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

ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БУРЕНИЯ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ЗАМОРАЖИВАНИЕМ ПРОХОДИМЫХ ПОРОД

Б. Б. Кудряшов, В. К. Чистяков

Целью одновременного с процессом бурения замораживания проходимых талых пород является обеспечение их монолитности и прочности, что дает возможность избежать осложнений, связанных с неустойчивостью рыхлых влажных пород, и получить высокий выход керна.

Режим замораживания при бурении должен способствовать формированию изолирующей скважину и керн ледогрунтовой корки (стенки), способной противостоять горному давлению или избыточному давлению промывочного агента-холодоносителя в скважине, а также механическим ударам бурового инструмента, т. е. предупреждать обвалы, разрушение керна, прорыв подземных вод или потери циркуляции как в процессе бурения, так и во время спуско-подъемных операций и перерывов между рейсами.

Достижение указанного эффекта возможно только в том случае, если порода забоя в любой момент будет оставаться в мерзлом состоянии. Необходимым для этого условием является опережение забоя замораживанием.

Поскольку на забое скважины в процессе бурения порода непрерывно обновляется и здесь же концентрируется все тепло, выделяющееся за счет механической работы породоразрушающего инструмента, опережение забоя фронтом замораживания представляет наибольшую трудность. Создание и непрерывное сохранение на забое ледогрунтовой корки, удовлетворяющей требованиям прочности, является необходимым и достаточным условием обеспечения монолитности и устойчивости проходимых рыхлых влажных или обводненных пород.

Прочностные расчеты применительно к ледогрунтовым стенкам не представляют сложности [4]. Необходимая и достаточная в конкретных условиях глубина промораживания породы забоя (с учетом также влияния протаивания при перерывах в бурении) всегда может быть задана заранее. Смысл анализа и технологических расчетов процесса бурения с замораживанием сводится к отысканию условий, при которых заданная глубина промораживания забоя будет обеспечена. Поставим задачу найти пригодные для практических расчетов аналити-

ческие соотношения между основными параметрами, определяющими процесс бурения с одновременным замораживанием проходимых пород.

Примем следующие исходные допущения: а) теплофизические свойства пород в пределах неизменных фазовых состояний постоянны; б) изменения влажности пород при промерзании не происходит; в) выделение теплоты кристаллизации воды заканчивается на границе промерзания при температуре $T_{агр}$; г) тепловой поток одномерный и направлен вдоль оси скважины; д) между глубиной промерзания z и глубиной, на которой практически сохраняется неизменная естественная температура пород X, существует линейная зависимость $X=bz$, где b—безразмерный коэффициент пропорциональности (рис. 1).

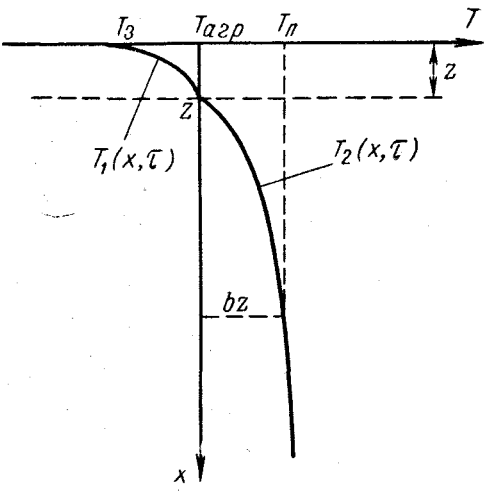


Рис. 1. Распределение температуры в сечении промерзающих пород забоя скважины

При промораживании грунта на глубину z с единицы площади забоя должно быть отобрано количество тепла

$$\Delta Q=\Delta Q_{агр}+\Delta Q_1+\Delta Q_2, \quad (1)$$

где $\Delta Q_{агр}$—потери тепла при переходе грунтовой воды в лед; ΔQ_1—потери тепла мерзлого слоя; ΔQ_2—потери тепла талого слоя.

С учетом предпосылок, содержащихся в работах [7, 9], и принятых упрощающих допущений, расшифровывая элементы, входящие в правую часть уравнения (1), получим в общей форме

$$\Delta Q=(1-\psi)\,W\delta iq\int_0^z dx+c_1\gamma_1\int_0^z[T_{агр}-T_1(x,\tau)]\,dx+$$

$$+c_2\gamma_2\left\{\int_0^z(T_п-T_{агр})\,dx+\int_0^{bz}[T_п-T_2(x,\tau)]\,dx\right\}, \quad (2)$$

где ψ—пористость грунта, доли единицы; W—влажность породы, доли единицы; i—льдистость, обеспечиваемая в результате промораживания, доли единицы; δ—удельный вес твердой фазы скелета породы, *кГ/м*^{3}; q—удельная теплота кристаллизации воды, $q=80$ *ккал/кг*; z—глубина промерзания, *м*; x—текущая координата, *м*; c—удельная весовая теплоемкость породы, *ккал/кг*·°С; γ—объемный вес породы, *кГ/м*^{3}; T—переменная температура породы, °С; $T_п$—естественная температура породы в массиве, °С; τ—время, *ч*; индекс „1" относится к мерзлой породе, индекс „2"—к талой.

При $\tau>0$ для описываемого уравнением (2) процесса замораживания породы в забое скважины примем следующие граничные условия:

при $x=0$ $T=T_з$—температура поверхности забоя равна постоянной во времени температуре замораживания;

при $x=z$ $T_1=T_2=T_{агр}$—граница изменения агрегатного состояния породы, фазового перехода;

при $x=bz$ $T_2=T_п$—граница теплового влияния процесса замораживания на окружающий массив пород.

Проблема простого и в то же время достаточно точного решения задачи о промерзании грунта сводится к отысканию удовлетворяющих этим требованиям приближенных выражений для функций $T_1(x, \tau)$ и $T_2(x, \tau)$. Обычно, считая процесс передачи тепла при замораживании квазистационарным, в таких случаях температурные кривые в мерзлой и талой зонах представляют в виде прямолинейных, степенных или логарифмических функций глубины. Распространяя методику [3] помимо мерзлой также на талую зону, выразим распределение температуры по глубине в любой момент времени при $\tau > 0$ в виде степенных зависимостей.

Для мерзлой зоны

$$T_1(x, \tau)=T_з-T_{агр}\left[1-\left(\frac{x}{z}\right)^{n_1}\right]+T_{агр}; \tag{3}$$

для талой зоны

$$T_2(x, \tau)=(T_п-T_{агр})\left\{1-\left[\frac{bz-x}{(b-1)z}\right]^{n_2}\right\}+T_{агр}. \tag{4}$$

Подставив формулы (3) и (4) в уравнение (2) и интегрируя для случая $\tau > 0$ с учетом сформулированных граничных условий, получим

$$\Delta Q=(1-\psi)\,W\delta iqz-c_1\gamma_1(T_з-T_{агр})\frac{n_1}{n_1+1}z+$$

$$+c_2\gamma_2(T_п-T_{агр})\frac{n_2+b}{n_2+1}z. \tag{5}$$

Пользуясь найденным выражением потерь тепла в процессе промораживания (5), можно установить связь между глубиной и временем промерзания. Потери тепла при увеличении глубины промерзания z на dz за время $d\tau$ должны быть равны количеству тепла, снимаемого с поверхности забоя за то же время $d\tau$ по закону Фурье

$$dQ=-\lambda_1\left(\frac{dT_1}{dx}\right)_{x=0}d\tau, \tag{6}$$

где λ_1—коэффициент теплопроводности мерзлого слоя, ***ккал/м·ч·°С***.

Чтобы учесть тепловое сопротивление ледогрунтовой корки, в выражение (3) вместо координаты x, отсчитываемой от поверхности забоя, введем координату y, отсчитываемую от фронта промораживания. В соответствии с этим уравнение температурной кривой в мерзлой зоне получает вид

$$T_1=(T_з-T_{агр})\left(\frac{y}{z}\right)^{n_1}+T_{агр}. \tag{7}$$

Подставив (7) в (6) и дифференцируя, имеем

$$dQ=-\lambda_1 n_1\frac{T_з-T_{агр}}{z}d\tau. \tag{8}$$

Дифференцируя также уравнение (5) по dz и сравнив результат с выражением (8), получим

$$\left[(1-\psi)\,W\delta iqc_1\gamma_1(T_з-T_{агр})\frac{n_1}{n_1+1}+\right.$$

$$\left.+c_2\gamma_2(T_п-T_{агр})\frac{n_2+b}{n_2+1}\right]dz=\lambda_1\frac{T_{агр}-T_з}{z}d\tau. \tag{9}$$

Интегрируя уравнение (9) и решая его относительно z, для глубины промораживания найдем

$$z=\sqrt{\frac{2\lambda_1 n_1 (T_{агр}-T_з)\tau}{(1-\psi)\, W\delta iq-c_1\gamma_1 (T_з-T_{агр})\frac{n_1}{n_1+1}+c_2\gamma_2 (T_п-T_{агр})\frac{n_2+b}{n_2+1}}}. \quad (10)$$

Из выражения (10) легко получим аналитическую зависимость для скорости промораживания породы забоя

$$\frac{dz}{d\tau}=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{2\lambda_1 n_1 (T_{агр}-T_з)}{\left[(1-\psi)\, W\delta iq-c_1\gamma_1 (T_з-T_{агр})\frac{n_1}{n_1+1}+c_2\gamma_2 (T_п-T_{агр})\frac{n_2+b}{n_2+1}\right]\tau}}. \quad (11)$$

Очевидно, для осуществления процесса бурения с одновременным замораживанием проходимых пород необходимо соблюдение условия

$$\frac{dz}{d\tau}\geqslant\frac{dx}{d\tau}=s, \quad (12)$$

где s—механическая скорость бурения, *м/ч*.

С технологической и экономической точек зрения необходимым и достаточным условием успешного бурения с одновременным замораживанием является $\frac{dz}{d\tau}=s$, т. е. наличие подвижного равновесия между фронтом замораживания и непрерывно изменяющимся положением забоя, но при постоянном поддержании на забое ледогрунтовой корки, удовлетворяющей требованиям прочности. Соответствующее аналитическое выражение для допустимой в этих условиях скорости бурения легко получить непосредственно из уравнения (9):

$$s=\frac{\lambda_1 n_1 (T_{агр}-T_з)}{\left[(1-\psi)\, W\delta q-c_1\gamma_1 (T_з-T_{агр})\frac{n_1}{n_1+1}+c_2\gamma_2 (T_п-T_{агр})\frac{n_2+b}{n_2+1}\right] z}. \quad (13)$$

Величина z, входящая в правую часть соотношения (13), выражает собой заранее заданную толщину постоянно поддерживаемой ледогрунтовой корки.

Полученные зависимости применимы к анализу и расчету не только процесса бурения с одновременным замораживанием, но и других процессов, связанных с изменением фазового состояния вещества при переменном фронте теплового воздействия. Путем соответствующего подбора значений показателей степени n_1, n_2 и коэффициента b можно добиться любой практически необходимой точности расчета. Принимая показатели степени $n_1=1$ или $n_2=1$, а также пренебрегая учетом отдельных элементов (например, полагая $T_{агр}=0$), на основе выведенных зависимостей можно получить ряд распространенных частных решений, применяемых к расчету замораживания или оттаивания грунтов, твердения расплавов и др.

В интересах технологических расчетов по бурению с замораживанием особенно важно установить связь между толщиной ледогрунтовой корки на забое и необходимыми для ее поддержания параметрами процесса: площадью забоя, механической скоростью проходки, начальной температурой, расходом и теплофизическими свойствами промывочного агента-холодоносителя. Решение этой серьезной задачи существенно упрощается благодаря тому, что, как показал анализ полученных выше зависимостей, процесс теплопередачи в условиях подвижного

равновесия между фронтом замораживания и забоем можно рассматривать как установившийся, стационарный, а распределение температуры в ледогрунтовой корке — прямолинейным. Для простоты можно, кроме того, пренебречь различиями в теплофизических свойствах породы в ее талом и мерзлом состояниях, принимая при расчетах средние значения соответствующих параметров. Эти упрощающие допущения, в дополнение к исходным, не внося грубых погрешностей, позволяют простейшим путем решить поставленную задачу на основе составления элементарного уравнения теплового баланса.

В условиях подвижного равновесия для количества тепла, передаваемого в единицу времени от массива к промывочному агенту-холодоносителю через площадь забоя, справедливо

$$Q=\alpha_з (T_з-t_{ср}) F, \tag{14}$$

где $\alpha_з$ — коэффициент теплоотдачи от поверхности забоя к потоку, *ккал/м²·ч·°С*; $t_{ср}$ — средняя температура промывочного агента на забое, °С; F — площадь забоя, $м^2$.

То же количество тепла в единицу времени передается теплопроводностью от талых пород к мерзлой поверхности забоя, что в рамках принятых допущений можно выразить следующим образом:

$$Q_з=\frac{\lambda_1}{z} (T_{агр}-T_з) F. \tag{15}$$

Приравняв выражения (14) и (15) и решив их относительно $T_з$, получим

$$T_з=\frac{\alpha_з t_{ср} z+\lambda_1 T_{агр}}{\alpha_з z+\lambda_1}. \tag{16}$$

Формула (16) при конкретных условиях теплообмена дает возможность оценить потребную температуру поверхности забоя, при которой будет обеспечена заданная глубина промораживания.

В процессе бурения количество тепла, отбираемого промывочным агентом-холодоносителем от поверхности забоя с температурой $T_з$ в единицу времени, должно быть достаточным по крайней мере для того, чтобы охлаждать всю выбуриваемую в единицу времени породу от ее естественной тепературы $T_п$ до температуры агрегатного перехода $T_{агр}$ и осуществлять полное замораживание всей содержащейся в выбуриваемой породе свободной воды. Это условие можно выразить уравнением

$$Q_з=c\gamma (T_п-T_{агр}) FsW\gamma iqFs. \tag{17}$$

Приравняв выражения (17) и (14) и выразив $T_з$ через формулу (16), после преобразований получим

$$\frac{\alpha_з \lambda}{\alpha_з z+\lambda} (T_{агр}-T_{ср})=\gamma [c(T_п-T_{агр})+Wiq] s. \tag{18}$$

В уравнение (18) входит неизвестная величина средней температуры промывочного агента, омывающего забой, $t_{ср}$. Ее можно определить исходя из предположения, что в условиях теплового баланса восходящий от забоя поток промывочного агента должен выносить с собою в единицу времени все то количество тепла, которое в ту же единицу времени выделяется за счет механической работы породоразрушающего инструмента, охлаждения и замораживания породы забоя.

Поскольку охлаждение породоразрушающего инструмента происходит как по его внутренней, так и внешней поверхности [6], а охлаждение породы забоя—по всей его площади, в качестве средней температуры промывочного агента, омывающего забой, можно принять среднее арифметическое между температурами в нисходящем и восходящем потоках в призабойной зоне, что в результате приводит к выражению

$$t_{ср}=t_1+\frac{\gamma\left[c\left(T_п-T_{агр}\right)+Wiq\right]Fs+860N}{2Gc_a}, \qquad (19)$$

где t_1—температура промывочного агента в нисходящем потоке на подходе к забою, °С; N—развиваемая на забое мощность, *квт*; G—весовой расход промывочного агента-холодоносителя, *кг/ч*; c_a—удельная весовая теплоемкость промывочного агента (для газа при постоянном давлении), *ккал/кг*·°С.

Подставив выражение (19) в (18), после простых преобразований получим общее уравнение теплового баланса, описывающее теплообменные процессы в призабойной зоне скважины при бурении с одновременным замораживанием проходимых пород,

$$k\left(T_{агр}-t_1-\frac{860N}{2Gc_a}\right)=\gamma\left[c\left(T_п-T_{агр}\right)+Wiq\right]\left(1+\frac{kF}{2Gc_a}\right)s, \qquad (20)$$

где k—коэффициент теплопередачи через ледогрунтовую корку на забое, *ккал/м²·ч*·°С

$$\left(k=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_з}+\frac{z}{\lambda}}\right).$$

Уравнение (20) справедливо в условиях установившегося режима стационарного теплообмена при любой температуре агрегатного перехода (при различной степени минерализации содержащейся в породе воды) и при использовании любого вида промывочного агента-холодоносителя—жидкого или газообразного. Последнее учитывается коэффициентом теплоотдачи от породы забоя к омывающей его среде $\alpha_з$, зависящим от физических и теплофизических свойств жидкого или газообразного холодоносителя, условий и режима его движения.

Точное определение коэффициента теплоотдачи для действующего забоя скважины требует специальных экспериментальных исследований. Однако на основе имеющихся данных об интенсификации теплоотдачи при резком изменении направления движения потока [8], что имеет место на забое, с учетом дополнительной турбулизации, создаваемой вращением снаряда, в первом приближении можно считать

$$\alpha_з=3\alpha, \qquad (21)$$

где α—коэффициент теплоотдачи в кольцевом пространстве у забоя, определяемый для любого промывочного агента с помощью известных критериальных зависимостей (см. например, [8]).

На основе общего уравнения теплового баланса (20) легко могут быть получены расчетные формулы для всех основных параметров, определяющих процесс бурения с одновременным замораживанием.

Решив (20) относительно t_1, для необходимой в конкретных условиях температуры холодоносителя на подходе к забою получим

$$t_1=T_{агр}-\gamma\left[c\left(T_п-T_{агр}\right)+Wiq\right]\left(\frac{1}{k}+\frac{F}{2Gc_a}\right)s-\frac{860N}{2Gc_a}. \qquad (22)$$

В общем случае температура t_1 циркулирующего агента в конце нисходящего потока является результатом теплообменных процессов в стволе скважины, в том числе и процесса замораживания породы забоя. Для ее точного определения необходимо связать прирост температуры промывочного агента у забоя в процессе замораживания Δt с теплообменом между нисходящим, восходящим потоками и массивом окружающих скважину пород, что несложно сделать на основе зависимостей, изложенных в работе [5]. Но при тех небольших глубинах с которыми мы имеем дело в настоящее время при освоении метода бурения с одновременным замораживанием, практическим требованиям вполне удовлетворяет формула (22).

Во многих случаях может встретиться необходимость определить какова будет глубина промораживания породы забоя при заранее известных конкретных условиях бурения. Разрешив для этого уравнение теплового баланса (20) относительно z, получим расчетную формулу

$$z=\lambda\left\{\frac{T_{\text{агр}}-t_1-\dfrac{860N}{2Gc_{\text{а}}}}{\gamma\left[c\left(T_{\text{п}}-T_{\text{агр}}\right)+Wiq\right]s}-\frac{F}{2Gc_{\text{а}}}-\frac{1}{\alpha_{\text{з}}}\right\}. \tag{23}$$

Как легко заметить, глубина промораживания обратно пропорциональна механической скорости бурения. Это положение весьма важно. Поскольку сама цель одновременного с бурением замораживания проходимых пород заключается в устранении осложнений, связанных с их неустойчивостью или с потерями циркуляции, а также в резком повышении выхода и качества керна преимущества, обеспечиваемые замораживанием, в большинстве случаев могут оказаться значительно ценнее, чем сохранение высокой механической скорости бурения при постоянной угрозе осложнений.

Из выражения (23) следует также, что достигаемая глубина промораживания забоя тем меньше, чем выше мощность, затрачиваемая на разрушение породы забоя, и наоборот.

Из приведенных соображений следует вывод о возможности и целесообразности существенного повышения эффективности одновременного с бурением замораживания за счет снижения в разумных пределах осевого давления и числа оборотов. Если под эффективностью замораживания понимать толщину и прочность образующейся на забое, на стенках скважины и керна ледогрунтовой корки, то указанный путь ее повышения, выражающийся одновременно в снижении развиваемой на забое мощности и механической скорости, т. е. в количестве выделяющегося на забое тепла и выносимого в единицу времени мерзлого шлама, является простейшим. Границы же его применения в каждом конкретном случае должны определяться с учетом экономических факторов.

Из уравнения (20) для определения максимально допустимой механической скорости бурения, при которой обеспечивается заданная глубина промораживания забоя z в заранее известных конкретных условиях, получим

$$s=\frac{k\left(T_{\text{агр}}-t_1\right)-\dfrac{860N}{2Gc_{\text{а}}}}{\gamma\left[c\left(T_{\text{п}}-T_{\text{агр}}\right)+Wiq\right]\left(1+\dfrac{kF}{2Gc_{\text{а}}}\right)}. \tag{24}$$

Аналогичным путем можно вывести формулы для расчета и анализа степени влияния всех остальных факторов, определяющих процесс бурения с одновременным замораживанием. В частности, рас-

шифровав входящий в уравнение (20) коэффициент теплоотдачи α_3, можно выяснить роль весового расхода и теплофизических свойств промывочного агента-холодоносителя, а также габаритов и конфигурации забоя и призабойной зоны.

Рассмотрим примеры расчетов применительно к условиям неглубокого колонкового бурения с отбором керна на россыпях. Скважина диаметром 180 *мм*, колонковая 168/154 *мм*, керн 140 *мм*. Циркуляция прямая, влиянием глубины скважины и потерями давления в кольцевом пространстве пренебрегаем. В качестве промывочных агентов-холодоносителей приняты воздух при объемном расходе 9 *м*^{3}/*мин* и 23,1%-ный раствор NaCl в воде при объемном расходе 200 *л*/*мин*. Физические и теплофизические свойства промывочных агентов взяты из справочников физических констант при нормальном атмосферном давлении и средней температуре —10°С. Бурение ведется по влажному суглинку с естественной температурой $T_п = +10$°С и температурой изменения агрегатного состояния $T_{агр} = 0$°С. Весовая влажность и объемный вес суглинка приняты: $W = 0{,}15$; 0,10; 0,05; $\gamma = 2070$, 1980, 1890 *кг*/*м*^{3}.

Удельная весовая теплоемкость и коэффициент теплопроводности породы в талом и мерзлом состояниях в указанном диапазоне весовой влажности приняты постоянными и равными соответственно $c = 0{,}29$ *ккал*/*кг*·°С, $\lambda = 2$ *ккал*/*м*·*ч*·°С; льдистость вне зависимости от температуры замораживания принята постоянной и равной $i = 0{,}7$. Для учета влияния механической скорости бурения и развиваемой на забое мощности на процесс замораживания принято, что при скорости $s = 2$ *м*/*ч* мощность на забое составляет $N = 5$ *л. с.* = 3,68 *квт*, а при других значениях механической скорости мощность прямо пропорциональна ей в соответствии с зависимостью

$$N = 3{,}68 \frac{s}{2} = 1{,}84\, s. \qquad (25)$$

Результаты расчетов по приведенным выше формулам, основанным на балансовом уравнении (20), представлены на рис. 2 и 3.

Графики на рис. 2 показывают зависимость глубины промораживания породы забоя (при различной ее влажности) от механической скорости бурения соответственно в условиях продувки воздухом и промывки солевым раствором при одинаковой в обоих случаях начальной температуре холодоносителей $t_1 = -20$°С. Легко увидеть, что при продувке воздухом опережение забоя замораживанием в указанных условиях полностью прекращается при механической скорости более 1 *м*/*ч*, тогда как при промывке солевым раствором достаточная во многих случаях ледогрунтовая корка толщиной в несколько миллиметров будет поддерживаться на забое при вполне приемлемых скоростях бурения.

Как видно из рис. 3, даже при небольших отрицательных температурах солевой раствор (выше температуры замерзания, равной —21,2°С) оказывается в несколько раз эффективнее воздуха. Еще больших результатов можно достигнуть при использовании жидкостей, не замерзающих в условиях более глубокого охлаждения,—растворов $CaCl_2$, этиленгликоля, а также керосина или беспарафинного дизельного топлива.

Жидкие холодоносители значительно выгоднее газообразных не только потому, что в силу своей высокой плотности и теплоемкости они несут во много раз больший запас холода, но и потому, что необходимые для успешного бурения с замораживанием отрицатель-

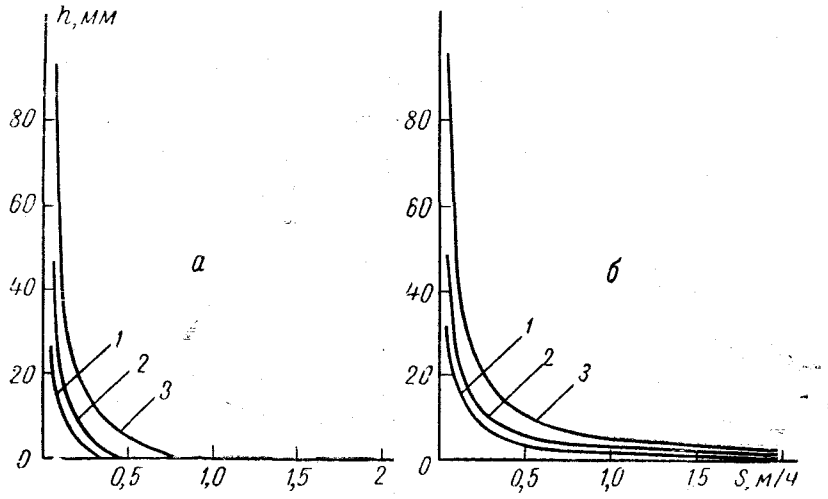


Рис. 2. Зависимость глубины промораживания породы забоя от механической скорости бурения: *а*—при продувке воздухом с начальной температурой $t_1 = -20°$ С; *б*—при промывке солевым раствором NaCl с начальной температурой $t_1 = -20°$ С

Влажность породы W, %: *1*—15; *2*—10; *3*—5

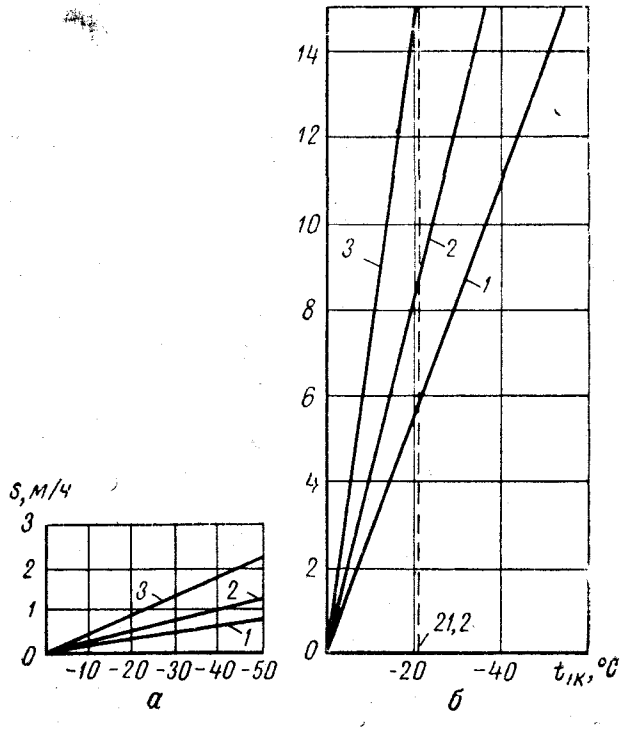


Рис. 3. Расчетные зависимости максимально допустимой механической скорости бурения от начальной температуры поступающего на забой холодоносителя: *а*—воздуха; *б*—раствора NaCl

Влажность породы W, %: *1*—15; *2*—10; *3*—5; $z = 0$

ные температуры этих холодоносителей легко достижимы на практике с помощью обычных фреоновых или аммиачных холодильных машин.

При использовании любого вида промывочного агента-холодоносителя, охлаждаемого тем или иным способом на поверхности, во всех случаях бурения с замораживанием целесообразно применение теплоизолированной бурильной колонны, способствующей экономичному транспортированию холода к забою—наиболее ответственному в тепловом отношении элементу скважины.

Имеющиеся в литературе сведения об отдельных случаях применения метода бурения с замораживанием [1, 2] и осуществляемая в настоящее время кафедрой ТТБС ЛГИ экспериментальная его проверка в условиях, приближенных к производственным, подтверждают все основные положения, полученные в настоящей работе аналитическим путем. Метод бурения с одновременным замораживанием проходимых пород вполне осуществим, его процессы поддаются расчету и регулированию на основе сформулированных здесь принципов. Заложенные в этом прогрессивном методе преимущества могут дать в целом ряде распространенных условий значительный технический и экономический эффект.

Все это позволяет сделать основной вывод о необходимости скорейшей разработки технологии метода бурения с замораживанием и его внедрения в производство.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беркович М. Я. Ликвидация поглощений в процессе бурения путем глубокого замораживания. В сб. „Совершенствование техн. и технол. бурения на нефть и газ". Гостоптехиздат, 1960.
2. Бурение с замораживанием керна — новый способ разведочного бурения. Глюкауф, № 12, 1963.
3. Вейник А. И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
4. Вялов С. С и др. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений. М., Изд. АН СССР, 1962.
5. Кудряшов Б. Б. Анализ, расчет и вопросы регулирования температурного режима бурящейся скважины. Настоящий сборник.
6. Кудряшов Б. Б., Оношко Ю. А. Нагрев и охлаждение алмазной коронки при бурении. ОНТИ ВИТР, сб. 46, 1964.
7. Лейбензон Л. С. Собрание трудов, т. 4. М., Изд. АН СССР, 1955.
8. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М—Л., Госэнергоиздат, 1966.
9. Хакимов Х. Р. Вопросы теории и практики искусственного замораживания грунтов. М., Изд. АН СССР, 1957.