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

НОРМАЛИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СКВАЖИН ПРИ БУРЕНИИ ПО МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫМ ПОРОДАМ С ОЧИСТКОЙ ЗАБОЯ ВОЗДУХОМ

Б. Б. Кудряшов

На площади около 49,7% территории СССР распространена многолетняя мерзлота. Бурение скважин в мерзлых породах связано с рядом специфических трудностей.

Слабосвязные рыхлые четвертичные отложения, а также разрушенные коренные породы, сцементированные в мерзлом состоянии льдом, весьма чувствительны к нарушению их температурного состояния. При оттаивании льда такие породы теряют связность и устойчивость, могут приобретать текучесть. Любые мерзлые породы, в том числе монолитные и устойчивые скальные, являются аккумуляторами громадных запасов холода, что также существенно осложняет процессы проведения скважин.

При бурении по многолетнемерзлым породам типичны две группы осложнений.

1. Осложнения, вызываемые растеплением (протаиванием) сцементированных льдом мерзлых пород и потерей их связности под влиянием тепла, вносимого в скважину циркулирующим промывочным агентом, а также выделяющегося в процессе механического разрушения породы забоя. Эти осложнения выражаются в просадочности, сползании, обвалах породы, слагающей стенки скважины, прихватах инструмента и обсадных труб, самопроизвольном опускании последних, в снижении выхода керна и пр.

2. Осложнения, вызываемые замерзанием циркулирующей в скважине промывочной среды вследствие теплообмена с окружающими мерзлыми породами. Осложнения выражаются, например, при промывке, в образовании „шуги", в затяжках и прихватах инструмента при его извлечении или в полном замерзании промывочной среды как в кольцевом пространстве, так и в бурильных трубах.

Главной причиной осложнений при бурении в мерзлых породах является нарушение нормального температурного режима скважины, при котором интенсивность теплообменных процессов между мерзлыми породами и циркулирующей средой остается в допустимых пределах, не вызывающих изменения их фазового состояния.

В борьбе с осложнениями недопустим односторонний подход. Необходимо постоянно учитывать тепловое взаимодействие промывоч-

ной среды и мерзлых пород. Примером неверного подхода являются известные в практике попытки применять нагретую воду или глинистый раствор в целях борьбы с их замерзанием. При бурении по рыхлым породам, сцементированным льдом, это ведет к их протаиванию, обвалам, тяжелым осложнениям и авариям. Значительно надежнее применение солевых растворов, но и в этом случае необходимо поддерживать температуру растворов в должных пределах [9].

Возможность искусственного регулирования температурного фактора при бурении во многом зависит от свойств применяемой промывочной среды. Развивающееся применение сжатого воздуха вместо промывочной жидкости является существенным шагом вперед в решении проблемы разведочного бурения в условиях мерзлоты [4, 5].

С применением сжатого воздуха полностью устраняются осложнения второй группы. Весовые расходы воздуха в единицу времени обычно в 15—25 раз меньше весового расхода любой промывочной жидкости, а его удельная весовая теплоемкость (c_p=0,24 *ккал/кг*·°С) соответственно в 4 раза меньше. Поэтому при одной и той же начальной температуре нагнетаемый в скважину воздух несет с собою в 60—100 раз меньше тепла, чем промывочная жидкость. Это обстоятельство существенно снижает опасность осложнений первой группы.

Воздух как промывочный агент значительно эффективнее, например, солевого раствора (NaCl или $CaCl_2$ в воде). Однако подаваемый от компрессора непосредственно в скважину сжатый воздух, снижая опасность и остроту проявления осложнений, связанных с протаиванием мерзлых пород, не устраняет этих осложнений полностью. Дело в том, что на выходе из компрессора сжатый воздух всегда имеет повышенную температуру, достигающую 70—80°С. При этом вполне возможны и не раз отмечались на практике случаи протаивания мерзлоты с последующими осложнениями.

Существует также специфический вид осложнений, связанных с выпадением конденсата из воздуха при его охлаждении в скважине и выражающихся в слипании частиц шлама, образовании сальников, намерзании конденсата в соединениях, уменьшении проходных сечений и в силу этого в прижогах породоразрушающего инструмента, прихватах снаряда и пр. Эти осложнения также являются следствием недоучета температурного фактора при бурении.

Для совершенствования технологии бурения в многолетнемерзлых породах необходимо изучить особенности температурного режима скважины, бурящейся с продувкой [8, 10], и возможность его регулирования и нормализации на основе искусственного охлаждения воздуха [1, 2].

С целью получения для практических расчетов простых аналитических зависимостей примем следующие упрощающие допущения.

1. Будем считать температуру пород по глубине постоянной и равной ее среднеинтегральному по длине ствола скважины значению.

2. Поскольку при использовании охлажденного воздуха его влажность из-за нагрева в скважине при контакте с льдистыми породами может только возрастать, а возможный прирост температуры воздуха в процессе теплообмена при этом несколько снижается, не изменяя характера температурных кривых, будем учитывать влияние влажности лишь на наиболее ответственном участке—в призабойной зоне скважины.

3. Учитывая обязательное при бурении с продувкой стремление к минимуму аэродинамических потерь давления, будем для простоты пренебрегать генерацией тепла за счет работы трения потока.

Третье допущение в некоторой степени компенсирует погрешность, вносимую вторым допущением.

Принятые допущения можно рассматривать в качестве дополнительных к исходным, использованным при выводе основных аналитических зависимостей [6], описывающих температурный режим глубоких скважин. Из этих основных зависимостей, положив в соответствии с принятыми упрощениями $\sigma=0$, $i_1=0$, $i_2=0$, можно получить аналитические выражения для распределения температуры воздуха в циркуляционной системе скважины при бурении по мерзлым породам, как это было сделано в работах [7, 8].

В данном случае представим выражения для распределения температуры воздуха в следующем виде:
в бурильной колонне

$$t_1=m_1e^{r_1h}-n_1e^{r_2h}+t_n, \tag{1}$$

где

$$m_1=\frac{\frac{k\pi}{Gc_p}\Delta t_3-(t_{1н}-t_п)r_2e^{r_2H}}{r_1e^{r_1H}-r_2e^{r_2H}}; \quad n_1=\frac{\frac{k\pi}{Gc_p}\Delta t_3-(t_{1н}-t_п)r_1e^{r_1H}}{r_1e^{r_1H}-r_2e^{r_2H}};$$

в кольцевом пространстве

$$t_2=m_2e^{r_1h}-n_2e^{r_2h}+t_п, \tag{2}$$

где

$$m_2=\frac{(t_{1н}-t_п)r_1e^{r_2H}-\frac{k\pi}{Gc_p}\Delta t_3\frac{r_1}{r_2}}{r_1e^{r_1H}-r_2e^{r_2H}}; \quad n_2=\frac{(t_{1н}-t_п)r_2e^{r_1H}-\frac{k\pi}{Gc_p}\Delta t_3\frac{r_2}{r_1}}{r_1e^{r_1H}-r_2e^{r_2H}}.$$

В этих формулах $t_{1н}$—температура сжатого воздуха, нагнетаемого в бурильные трубы, °С; $t_п$—средняя естественная температура окружающих скважину мерзлых пород, °С; $к$—коэффициент теплопередачи через стенку бурильной трубы, отнесенный к единице длины, *ккал/м·ч·°С*; G—весовой расход воздуха, *кг/ч*; c_p—теплоемкость воздуха при постоянном давлении, *ккал/кг·°С*; $\Delta t_з$—прирост температуры воздуха в призабойной зоне, °С;

$$r_1,\ r_2=\frac{\pi}{Gc_p}\left(\frac{k_{агр}k_т D}{2}\pm\sqrt{\frac{k_{агр}^2k_т^2D^2}{4}+k_{агр}k_тkD}\right),$$

где D—диаметр скважины, *м*; $k_{агр}$—безразмерный коэффициент интенсификации теплообмена за счет изменения агрегатного состояния пород; $к_т$—коэффициент нестационарного теплообмена, *ккал/м²·ч·°С*.

Для определения коэффициента теплопередачи через стенку бурильной трубы служит формула

$$k=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1d_1}+\frac{1}{2\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1}+\frac{1}{\alpha_2d_2}}, \tag{3}$$

где d_1, d_2—внутренний и наружный диаметры трубы, *м*; α_1, α_2—коэффициенты теплоотдачи соответственно во внутреннем канале бурильных труб и в кольцевом пространстве скважины, *ккал/м²·ч·°С*; λ_1—коэффициент теплопроводности материала труб, *ккал/м·ч·°С*. В случае теплоизолированных труб используется аналогичная по структуре формула для многослойной цилиндрической стенки [11].

Методика точного определения коэффициента теплоотдачи для потока воздуха [11] требует предварительных аэродинамических расчетов, которые применительно к условиям бурения с продувкой могут быть наиболее просто осуществлены по способу, изложенному, например, в работе [5]. Для практических расчетов можно рекомендовать следующие простые приближенные формулы для непосредственного определения значений коэффициентов теплоотдачи:

$$\alpha_1 = 0{,}138 \frac{V^{0,8}}{d_1^{1,8}}, \tag{4}$$

$$\alpha_2 = 0{,}138 \frac{V^{0,8}}{(D+d_2)^{0,8}(D-d_2)}, \tag{5}$$

где V—расход воздуха, *м³/мин*.

Весьма ответственным является определение зависящего от продолжительности циркуляции коэффициента нестационарного теплообмена k_τ между воздухом и окружающими породами. При тепловых расчетах шахт и рудников для этого пользуются номограммой [12], а также целым рядом построенных на ее основе упрощенных зависимостей, которые, однако, для буровых скважин не вполне пригодны. Поэтому для случая движения воздуха по скважине нами на основе номограммы [12] получена и рекомендуется для практического применения следующая расчетная формула, дающая погрешность в определении k_τ не более $\pm 5\%$,

$$\kappa_\tau = \frac{\alpha_2}{1+\alpha_2 \beta}, \tag{6}$$

где $\beta = \frac{1{,}35 D\sqrt{\tau}}{\lambda_п \sqrt{\tau} + D\sqrt{\lambda_п c_п \gamma_п}}$; $\lambda_п$—коэффициент теплопроводимости породы, *ккал/м·ч·°С*; $c_п$—удельная весовая теплоемкость породы, *ккал/кг·°С*; $\gamma_п$—объемный вес породы, *кГ/м³*; τ—продолжительность циркуляции, *ч*.

Введенный проф. Ю. Д. Дядькиным коэффициент интенсификации теплообмена $k_{агр}$ [3], позволяющий в наиболее простой форме и с достаточной для практики точностью учесть влияние изменения агрегатного состояния мерзлых пород на их теплообмен с воздухом, применительно к буровой скважине может быть определен по формуле

$$k_{агр} = 1 + 0{,}0042 \frac{qw}{c_п |t|}, \tag{7}$$

где q—скрытая теплота плавления льда, *ккал/кг*; w—активная влажность породы (отношение веса свободной воды к общему весу единицы объема влажной породы), %; $|t|$—абсолютное значение средней температуры воздуха на расчетном участке, °С.

Прирост температуры сжатого воздуха в призабойной зоне скважины с учетом увлажнения в процессе нагрева и массообмена с содержащими лед породой и шламом [7, 8] может быть определен по формуле

$$\Delta t_з = \frac{860 N}{G[c_p + (q+q')\Delta\psi]}, \tag{8}$$

где N—затрачиваемая на забое мощность, *квт*; q и q'—скрытая теплота плавления льда и парообразования, *ккал/кг*; $\Delta\psi$—прирост

влагосодержания воздуха в призабойной зоне скважины, *кг/кг·°С* (в сухих мерзлых породах следует принимать $\Delta\psi=0$).

Аналитические зависимости (1), (2) и приведенные формулы для определения входящих в них величин могут быть использованы для прогнозирования температурного режима бурящейся скважины с приближенным учетом влияния изменений агрегатного состояния окружающих мерзлых пород и влажности воздуха, возрастающей при контакте последнего в условиях подогрева с влажными мерзлыми породами призабойной зоны.

Для упрощенных практических расчетов целесообразно иметь менее сложные расчетные формулы, нежели зависимости (1), (2). В силу малых весовых расходов воздуха уже при глубине скважины в несколько десятков метров член $r_2 e^{r_2 H}$ в знаменателях выражений (1), (2) приобретает исчезающе малые значения и им можно пренебречь. Это позволяет в результате ряда преобразований получить следующие простые расчетные формулы распределения температуры в бурильных трубах и в кольцевом пространстве

$$t_1=(t_{1н}-t_п)\,e^{r_2 h}+\frac{k\pi}{Gc_p}\cdot\frac{\Delta t_з}{r_1}e^{r_1(h-H)}+t_п; \qquad (9)$$

$$t_2=(t_п-t_{1н})\,\frac{r_2}{r_1}\,e^{r_2 h}-\frac{k\pi}{Gc_p}\cdot\frac{\Delta t_з}{r_2}\,e^{r_1(h-H)}+t_п. \qquad (10)$$

Формулы (9) и (10) можно рекомендовать для практических расчетов в технологических целях при бурении с продувкой воздухом с использованием обычных, нетеплоизолированных бурильных труб.

Рассмотрим характер и особенности температурного режима скважины при бурении с очисткой забоя воздухом по мерзлым породам. Особый интерес представляют два крайних случая: бурение большим диаметром с большим расходом воздуха (например, при разведке россыпей) и бурение малым диаметром с относительно небольшим расходом воздуха (алмазное бурение).

В первом случае для расчетов приняты следующие исходные данные: скважина диаметром 180 *мм*, максимальной глубиной 150 *м*; бурильные трубы муфтово-замкового соединения ⌀63,5 *мм*; породы типа мерзлого суглинка ($\gamma_п=2070$ *кг/м³*, $c_п=0{,}29$ *ккал/кг·°С*, $\lambda_п=2$ *ккал/м·ч·°С*) со средней температурой $t_п=-3$°С; расход воздуха 9 *м³/мин* с начальными температурами $t_{1н}=+30$, -5 и -30°С; затрачиваемая на забое мощность 3 *квт*.

Во втором случае — скважина диаметром 76 *мм*, конечная глубина 200 *м*; бурильные трубы ниппельного соединения ⌀ 50 *мм*; породы типа песчаников ($\gamma_п=2600$ *кг/м³*; $c_п=0{,}25$ *ккал/кг·°С*; $\lambda_п=1{,}6$ *ккал/м·ч·°С*) со средней температурой $t_п=-5$°С; расход воздуха 4 *м³*/мин с начальными температурами $t_{1н}=+30$, 0 и -20°С; забойная мощность 1,5 *квт*. В обоих случаях теплопроводность труб $\lambda_1=40$ *ккал/м·ч·°С*.

Расчеты проведены по приближенным формулам (9) и (10) при продолжительности циркуляции $\tau=2$ *ч*. Для простоты влияние изменения агрегатного состояния не учитывалось ($k_{агр}=1$).

Результаты проделанных расчетов представлены в виде кривых распределения температуры воздуха в бурильных трубах и кольцевом пространстве скважины для двух случаев: бурения на россыпях (рис. 1) и алмазного бурения по твердым скальным породам (рис. 2).

Кривые на рис. 1 и 2 показывают, что даже при незначительных глубинах (до 100—200 *м*) температура воздуха в скважине претерпе-

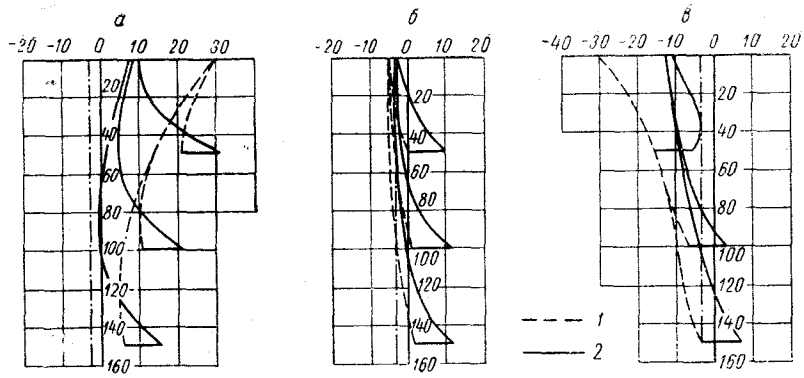


Рис. 1. Распределение температуры в бурильных трубах и кольцевом пространстве скважины диаметром 180 *мм* (бурение на россыпях) при расходе воздуха 9 *м³/мин*, конечных глубинах 50, 100 и 150 *м*, продолжительности циркуляции 2 *ч* и различных начальных температурах нагнетаемого в скважину воздуха, °С: *а*—(+30); *б*—(—5); *в*—(—30)
1—температура в бурильных трубах; *2*—температура в кольцевом пространстве

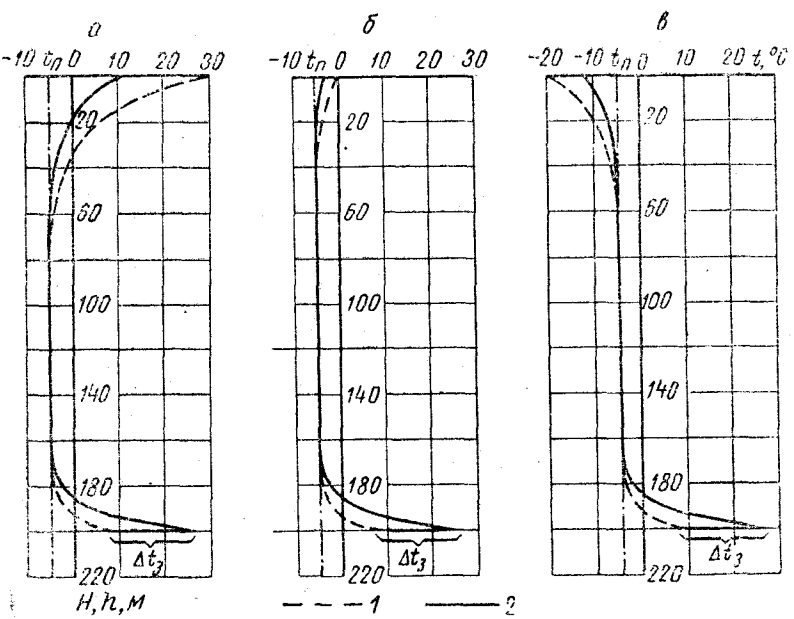


Рис. 2. Распределение температуры в бурильных трубах (*1*) и кольцевом пространстве (2) скважины диаметром 76 *мм* (алмазное бурение) при расходе воздуха 4 *м³/мин*, конечной глубине 200 *м*, продолжительности циркуляции 2 *ч* и различных начальных температурах нагнетаемого в скважину воздуха, °С: *а*—(+30); *б*—(—0); *в*—(—20)

вает значительные изменения, и в тем большей мере, чем сильнее начальная температура воздуха отличается от температуры мерзлых пород в бо́льшую или меньшую сторону. Причина в том, что в силу малых в сравнении с промывочными жидкостями весовых расходов и теплоемкости воздух всегда несет с собой весьма небольшой запас холода или тепла и поэтому быстро приобретает с глубиной температуру, близкую к температуре окружающих мерзлых пород. Этот процесс протекает тем быстрее, чем меньше весовой расход воздуха и интенсивнее теплообмен, определяемый главным образом скоростью потока, зависящей от площади его поперечного сечения (рис. 1 и 2). Во втором из рассматриваемых примеров (алмазное бурение) из-за сравнительно малого расхода воздуха и высоких скоростей его движения и, следовательно, бо́льших значений коэффициента теплоотдачи температура в скважине уже на глубине 50—70 *м* становится равной температуре пород независимо от начальной температуры воздуха (рис. 2).

Наиболее неблагоприятные условия бурения по мерзлым породам имеют место при высоких положительных температурах нагнетаемого в скважину воздуха, особенно при больших его расходах. В этом случае по всему стволу скважины может сохраняться положительная температура воздуха (рис. 1, *а*), что ведет к тяжелым осложнениям. При малых расходах воздуха, начиная с некоторой глубины скважины его высокая начальная температура перестает играть отрицательную роль (рис. 2,*а*). На верхнем участке ствола, где влияние начальной температуры сохраняется, возможные осложнения могут быть предупреждены установкой обсадной колонны.

Во всех случаях бурения с продувкой воздухом его температура резко возрастает у забоя скважины за счет тепла, отбираемого от породоразрушающего инструмента. При использовании охлажденного воздуха максимум температуры в скважине (при нетеплоизолированных бурильных трубах) устанавливается, как правило, у забоя (рис. 1,*б* и *в*; рис. 2,*б* и *в*) и лишь при малой глубине и большом расходе холодного воздуха — несколько выше забоя (рис. 1,*в*).

При температуре нагнетаемого в бурильные трубы сжатого воздуха, близой к температуре окружающих мерзлых пород, само распределение температуры по скважине определяется теплом, генерируемым на забое (рис. 1,*б* и рис. 2,*б*).

Общий характер температурных кривых на рис. 1 типичен для больших расходов воздуха, а также малых глубин, а на рис. 2 — для малых расходов или больших глубин.

Важнейшими параметрами, характеризующими температурный режим скважины, являются значения температуры воздуха в кольцевом пространстве у забоя и устья. Их точное (в пределах принятых допущений) определение возможно с помощью зависимости (2) при условиях соответственно $h=H$ и $h=0$

$$t_з = m_2 e^{r_1 H} - n_2 e^{r_2 H} + t_п; \tag{11}$$

$$t_у = m_2 - n_2 + t_п, \tag{12}$$

где m_2 и n_2 — те же сокращающие обозначения, что и в выражении (2).

Раскрывая в формулах (11) и (12) m_2 и n_2 и принимая во внимание, что при достаточно большом H можно принять $e^{r_2 H}=0$ и $e^{-r_1 H}=0$,

после простых преобразований и упрощений получим

$$t_з = t_п - \frac{k\pi}{Gc_p} \cdot \frac{\Delta t_з}{r_2}; \qquad (13)$$

$$t_у = (t_п - t_{1н}) \frac{r_2}{r_1} + t_п. \qquad (14)$$

Выражения (13) и (14) показывают, что при достаточно большой глубине скважины (тем большей, чем выше расход воздуха) забойная и устьевая температуры не зависят от глубины, но определяются температурой окружающих мерзлых пород, условиями и продолжительностью теплообмена. При этом решающее влияние на призабойную температуру воздуха оказывает затрачиваемая на забое мощность, а на устьевую — начальная температура нагнетаемого в скважину воздуха.

Смысл нормализации температурного режима скважины в мерзлых породах заключается в том, чтобы ни на одном из участков ее ствола в процессе бурения не происходило протаивания. Растепление мерзлой породы с потерей связности наступает, когда породе передано количество тепла, достаточное не только для ее нагрева от естественной отрицательной температуры до 0°С, но и для перехода содержащегося в породе льда в жидкое состояние (скрытая теплота плавления). Предельно допустимым можно считать такое растепление, в процессе которого породам передано количество тепла, достаточное лишь для нагрева стенки скважины до 0°С (без скрытой теплоты плавления).

Для количества тепла, переданного от воздуха с температурой t стенкам скважины с температурой t_* на единицу длины ствола в час, справедливо выражение

$$Q = \alpha_2 \pi D (t - t_*). \qquad (15)$$

Для того же количества тепла, переданного в час от воздуха мерзлым породам, не затронутым растеплением, с естественной температурой $t_п$ через толщу пород, окружающих ствол скважины, на единицу его длины в любой момент от начала процесса теплообмена, справедливо также выражение

$$Q = k_т \pi D (t - t_п). \qquad (16)$$

Приравняв выражения (15) и (16), положив $t_* = 0$°С и решив относительно температуры воздуха, предварительно обозначив $t = t_{max}$, получим

$$t_{max} = \frac{k_т t_п}{k_т - \alpha_2}. \qquad (17)$$

Формула (17) позволяет определить ту максимально допустимую температуру воздуха, при которой не наступит потери связности слагающих стенки скважины мерзлых пород при данных условиях и продолжительности циркуляции. Как следует из формулы (17), t_{max} составляет обычно небольшую положительную величину. Справедливость этого вывода подтверждается опытными данными ВИТР [10]: применение продувки воздухом с температурой до $+5 \div +10$°С не приводило к обвалам стенок скважин из-за потери связности протаявших мерзлых пород. Однако при этом вполне возможны поверхностное растепление, слипание шлама, образование сальников и пр.

Полной гарантией от осложнений, связанных с протаиванием мерзлых пород, следует считать соблюдение условия $t_2 \leqslant 0°C$, т. е. чтобы ни в одной точке ствола температура циркулирующего воздуха не превышала 0°С. Это возможно лишь при применении охлажденного воздуха [1, 2]. Расчетную формулу для определения потребной температуры нагнетаемого охлажденного воздуха получим, подставив в выражение (11) $t_з=0$ и раскрыв сокращающие обозначения,

$$t_{1н}=t_п+\left(t_п-\frac{k\pi}{Gc_p}\cdot\frac{\Delta t_з}{r_2}\right)\frac{r_1}{r_2-r_1}e^{-r_2H}. \qquad (18)$$

Формула (18) может служить основой проектирования режимов охлаждения сжатого воздуха в конкретных условиях и использоваться при выборе рациональных способов охлаждения.

Кривые на рис. 2 и формула (13) показывают, однако, что при малом расходе воздуха или достаточно большой глубине скважины искусственное охлаждение воздуха может оказаться совершенно бесполезным. Причина в том, что создаваемый на поверхности запас холода в процессе интенсивного теплообмена между нисходящим и восходящим потоками в итоге затрачивается на бесполезное понижение температуры верхних горизонтов мерзлых пород, не достигая забоя скважины. Это обстоятельство ставит задачу экономичного транспортирования и рационального размещения производства холода.

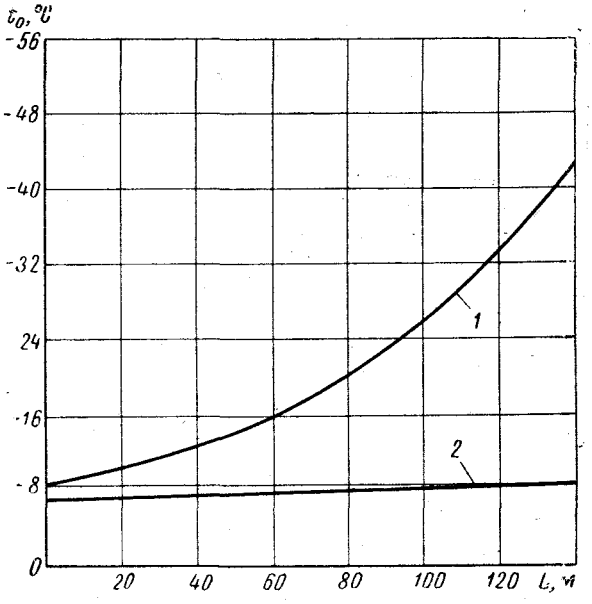


Рис. 3. Зависимость температуры охлажденного на поверхности сжатого воздуха, потребной для обеспечения нулевой температуры в призабойной зоне скважины в процессе бурения, от глубины скважины. *1*—при обычных бурильных трубах; *2*—при теплоизолированных бурильных трубах

Эффективное использование охлажденного воздуха при производстве его на поверхности может быть достигнуто с помощью теплоизолированной бурильной колонны. На рис. 3 представлены расчетные зависимости потребной температуры охлажденного на поверхности воздуха для обеспечения условия $t_з=0°C$ при обычных и теплоизолированных бурильных трубах в условиях первого из рассмотренных примеров, но при расходе мощности на забое $N=1{,}5$ *квт*. Теплоизоляция бурильных труб ⌀63,5 *мм* достигнута в данном случае за счет воздушной прослойки, создаваемой с помощью приваренных к замкам внешних тонкостенных труб ⌀89 *мм*. Рис. 3 показывает, что уже при глубине скважины 100—150 *м* требуемое охлаждение сжатого воздуха на поверхности в несколько раз меньше, чем при обычных трубах. С глубиной этот эффект быстро возрастает. Специальные пластмассовые бурильные трубы или современные синтетические теплоизоляци-

онные материалы позволяют в принципе обеспечить столь надежную изоляцию, что созданный на поверхности запас холода будет достигать забоя практически без потерь.

Проблема рационального размещения производства холода может быть решена на основе использования встраиваемого в нижнюю часть бурового снаряда погружного вихревого холодильника, отличающегося весьма малыми размерами, отсутствием движущихся частей и создающего в холодной струе при перепаде давления 5 *атм* температуру воздуха до $-40 \div -50$°С. При этом обычная бурильная колонна будет играть роль холодильника предварительного охлаждения, что потребует включения в ее состав скважинных влагоотделителей [4].

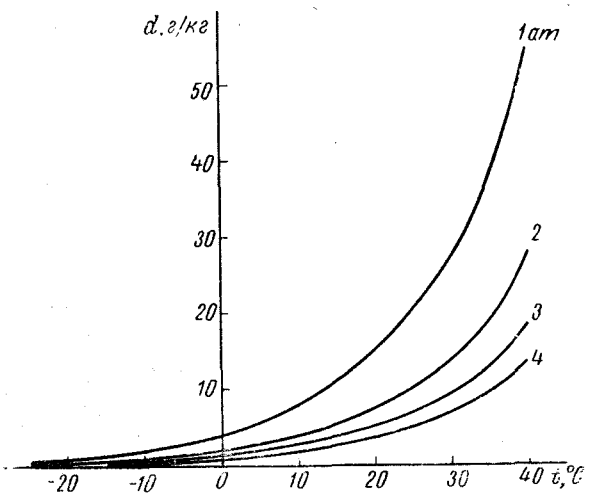


Рис. 4. Зависимость влагосодержания воздуха (в граммах влаги на 1 *кг* сухого воздуха) от температуры при различных давлениях (в *ата*)

Применение охлажденного воздуха наряду с другими преимуществами позволяет простейшим образом устранить осложнения, связанные с выпадением конденсата. Любой способ принудительного охлаждения сжатого воздуха на поверхности сопровождается конденсацией и отводом влаги, в силу чего воздух осушается.

Содержание влаги в воздухе зависит от его давления, температуры и относительной влажности. Связь между этими параметрами сложна, но в интервале температур и давлений, с которыми мы имеем дело при бурении с продувкой, она с достаточной для практических расчетов точностью может быть выражена формулой

$$\psi = 3{,}85 \cdot 10^3 \frac{\varphi}{p} e^{0{,}067t}, \qquad (19)$$

где ψ—влагосодержание, *кг/кг*; φ—относительная влажность (в долях единицы); p—абсолютное давление воздуха, *ат*; t—температура воздуха, °С.

На рис. 4 представлена вычисленная с помощью формулы (19) зависимость влагосодержания воздуха от его температуры и давления при $\varphi = 1$, что практически всегда справедливо для воздуха, нагнетаемого в бурильные трубы, поскольку даже при незначительном охлаждении в ресивере компрессора сжатый воздух достигает точки росы ($\varphi = 1$). Рис. 4 может быть использован как номограмма для определения количества выпадающей или поглощаемой влаги и, в частности, для ориентировочного определения входящего в формулу (8) прироста влагосодержания $\Delta\psi$ при конкретных условиях расширения и нагрева воздуха в призабойной зоне скважины при бурении насыщенных льдом мерзлых пород.

Подаваемый в бурильные трубы непосредственно от компрессора теплый сжатый воздух при движении по скважине охлаждается, что

может сопровождаться выпадением конденсата в бурильных трубах и кольцевом пространстве. Предварительно охлажденный сжатый воздух при нагреве в скважине может лишь поглощать влагу в кольцевом пространстве, где имеет место его контакт с породами, содержащими влагу в жидкой или твердой фазе. При этом выпадение конденсата и связанные с ним осложнения исключены. Нагревающийся при движении по скважине охлажденный воздух осушает ее.

Рассмотренные здесь закономерности температурного режима скважины, бурящейся с продувкой по мерзлым породам, и рекомендации по его регулированию подтверждены успешными результатами опытных полевых работ по бурению с продувкой охлажденным воздухом, проведенных ЛГИ и ЦНИГРИ в 1966—1969 гг. на производственных объектах Магаданской области и Якутской АССР.

Есть все основания считать, что нормализация температурного режима скважины на основе применения охлажденного воздуха является надежным средством резкого повышения производительности и качества разведочного бурения по многолетнемерзлым породам.

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, 1967.
2. Беркович М. Я. и др. О теоретической возможности бурения скважин с продувкой холодным воздухом в условиях восточных нефтяных районов. Изв. вузов, Нефть и газ, № 5, 1961.
3. Дядькин Ю. Д. Метод теплового расчета подземных выработок в толще многолетнемерзлых горных пород. В сб. „Теплов. процессы в мерзл. горн. породах." М., Наука, 1964.
4. Елманов И. П. Бурение геологоразведочных скважин с продувкой воздухом в многолетнемерзлых породах. М., Недра, 1965.
5. Кирсанов А. И. и др. Инструктивные указания по бурению геологоразведочных скважин с очисткой забоя воздухом. МГ и ОН СССР, ОНТИ ВИТР, вып. 35. Л., 1960.
6. Кудряшов Б. Б. Анализ, расчет и вопросы регулирования температурного режима бурящейся скважины. См. настоящий сборник.
7. Кудряшов Б. Б., Яковлев А. М., Михайлова Н. Д. Разработка технологии бурения разведочных скважин с продувкой охлажденным воздухом на россыпных месторождениях в условиях многолетней мерзлоты. Гос. комитет по делам изобретений и открытий при СМ СССР, Удостоверение о регистрации № 51364 с приоритетом от 16.02.65.
8. Кудряшов Б. Б., Кирсанов А. И., Степанов П. М. Тепловой режим скважины при бурении с очисткой забоя воздухом по многолетнемерзлым породам. Теория и практика бурения с очисткой забоя воздухом, ВНИИОЭНГ, М., 1967.
9. Марамзин А. В. Бурение скважин в многолетней мерзлоте. Гостоптехиздат, 1963.
10. Марамзин А. В. и др. К вопросу о температурном режиме ствола скважины при бурении с продувкой в условиях многолетней мерзлоты. Тр. ВИТР, сб. 3. М., Госгеолтехиздат, 1961.
11. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М.—Л., Госэнергоиздат, 1956.
12. Щербань А. Н., Кремнёв О. А., Журавленко В. Я. Справочное руководство по тепловым расчетам шахт и проектированию установок для охлаждения рудничного воздуха. М., Госгортехиздат, 1960.