*Записки Ленинградского ордена Ленина
и ордена Трудового Красного Знамени горного института
им. Г. В. Плеханова, т. LXVI, вып. 1, 1973 г.*

О ПРИМЕНЕНИИ КОЛОНКОВОГО БУРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ АНТАРКТИДЫ

Н. Д. Михайлова

Одна из первоочередных задач в Антарктиде — изучение льда, покрывающего материк. В статье приводятся некоторые соображения о возможности применять в условиях Антарктиды при колонковом бурении транспортабельное оборудование, требующее относительно небольших энергетических затрат. Механическое разрушение льда предполагается осуществлять с помощью коронки специальной конструкции, армированной приостренными резцами из твердого сплава. Образующийся при разрушении льда шлам будет выноситься из-под торца коронки потоком очистного агента, в качестве которого могут быть использованы воздух, керосин или парафинное дизельное топливо.

Рассмотрим вопрос о возможной скорости бурения и затратах мощности при работе специальной коронки. Поскольку нет достаточных данных о работе коронок при механическом разрушении льда, применим аналитический метод проектирования режима бурения, определения начальной скорости бурения и затрат мощности.

Наибольшая скорость бурения может быть достигнута при работе коронки в области объемного разрушения породы, т. е. при условии

$$p_0 = \sigma F_0, \tag{1}$$

где p_0 — нагрузка на резец; σ — критическое сопротивление льда разрушению при внедрении резца в забой; F_0 — опорная поверхность резца.

Под воздействием силы p_0 резец внедрится в забой на какую-то величину h_0, которую, в соответствии с исследованиями профессоров Э. Ф. Эпштейна и Л. А. Шрейнера, можно определить из выражения

$$h_0 = \frac{p_0}{ap \operatorname{tg} \alpha b}, \tag{2}$$

где p — твердость породы на раздавливание; α — угол заострения резца; b — ширина резца; a — отношение части резца, находящейся в непосредственном контакте с породой, к полной глубине внедрения h_0 (для условий хрупкого разрушения льда коэффициент $a \approx 0{,}5$).

Рассматривая это выражение для случая бурения по льду, примем вместо значения твердости на раздавливание (величина, неизвестная для льда Антарктиды) значение прочности льда при сжатии. При этом

воспользуемся полученной Генки [5] аналитической зависимостью между этими величинами:

$$p=(1+2\pi)\,\sigma_{сж} \text{ или } p=7{,}28\,\sigma_{сж}\,. \qquad (3)$$

По данным Э. Ф. Эпштейна, прочность породы при внедрении резца в 10—12 раз больше прочности породы при одноосном сжатии. Учитывая это, принимаем для наших расчетов $p=10\sigma_{сж}$, что близко к среднему значению.

Подставляя в формулу (2) принятые величины и полагая $\operatorname{tg}\alpha = 1$, т. е. принимая угол приострения резца равным 45°, получим

$$h_0=\frac{p_0}{5\,\sigma_{сж}\,(R-r)}\,, \qquad (4)$$

где R, r — наружный и внутренний радиусы коронки, причем $b=R-r$.

Зная величину h_0 можно определить значение начальной скорости проходки, т. е. скорости проходки без влияния на нее затупления резцов

$$v_0=h_0\,mn, \qquad (5)$$

где m — число резцов в коронке; n — скорость вращения коронки, *об/мин.*

Подставив в формулу (5) выражение для h_0 и обозначив $p_0 m$ через общую нагрузку на коронку P, получим

$$v_0=\frac{0{,}012\,Pn}{\sigma_{сж}\,(R-r)}\,,\ м/ч. \qquad (6)$$

Поскольку в процессе работы коронки резцы изнашиваются, скорость проходки будет снижаться. За окончание эффективной работы коронки принимают момент, когда начальная скорость бурения снижается вдвое. Таким образом, скорость бурения по льду находится в пределах

$$V_0-V/2.$$

Произведем расчет примерной начальной скорости бурения по льду Антарктиды, принимая скорость вращения $n=130$ *об/мин*, $R=151$ *мм*; $r=116$ *мм*; $p=30\div 100$ *кг* на один резец и, по данным И. С. Песчанского [3], максимальное для льда значение $\sigma_{сж}=140$ *кг/см*^{2}. В результате расчетов получим значения скоростей бурения при различной общей нагрузке на коронку:

P, *кг*	300	400	500	600	700	800
V_0, *м/ч*	4,65	6,20	7,83	9,45	10,8	12,4
$V_0\,2$, *м/ч*	2,32	3,10	3,91	4,72	5,4	6,2

Расчетные значения скорости бурения весьма близки к опытным данным, полученным американцами при бурении глубокой скважины на станции Берд в 1967/68 г. При бурении значения скорости бурения могут оказаться меньше за счет большей прочности льда. Однако скорость проходки можно увеличить, повышая нагрузку на коронку и скорость ее вращения.

По формуле

$$W=2{,}03\cdot 10^{-7}\,PDn,\ квт$$

(D — диаметр коронки, *мм*), предложенной в работах [2, 5], рассчитывается требуемая на забое мощность при механическом бурении — резании льда специальной коронкой:

P, *кг*	300	400	500	600	700	800
W, *квт*	1,20	1,61	2,01	2,41	2,82	3,17

Произведенный расчет показывает: энергоемкость механического бурения в 4—5 раз меньше энергоемкости бурения протаиванием льда при работе тепловыми снарядами [2]. Это, в первую очередь, объясняется очень высокой скрытой теплотой плавления льда.

Рассмотрим возможность применения существующего колонкового бурового оборудования для бурения скважины по льдам и подледниковым породам Антарктиды. Из имеющегося парка буровых агрегатов колонкового бурения на большие глубины рассчитаны ЗИФ-1200А и ЗИФ-1200МР. Наиболее приемлемым для условий Антарктиды, с нашей точки зрения, следует считать буровой агрегат ЗИФ-1200А, который имеет меньший вес по сравнению с ЗИФ-1200МР и больше отвечает требованиям твердосплавного бурения.

Предельную глубину бурения определяем исходя из прочности бурильных труб и грузоподъемности лебедки (мощности станка). Для этого зададимся следующими условиями.

1. Бурение скважины будет осуществляться с применением продувки охлажденным воздухом. Указанный метод разрабатывается в течение ряда последних лет на кафедре техники и технологии бурения скважин ЛГИ применительно к условиям бурения по многолетнемерзлым породам. Обладая всеми общеизвестными преимуществами использования газообразных агентов вместо промывочных жидкостей для очистки забоя при бурении, этот метод выгодно отличается тем, что предупреждает растепление (протаивание) слагающих стенки скважины мерзлых пород или льда с потерей их связности и устойчивости. За счет холода, который подводится к забою потоком охлажденного воздуха, нейтрализуется тепло, генерируемое на забое при механической работе коронки или долота; тем самым предупреждается образование сальников, прихват снаряда и другие осложнения и, благодаря сохранению монолитности мерзлого керна, обеспечивается его выход $\sim 100\%$.

Для искусственного охлаждения сжатого воздуха, выходящего из компрессора с температурой 70—80°С, используются различные методы. В условиях Антарктиды наиболее экономичное охлаждение сжатого воздуха возможно за счет теплообмена с окружающим атмосферным воздухом с помощью простейшего холодильника, например, радиаторного типа.

2. При бурении предполагается использовать бурильные трубы диаметром 63,5 *мм* (для снижения потерь давления при глубоком бурении с продувкой сжатым воздухом) из стали 36Г2С и легкосплавные бурильные трубы (ЛБТ).

Глубина бурения принятыми бурильными трубами ограничивается их прочностью и грузоподъемностью лебедки бурового станка. Прочность бурильных труб может быть проверена по величине допускаемых напряжений, возникающих при подъеме (максимальные растягивающие напряжения) и в процессе бурения (суммарные напряжения растяжения, сжатия, кручения, изгиба и др.). Задаваясь допускаемым напряжением на растяжение

$$[\sigma]=\frac{\sigma_т}{1,6}=\frac{5000}{1,6}=3100,\ кг/см^2, \qquad (8)$$

определим допускаемую длину колонны бурильных труб

$$L = \frac{[\sigma] F}{q}, \ м, \tag{9}$$

где F — площадь сечения бурильной трубы, $см^2$; q — вес 1 $м$ колонны бурильных труб, $кг/м$.

Подставив исходные данные для труб ∅ 63,5 $мм$ с $\delta = 6$ $мм$ из стали 36Г2С в формулу (9), получим предельную длину колонны

$$L_{макс} = \frac{3100 \cdot 10{,}8}{10{,}05} \cong 3300 \ м. \tag{10}$$

Проверять прочность труб при бурении и определять, исходя из этого, предельную глубину бурения следует для условий работы труб в верхнем и нижнем сечении колонны. Для верхнего сечения условие прочности труб определяется выражением

$$\sqrt{\sigma_р^2 + 4\tau^2} \leqslant [\sigma], \tag{11}$$

где $\sigma_р$ — напряжение растяжения; τ — касательные напряжения, возникающие при кручении колонны.

Для нижней части колонны, где преобладающее значение имеют переменные нагрузки, коэффициент запаса прочности определяется исходя из учета совместного действия напряжений сжатия, изгиба и кручения. Для колонкового бурения, особенно при невысоких значениях скорости вращения снаряда, напряжения в нижней части колонны бурильных труб намного меньше допускаемых, поэтому проверочный расчет произведен по верхнему сечению труб. Принимая, что значения τ достигают предельно допустимых для данной стали, получим на основании расчета по формуле (11) предельно допустимую глубину бурения выбранными бурильными трубами $L_{макс} \cong 3150$ $м$.

Таким образом, исходя из прочности стальных бурильных труб при бурении, предельной глубиной их работы следует считать 3000 $м$.

Для определения допустимой глубины бурения из условия грузоподъемности лебедки бурового станка зададимся следующими исходными данными: оснастка талевой системы 2×3, талевой блок БИ-249-138 (вес 238 $кг$), кронблок БИ-249-142 (вес 300 $кг$), буровой агрегат ЗИФ-1200А с электродвигателем. Исходя из соотношения (6), мощность, расходуемая при подъеме снаряда,

$$N_п = N_л + N_т + N_{п.и}, \tag{12}$$

где $N_л$ и $N_т$ — мощность, расходуемая соответственно на привод барабана лебедки и на преодоление сопротивлений в талевой системе; $N_{п.и}$ — мощность на подъем инструмента.

Отсюда находим, что на первой скорости работы лебедки может быть поднята колонна бурильных труб ∅ 63,5 $мм$ длиной 1940 $м$. Таким образом, предельная глубина бурения стальными трубами ограничивается в первую очередь грузоподъемностью лебедки бурового агрегата ЗИФ-1200А.

В случае использования для бурения глубокой скважины легкосплавных бурильных труб ∅ 75 $мм$ с толщиной стенки $\delta = 5$ $мм$ из сплава Д6Т с $[\sigma] = 720 \div 770$ $кг/см^2$, $[\tau] = 500 \div 540$ $кг/см^2$, $\gamma = 2{,}9$ $т/м^3$ и $q = 2{,}86$ $кг$ [4], получим предельную длину колонны, исходя из прочности на растяжение, равной $L_{макс} \cong 2660$ $м$. Предельная длина колонны ЛБТ, рассчитанная из условия прочности труб при бурении, близка к

этому же значению. Грузоподъемность лебедки и станка ЗИФ-1200А позволяет поднимать колонну ЛБТ длиной до 5000 *м*.

Исходя из приведенных расчетов, предполагается возможным для глубокого колонкового бурения в условиях Антарктиды использовать комбинированные колонны бурильных труб, составленных из стальных труб в верхней и нижней частях и легкосплавных в средней части колонны. При бурении скважины до глубины 2000 *м* можно использовать стальные бурильные трубы из стали 36Г2С диаметром 63,5 *мм* с $\delta = 6$ *мм*.

Компрессор для продувки скважины выбирается на основании аэродинамического расчета по принятой методике [5] для следующих исходных данных: глубина бурения $L=2000$ *м*, бурильные трубы ∅ 63,5 *мм* с $\delta=6$ *мм*; диаметр скважины 115 *мм* (с учетом разбурки при твердосплавной колонне ∅ 112 *мм*); объемный вес материкового льда $\gamma=0{,}720 \div 0{,}930$ *т/м*^{3} [3]. Расчет показывает, что необходимая для выноса шлама льда скорость восходящего потока воздуха $V=5$ *м/сек* обеспечивается при расходе воздуха $Q=3{,}2$ *нм*^{3}*/мин* и давлении $p=4$ *атм*. Таким требованиям удовлетворяют компрессор ЗИФ-51 производительностью 4,65 *нм*^{3}*/мин* при давлении 7 *атм* либо компрессор ЗИФ-55 производительностью 5 *нм*^{3}*/мин* при давлении 7 *атм*.

Конструкция скважины выбирается, как известно, на основании данных предварительного геологического разреза, заданной глубины и конечного диаметра. В нашем случае для проектирования глубокой разведочной скважины в Антарктиде мы располагаем данными о желаемом конечном диаметре керна (80 *мм*) и необходимой глубиной 2000—4000 *м*. Из расчетов следует, что при использовании современного колонкового бурения реально еще трудно ставить задачу бурения скважины на глубину 2000 *м* и говорить конкретно о бурении колонковым способом скважины на 4000 *м*.

При составлении конструкции скважины следует обратить внимание на выбор конечного диаметра бурения, величина которого, как известно, ограничивается, с одной стороны, мощностью бурового агрегата, с другой — прочностью бурильных труб при срыве керна.

В условиях бурения скважины по льду мощность бурового станка расходуется в основном на разрушение льда, поскольку мощность на холостое вращение колонны бурильных труб при отсутствии промывочной жидкости и малом коэффициенте трения по льду составит, по-видимому, незначительную величину. Затрачиваемая на разрушение льда мощность составляет ~3—4 *квт*, и, следовательно, при мощности двигателя станка ЗИФ-1200А, равной 40 *квт*, практически не возникает никаких ограничений глубины и конечного диаметра бурения (∅ 112 *мм*).

Для проверки прочности бурильных труб при срыве керна заданного диаметра воспользуемся соотношением

$$\tau = \frac{D_к^3 \tau_{ск} d}{d^4 - d_1^4} \leqslant [\tau], \qquad (12)$$

где $D_к$ — диаметр керна; $\tau_{ск}$ — прочность льда при скалывании; d, d_1 — наружный и внутренний диаметры бурильных труб; $[\tau]$ — допускаемое напряжение при кручении.

Принимаем $\tau_{ск} = \frac{1}{10}\sigma_{сж}$, что составит для льда ~14 *кг/см*^{2}, а для подледниковых пород типа гнейса $\tau_{ск} \simeq 170$ *кг/см*^{2} [1].

Поскольку прочность льда при скалывании мала, расчет произведен для подледниковой породы типа гнейсов. В этом случае бурильные трубы ∅63,5 *мм* из стали 36Г2С обеспечивают срыв керна диаметром примерно 99 *мм*, что достаточно при принятом конечном диаметре бурения 112 *мм*. Что касается бурильных труб из сплава Д6Т, то для труб ∅75 *мм* предельный диаметр керна составляет 80 *мм*, тогда возможный диаметр бурения будет 93 *мм*. Таким образом, используя выбранный буровой инструмент и оборудование, можно бурить колонковым способом скважины диаметром 93 и 112 *мм* до глубины 2000 *м*.

Конструкция таких скважин может быть достаточно простой. Устье скважины и верхняя ее часть укрепляется обсадными трубами до глубины 100—200 *м*. Диаметр обсадных труб следует принять равным 127 или 146 *мм*. Глубже бурение можно вести без обсадки диаметрами 112 или 93 *мм* до проектной глубины.

Наиболее сложным элементом организации колонкового механического бурения в Антарктиде является доставка тяжелого бурового оборудования, вес которого при выбранных буровом агрегате, бурильных и обсадных трубах и других оборудовании и материалах может составить 50—60 *т*. Но при этом следует учесть, что поскольку буровое оборудование и инструмент будут завозиться по мере углубления скважины, вопрос их доставки в Антарктиду значительно упрощается.

Таким образом, уже сейчас можно осуществить глубокое колонковое бурение в условиях Антарктиды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков С. А., Волков А. С. Справочник по разведочному бурению. М., Госгеолтехиздат, 1963.

2. Кудряшов Б. Б. и др. Исследование вопросов технологии разведочного бурения по льдам и подледниковым породам Антарктиды. — В кб. рефератов по законченным в 1968 г. научно-исследовательским работам. Изд. Ленингр. горн. ин-та, 1970.

3. Песчанский И. С. Ледоведение и ледотехника. Л., Учпедгиз, 1967.

4. Практические расчеты в бурении. Под общ. ред. В. С. Федорова и В. Г. Беликова. М., «Недра», 1966.

5. Шамшев Ф. А. и др. Технология и техника разведочного бурения. М., «Недра», 1966.