающих температурный режим скважины, бурящейся в мерзлых породах [4, 5], можно определить необходимое охлаждение воздуха, при котором достигается сохранение естественного агрегатного состояния керна.

Для предупреждения растепления (протаивания) керна необходимо и достаточно соблюдение следующего условия

$$t_{1к} < 0°C, \qquad (1)$$

т. е. температура воздуха в призабойной зоне нисходящего потока, омывающего керн, должна оставаться в пределах отрицательных зна-

чений. На величину этой температуры оказывает влияние тепло, генерируемое на забое за счет механической работы коронки.

В отличие от рассмотренного в работах [1, 3, 4] вопроса о потребной температуре подаваемого в скважину сжатого воздуха для предупреждения протаивания мерзлых пород, слагающих стенки скважины, можно аналогичным путем решить задачу о максимально допустимой температуре подаваемого в скважину воздуха по крайней мере в целях сохранения естественного мерзлого состояния керна, что в большинстве случаев совершенно необходимо. Воспользуемся для этого аналитическим выражением распределения температуры воздуха в нисходящем потоке [3, 4]. Приняв $h=H$, $t_{1к}=0°C$ и разрешив это выражение относительно $t_{1н}$, после ряда преобразований и упрощений с учетом условия (1) получим

$$t_{1н} < t_п (1-e^{-r_2 H}) - \frac{k\pi}{Gc_p} \frac{\Delta t_з}{r_1} e^{-r_2 H}, \qquad (2)$$

где $t_{1н}$—начальная температура циркуляционного агента, °С; $t_п$—средняя температура мерзлых пород, °С; H—глубина скважины, *м*; r_1, r_2—корни характеристического уравнения r_1, $r_2 = \frac{\pi}{Gc_p}\left(\frac{k_т D}{2} \pm \right.$ $\left. \pm \sqrt{\frac{k_т^2 D^2}{4} + k_т k D}\right)$, в котором k—коэффициент теплопередачи через стенку трубы, *ккал/м·ч·°С*, G—весовой расход циркуляционного агента, *кг/ч*; c_p—удельная весовая теплоемкость циркуляционного агента при постоянном давлении, *ккал/кг·°С*; $k_т$—коэффициент нестационарного теплообмена, *ккал/м²·ч·°С*; D—диаметр скважины, *м*; $\Delta t_з$—приращение температуры в зоне забоя, °С.

Выражение (2) позволяет определить предельно допустимую температуру подаваемого в скважину воздуха, при которой будет сохраняться естественное агрегатное состояние керна.

Анализ выражения (2) показывает, что на температурный режим и состояние керна наибольшее влияние оказывает местный прирост температуры воздуха на забое $\Delta t_з$

$$\Delta t_з = 860 \frac{N}{Gc_p}, \qquad (3)$$

где N—прилагаемая к забою мощность, *квт*.

Как следует из формулы (3), благоприятные условия для повышения выхода керна и его качества могут быть созданы за счет снижения режимных параметров бурения, т. е. прилагаемой к забою мощности N, и за счет увеличения расхода воздуха G. Однако первый из указанных путей ведет к снижению производительности бурения, а второй — к удорожанию работ за счет увеличения эксплуатационных расходов. Поэтому основным и наиболее эффективным средством повышения выхода и качества керна следует считать охлаждение подаваемого в скважину воздуха.

Для проверки общих теоретических предпосылок были проведены экспериментальные исследования в лабораторных и полевых условиях.

Лабораторные эксперименты проводились на стендах отдела экспериментальных исследований ЦНИГРИ и кафедры технологии и техники бурения скважин ЛГИ одновременно с изучением общих вопросов технологии бурения с продувкой охлажденным воздухом. Исследовалось

влияние режимных параметров бурения, температуры мерзлых пород и воздуха на выход керна и его качество.

Искусственные блоки мерзлых пород изготовлялись зимой путем естественного промораживания исходной смеси в металлических емкостях размерами 0,5×0,5×1,0 *м*. Гранулометрический состав блоков соответствовал рыхлым отложениям россыпных месторождений Северо-Востока СССР. Льдистость образцов обеспечивалась в пределах 5—10 и 20—25%, температура колебалась в пределах от 0° до —12° С.

Для определения температуры искусственной породы в каждом блоке были размещены 4 термосопротивления ММТ-4 в 100—200 *мм* от оси блока на высоте 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 *м* от основания. Температура определялась как среднеарифметическая величина из показаний этих термосопротивлений.

Принятые при опытах режимы бурения выбраны по данным практики [2] и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Тип коронки	Диаметр коронки, *мм*	Осевая нагрузка, *кГ*	Число об. в мин.
КР-1	152 и 132	300—400	80/120
КР-2	152 и 132	600—900	80/120
КР-178	178	800—1000	50/100

Расход сжатого воздуха поддерживался постоянным и составлял 4,5 *м*³/*мин*. Температура сжатого воздуха при каждом отдельном опыте принималась постоянной в пределах значений от +10° С до —20° С (через каждые 5° С). Охлаждение сжатого воздуха осуществлялось с помощью комбинированной холодильной установки, описанной в работе [1].

Бурение производилось на глубину 1 *м* рейсами по 0,2 *м*. Каждый отдельный опыт (рейс) повторялся не менее 3 раз. Всего пробурено по блокам 54,9 *пог.м*. Данные по выходу керна в зависимости от температуры подаваемого сжатого воздуха, температуры и льдистости мерзлых пород приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Льдистость пород, %	Показатели	Температура воздуха, подаваемого в скважину, °С			
		от 0 до —5	от —5 до —10	от —10 до —15	от —15 до —20
20—25	Число наблюдений	40	20	22	19
	Среднее значение выхода керна, %	79,4	85,2	98,8	98,3
	Среднее квадратичное отклонение	18,09	17,4	2,07	2,27
	Стандартная ошибка	2,894	3,991	0,452	0,534
	Точность среднего значения с 95%-ной надежностью	5,854	8,353	0,940	1,122
5—10	Число наблюдений	39	40	24	22
	Среднее значение выхода керна, %	69,9	72,4	78,3	83,5
	Среднее квадратичное отклонение	10,67	13,4	9,35	4,73
	Стандартная ошибка	1,732	2,306	1,968	1,033
	Точность среднего значения с 95%-ной надежностью	3,507	4,667	4,078	2,149

Таблица 3

Льдистость пород, %	Показатели	Температура мерзлых пород, °С				
		от 0 до —3	от —3 до —6	от —6 до —9	от —9 до —12	ниже 12
20—25	Число наблюдений	30	44	20	18	18
	Среднее значение выхода керна, %	67,9	94,4	98,8	98,9	97,3
	Среднее квадратичное отклонение	16,00	3,78	2,76	1,97	1,98
	Стандартная ошибка	2,947	0,534	0,633	0,485	0,481
	Точность среднего значения с 95%-ной надежностью	6,024	1,078	1,325	1,026	1,015
5—10	Число наблюдений	68	24	19	11	23
	Среднее значение выхода керна, %	67,2	72,1	72,3	81,6	91,6
	Среднее квадратичное отклонение	8,28	8,22	0,06	1,46	5,4
	Стандартная ошибка	1,008	1,730	0,014	0,426	1,087
	Точность среднего значения с 95%-ной надежностью	2,018	3,584	0,029	1,029	2,254

Анализируя данные табл. 2 и 3, необходимо отметить, что влияние температуры сжатого воздуха и мерзлых пород на выход керна выражено весьма четко. При прочих равных условиях выход керна в породах с льдистостью 20—25% на 19,5—26% выше, чем для пород с льдистостью 5—10%. Это можно объяснить различиями в прочностных характеристиках мерзлотной структуры керна.

При высокой льдистости породы и подаче в скважину воздуха с отрицательной температурой керн получается в виде монолитного столбика, при малой льдистости — в виде отдельных кусков. Извлеченный из скважины керн после растепления в атмосфере с положительной температурой полностью разрушается. При подаче в скважину воздуха с положительной температурой уже в процессе бурения происходит поверхностное растепление керна.

Опытами в лабораторных условиях установлено, что температура подаваемого в скважину воздуха не должна быть выше температуры проходимых мерзлых пород. Для полной сохранности керна целесообразно снижать температуру нагнетаемого в скважину воздуха на 3—5° С относительно естественной температуры пород и тем больше, чем ниже льдистость породы и выше содержание в ней глинистого материала. Эти данные вполне согласуются с результатами расчетов, предварительно проведенных с помощью аналитической зависимости (2).

Разрабатываемый способ получения керна мерзлых пород с ненарушенной криогенной структурой испытывался в 1966—1968 гг. в процессе полевых работ в Санга-Талонской ГРП СВГУ, в Магаданской и Мяунджинской полевых партиях проектного института «Дальстройпроект» одновременно с отработкой вопросов технологии бурения с продувкой охлажденным воздухом. Экспериментальные работы проводились с использованием серийного бурового и компрессорного оборудования (ЗИФ-650А; СБУД — ЗИВ-150; ДК-9; ЗИФ-51; ЗИФ-55). Бурение велось до максимальной глубины 40 *м* по мерзлым породам с температурой от 0 до —8,5° С твердосплавными коронками диаметрами от 112 до 178 *мм*. Расходы воздуха составляли от 3,0 до 9,0 $м^3/мин$. Сжатый воздух охлаждался комбинированным способом с использованием пневмодвигателя ДР-5У, работавшего в режиме детандера [1]. Темпе-

ратура охлажденного воздуха при разных опытах поддерживалась в пределах от 0° до —25° С. Ряд рейсов бурения проведен в опытном порядке с положительными температурами воздуха, а также вообще без продувки («всухую»).

В процессе полевых исследований пройдено 286,2 *пог.м*, в том числе 214,7 *пог.м* с продувкой воздухом, охлажденным до отрицательных температур.

Данные по метражу бурения с охлажденным воздухом, рейсовой проходке и выходу керна сведены в табл. 4.

Таблица 4

Проходимые породы	Общий объем бурения, *пог. м*	Средняя проходка на рейс, *м*	Выход керна, %
Мерзлый песок с гравием и галькой	36,8	0,81	83,9
Илистый песок с прослойками льда	1,8	0,60	100
Супесь со щебнем и дресвой, льдистая	21,0	1,37	100
Сланцы песчано-глинистые, сильно трещиноватые . . .	17,07	1,16	32,0
Выветрелые гранодиориты с прослойками льда	33	1,00	100
Выветрелые гидротермально-измененные андезиты с прослойками льда	59,0	1,3	100
Андезиты слаботрещиноватые	46,0	0,6	85

Во всех случаях бурения по рыхлым мерзлым породам, сцементированным льдом, при условии нерастепления последнего, выход керна составлял практически 100%. Снижение выхода керна в отдельных случаях до 50% наблюдалось в малольдистых несвязных породах — «сушенцах». Недостаточный выход керна имел место также в трещиноватых коренных породах при отсутствии цементирующего льда, как это обычно бывает при бурении с продувкой в трещиноватых породах.

В льдистых мерзлых породах как на выход керна, так и особенно на его состояние, целостность структуры наибольшее влияние оказывал температурный фактор. При бурении «всухую» выход керна в ряде случаев также достигал 100%, но за счет большого количества выделяющегося на забое тепла керн разрушался, и в извлеченных образцах обычно не сохранялось никаких признаков мерзлоты.

Если с точки зрения минералогического состава протаявший и даже высушенный в процессе бурения «всухую» (см. рисунок) керн может служить в качестве представительного образца, то при инженерно-геологических изысканиях, направленных на изучение несущей способности грунтов и пород, такой керн совершенно бесполезен, так как по нему невозможно определить не только структуру, механическую прочность, но даже объемный вес и влажность.

Может возникнуть вопрос, не будет ли применение охлажденного воздуха искажать реальные физико-механические свойства мерзлых пород за счет их дополнительного промораживания. Элементарный расчет показывает, что в силу малой теплопроводности породы и дости-

гаемого на забое практически нулевого температурного баланса эти опасения излишни.



Образцы керна мерзлых пород
а—при бурении с продувкой охлажденным воздухом; *б*—при бурении „всухую"

Таблица 5

Интервал опробования, *м*	Породы	Влажность, %			Объемный вес, *г/см*³		
		Скв. 535а	Скв. 535	Расхождение	Скв. 535а	Скв. 535	Расхождение
3,5—4,0	Сильно выветрелые трещиноватые андезиты, трещины заполнены льдом и продуктами выветривания	41,7	5,6	+36,1	1,77	2,34	—0,57
4,5—5,0		12,2	10,9	+ 1,3	2,28	2,33	—0,05
5,5—6,0		5,8	3,5	+ 2,3	2,38	2,39	—0,01
6,5—7,0		10,1	4,9	+ 5,2	2,24	2,19	+0,05
7,5—8,0		15,6	15,4	+ 0,2	2,17	2,00	+0,17
11,5—12,0	Андезиты слаботрещиноватые с тонкими прослойками льда	7,6	4,3	+ 3,3	2,46	2,40	+0,06
15,5—16,00		8,7	3,9	+ 4,8	2,42	2,36	+0,06
16,5—17,00		5,7	1,8	+ 3,9	2,39	2,40	—0,01

В табл. 5 сравниваются результаты определения влажности и объемного веса пород по кернам, полученным при бурении «всухую» (скв. 535) и с продувкой охлажденным воздухом (скв. 535а) в Мяунд-

жинской полевой партии «Дальстройпроекта». Расстояние между скважинами 0,5 *м*. Охлажденный воздух подавался в скважину с температурой $-10 \div -15°$ С, а выходил из устья, имея температуру $-2 \div -5°$ С, благодаря чему выход керна был полным, с сохранением естественного мерзлого состояния и структуры, тогда как при бурении «всухую» образцы извлекались в талом и сильно разрушенном состоянии. Полученные по скв. 535а данные полностью совпали с результатами определений по контрольному шурфу, пройденному в непосредственной близости.

Результаты полевых исследований продемонстрировали высокую эффективность разрабатываемого способа повышения качества опробования при разведочных буровых работах и особенно при инженерно-геологических изысканиях в районах распространения многолетней мерзлоты.

Выводы

1. Основным условием обеспечения высокого выхода и качества керна при бурении в мерзлых породах является сохранение его естественного агрегатного состояния.

2. Применение продувки охлажденным воздухом при колонковом бурении позволяет за счет нейтрализации выделяющегося на забое тепла устранить протаивание керна и обеспечить сохранность его структуры и криологических особенностей.

3. Имеющиеся аналитические зависимости [4, 3] правильно отражают теплообменные процессы в скважине и ее призабойной зоне и могут быть использованы при оценке требований к охлаждению сжатого воздуха.

4. Разрабатываемый способ повышения качества опробования при бурении в мерзлых породах проверен в лабораторных и полевых условиях, является, безусловно, перспективным и требует практического внедрения, прежде всего, при инженерно-геологических изысканиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баскилович И. А., Кудряшов Б. Б., Степанов П. М. К возможности бурения скважин вращательным способом с очисткой забоя охлажденным сжатым воздухом на россыпных месторождениях золота. Тр. ЦНИГРИ, сб. 69, М., 1967.

2. Елманов И. П. Бурение геологоразведочных скважин с продувкой воздухом в многолетнемерзлых породах. Недра, 1965.

3. Кудряшов Б. Б. Нормализация температурного режима скважин при бурении по многолетнемерзлым породам с очисткой забоя воздухом. Настоящий сборник.

4. Кудряшов Б. Б., Кирсанов А. И., Степанов П. М. Тепловой режим скважины при бурении с очисткой забоя воздухом по многолетнемерзлым породам. В сб. «Теория и практика бурения скважины с очисткой забоя воздухом». ВНИИОЭНГ, М., 1967.