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

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО ЗАБОЯ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН С ПРОМЫВКОЙ ХОЛОДОНОСИТЕЛЕМ

Б. Б. Кудряшов

Первые решения задачи о бурении с одновременным замораживанием проходимых пород, сводящейся к отысканию связи между глубиной фронта замораживания и механической скоростью бурения [3, 6, 8], носят приближенный характер и содержат параметры, определяемые из опыта или произвольно.

Аналитическое решение этой задачи может быть получено на основе теории движущихся тепловых источников [5, 9], главный принцип которой заключается в переносе уравнения теплопроводности в связанную с источником движущуюся систему координат. Доказано: если источник тепла определенной мощности q движется в неограниченном теплопроводящем пространстве с постоянной скоростью v, то в некоторый момент времени τ_0 от начала процесса в развитии температурного поля от источника неизбежно наступает «предельное состояние», в движущейся системе координат устанавливается кажущееся стационарное (квазистационарное) температурное поле, что подтверждено экспериментально. Все положения этой теории остаются в силе, если применительно к нашему случаю вместо тепловых источников рассматривать движущиеся с т о к и тепла.

Для упрощения задачи примем допущения: а) физические и теплофизические свойства породы в пределах неизменных фазовых состояний постоянны; б) выделение теплоты кристаллизации происходит на границе промерзания при температуре $t_{\text{агр}}$; в) тепловой поток одномерный и направлен вдоль оси скважины; г) изменением влажности породы при промерзании, т. е. явлениями массопереноса, пренебрегаем.

Забой скважины и фронт изменения агрегатного состояния при бурении с замораживанием будем рассматривать как движущуюся систему двух односторонних плоских стоков тепла (рис. 1), один из которых действует на мерзлую и немерзлую, другой на немерзлую зону.

При установившемся режиме (предельное состояние) скорость промораживания должна быть равна механической скорости бурения. Тогда для неподвижной оси координат, вдоль которой забой движется, справедливо

$$\frac{dZ}{d\tau}=\frac{dH}{d\tau}=v=\text{const}, \qquad (1)$$

а для подвижной системы координат.

$$\frac{dt}{d\tau}=0;\ \frac{dz}{d\tau}=0;\ z=\text{const}. \tag{2}$$

В этих выражениях Z, z — глубина промерзания соответственно в неподвижной и подвижной системах координат, *м*; H — текущая координата в неподвижной системе координат, *м*; v — механическая скорость бурения, *м/ч*; t — температура породы, °С, τ — время, *ч*.

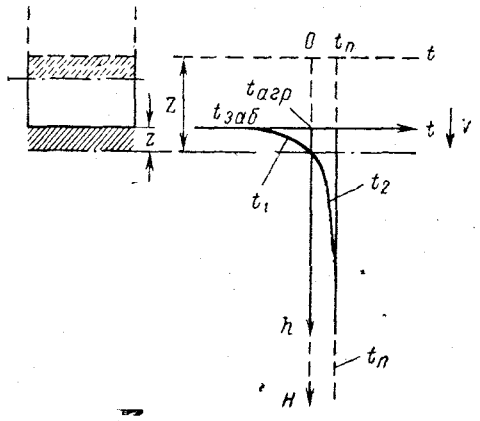


Рис. 1. К выводу зависимости распределения температуры впереди движущегося забоя при бурении с замораживанием

Выражаемое соотношениями (1) и (2) подвижное равновесие между фронтом замораживания и движущимся забоем, позволяющее сохранить на забое ледогрунтовую корку определенной голщины $z=\text{const}$, удовлетворяющей требованиям прочности, является необходимым и достаточным с технологической и экономической точек зрения условием успешного бурения с замораживанием [3].

При установившемся режиме в рамках принятых допущений температура породы в мерзлой и немерзлой зонах для движущейся системы отвечает уравнению

$$\frac{d^2t}{dh^2}+\frac{v}{a}\cdot\frac{dt}{dh}=0, \tag{3}$$

где a—коэффициент температуропроводности породы, *ккал/(м²·ч)*; h—текущая координата в подвижной системе координат, *м*.

Общее решение уравнения (3), как известно,

$$t=C_1e^{-\frac{v}{a}h}+C_2. \tag{4}$$

Для мерзлой зоны имеем граничные условия

$$t_1=t_{заб}\ \text{ при }h=0;\ t_1=t_{агр}\ \text{ при }h=z;$$

для немерзлой зоны

$$t_2=t_{агр}\ \text{ при }h=z;\ t_2=t_п\ \text{ при }h=\infty.$$

Определив из граничных условий C_1 и C_2 для мерзлой и немерзлой зон и подставив их в выражение (4), после преобразований найдем температурные функции

$$t_1=(t_{агр}-t_{заб})\frac{1-e^{-\frac{v}{a_1}h}}{1-e^{-\frac{v}{a_1}z}}+t_{заб}\ ; \tag{5}$$

$$t_2=(t_{агр}-t_{заб})e^{-\frac{v}{a_2}(h-z)}+t_п, \tag{6}$$

где $t_{агр}$, $t_{заб}$, $t_п$ — соответственно температуры агрегатного перехода, поверхности забоя и естественная температура проходимых пород, °С. Индексы 1 и 2 здесь и в дальнейшем относятся соответственно к мерзлой и немерзлой зонам.

Чтобы установить связь между скоростью бурения v и глубиной опережения забоя замораживанием z, воспользуемся условием Стефана для границы раздела фаз, которое в нашем случае приобретает вид

$$\lambda_1 \frac{dt_1}{dh} - \lambda_2 \frac{dt_2}{dh} = \rho w \gamma_2 v, \qquad (7)$$

где λ — коэффициент теплопроводности породы, *ккал/(м·ч·°С)*; $\rho = 80$ *ккал/кг* — теплота кристаллизации воды; w — активная весовая влажность породы, в долях единицы; γ — удельный вес породы, *кг/м³*.

Взяв первые производные $\left(\frac{dt_1}{dh}\right)_{h=z}$ и $\left(\frac{dt_2}{dh}\right)_{h=z}$ из выражений (5) и (6) и подставив в уравнение (7), после простых преобразований получим формулу скорости бурения с одновременным замораживанием породы

$$v = \frac{a_1}{2} \ln \frac{\rho w \gamma_2 - \frac{\lambda_2}{a_2}(t_{агр} - t_п) + \frac{\lambda_1}{a_1}(t_{агр} - t_{заб})}{\rho w \gamma_2 - \frac{\lambda_2}{a_2}(t_{агр} - t_п)}. \qquad (8)$$

Если пренебречь незначительным изменением объема влажной породы при промерзании ($\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$), принять $t_{агр} = 0°С$ и учесть, что $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$, формула скорости получит существенно более простой вид

$$v = \frac{a_1}{z} \ln \frac{\rho w + c_2 t_п - c_1 t_{заб}}{\rho w + c_2 t_п}, \qquad (9)$$

где c — удельная весовая теплоемкость породы, *ккал/кг*.

Для оценки степени влияния определяющих факторов на процесс бурения с замораживанием проведены расчеты для следующих условий. Порода — песчаный грунт [4]: $\gamma = 1600$ *кг/м³*; $w = 0{,}15$; $\lambda_1 = 1{,}66$ *ккал/(м·ч·°С)*; $\lambda_2 = 1{,}17$ *ккал/(м·ч·°С)*; $c_1 = 0{,}22$ *ккал/(кг·°С)*; $c_2 = 0{,}31$ *ккал/(кг·°С)*; $a_1 = 0{,}0048$ *м²/ч*; $a^2 = 0{,}0024$ *м²/ч*. Естественная температура породы для условий бурения с замораживанием в таликах среди мерзлых пород $t = +3°С$. При расчетах принималось опережение забоя замораживанием в пределах $z = 0{,}1 \div 10$ *мм* и температура поверхности забоя $t_{заб}$ от — 10 до —50°С. Следует отметить, что при бурении с промывкой жидким холодоносителем (охлажденным керосином, дизельным топливом, солевым раствором) коэффициент теплоотдачи на поверхности забоя столь велик ($Bi \to \infty$), что принятые при расчетах значения $t_{заб}$ можно практически считать равными средней температуре жидкого промывочного агента — холодоносителя на забое [3].

Результаты проведенных по формуле (8) расчетов зависимости между скоростью бурения v и глубиной промораживания забоя z при различных значениях $t_{заб}$ представлены графически на рис. 2. Скорость бурения с замораживанием обратно пропорциональна глубине опережающего забой замораживания и почти прямо пропорциональна отрицательной температуре замораживания, но в степени меньше единицы. Относительный прирост скорости бурения v с повышением отрицательных значений $t_{заб}$ снижается.

Графики на рис. 2 позволяют заключить, что оптимальные в осложненных условиях скорости бурения, равные примерно $v = 1 \div 2$ *м/ч*, при постоянном сохранении на забое ледогрунтовой корки толщиной $z = 1 \div 2$ *мм* достигаются при температуре холодоносителя на забое $t_{заб} = -(20 \div 40)°С$. Это находится в полном соответствии с экспериментальными и практическими данными [6, 7]. Существенное увеличение

толщины и прочности ограждающей ледогрунтовой корки на забое может быть достигнуто за счет сознательного снижения скорости бурения, что вполне допустимо, когда целью бурения с замораживанием является предупреждение тяжелых осложнений. С другой стороны, при отсутствии существенных перепадов давления между скважиной и пластом, когда целью бурения с замораживанием является повышение устойчивости рыхлых пород или обеспечение высокого выхода и качества керна, можно резко увеличить скорость бурения, отказавшись от опережающего забой промораживания. Но замораживание стенок скважины и керна сохранится, так как условия для этого много благоприятнее.

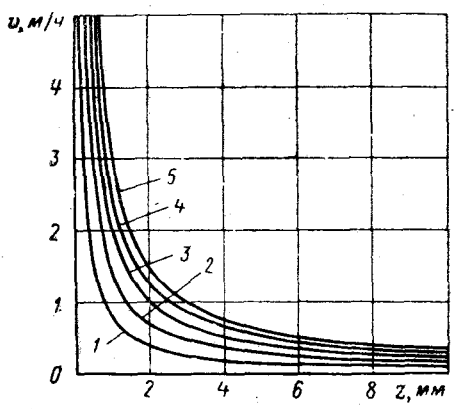


Рис. 2. Расчетная зависимость допустимой механической скорости бурения от глубины промораживания забоя при различных значениях температуры на поверхности забоя

1—5—$t_{заб}$ равна соответственно —10; —20; —30; —40; —50°С

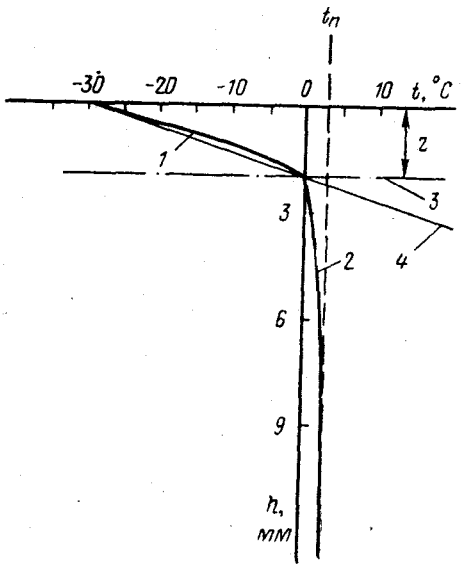


Рис. 3. Расчетное распределение температуры впереди движущегося забоя

1 и *2* — температура соответственно в мерзлой и в немерзлой зонах; *3* — подвижный фронт замораживания; *4* —прямая, приближенно аппроксимирующая кривую *1*

На рис. 3 представлено расчетное распределение температуры в мерзлой и немерзлой зонах при тех же условиях для случая $z=2$ *мм*, $v=0{,}99$ *м/ч*. Температурная кривая *1* в мерзлой зоне, как легко видеть, близка к прямой *4*. Это дает возможность при малых значениях z, которые имеют место при бурении с замораживанием, заменить температурную функцию (5) на уравнение прямой линии

$$t_1 = t_{заб} + \frac{t_{агр} - t_{заб}}{z} h \qquad (10)$$

и, действуя аналогично предыдущему, получить приближенное решение. Если к тому же пренебречь различиями физических и теплофизических свойств породы в мерзлом и талом состояниях, можно получить очень простую формулу скорости бурения с замораживанием

$$v = -\frac{\lambda t_{заб}}{(\rho w + c t_п)\gamma z}, \qquad (11)$$

пригодную для приближенных технологических расчетов.

В условиях рассмотренного выше примера при средних арифметических значениях λ и c для случая $z=2$ *мм* и $t_{заб}=-30°C$ формула (11) дает значение $v=1{,}04$ *м/ч*, завышенное лишь на $\sim 5\%$.

Из соотношений (8), (9) или (11) можно получить расчетные формулы для определения z и $t_{заб}$ при наперед заданных значениях других параметров. Имея температурные функции (5) и (6), нетрудно получить интегральный баланс тепла и с его помощью выразить $t_{заб}$ через температуру жидкого или газообразного холодоносителя и коэффициент теплоотдачи на забое. При определении средней температуры холодоносителя на забое можно учесть выделение тепла за счет механической работы породоразрушающего инструмента [3], а также связать призабойную температуру с начальной температурой промывочного агента-холодоносителя, нагнетаемого в бурильные трубы, с помощью аналитических зависимостей, описывающих температурный режим бурящейся скважины [1, 2]. Все это позволяет проследить влияние физических свойств холодоносителя, условий промывки (продувки), параметров режима бурения на эффективность замораживания проходимых пород, обосновать рациональную технологию этого нового прогрессивного способа бурения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудряшов Б. Б. Анализ, расчет и вопросы регулирования температурного режима бурящейся скважины. Записки Ленингр. горн. ин-та, т. 57, вып. 2, 1969.
2. Кудряшов Б. Б. Нормализация температурного режима скважин при бурении по многолетнемерзлым породам с очисткой забоя воздухом. Записки Ленингр. горн. ин-та, т. 57, вып. 2, 1969.
3. Кудряшов Б. Б., Чистяков В. К. Принципы расчета параметров бурения с одновременным замораживанием проходимых пород. Записки Ленингр. горн. ин-та, т. 57, вып. 2, 1969.
4. Мазуров Г. П. Физико-механические свойства мерзлых грунтов. М.—Л., Стройиздат, 1964.
5. Рыкалин Н. Н. Тепловые основы сварки. Ч. 1. М.—Л., АН СССР, 1947.
6. Чистяков В. К. Исследование процесса бурения скважин с одновременным замораживанием проходимых пород. Автореф. канд. дисс. Изд. Ленингр. горн. ин-та, 1969.
7. Чистяков В. К. Исследование процесса бурения скважин с одновременным замораживанием влагонасыщенного песка. В сб.: Новые исследования в геологии. Изд. Ленингр. горн. ин-та, 1969.
8. Чистяков В. К. Приближенное решение задачи о промерзании пород забоя при бурении скважины. Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых Севера. (Тезисы докладов.) Изд. Ленингр. горн. ин-та, 1970.
9. Rosenthal D. E. The theory of moving sources of heat and application to metal treatments. — Trans. ASME, 68, 849, 1946.