

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА КЕРНА МЕРЗЛЫХ ПОРОД

В. И. Коваленко

В процессе бурения за счет механической работы породоразрушающего инструмента в призабойной зоне выделяется тепло. В результате происходит нарушение естественного температурного и агрегатного состояния керна мерзлых пород. Изучение механизма протаивания керна мерзлых пород при бурении, выяснение закономерностей процесса протаивания для сознательного регулирования и нормализации его температурного режима имеет практическое значение.

Точное решение [5] нестационарной задачи о прогреве бесконечного цилиндра при постоянной температуре его поверхности на протяжении всего процесса теплообмена сложно и неудобно для практических расчетов. Кроме того, протаивание керна связано с изменением агрегатного состояния грунта, что не учитывается упомянутым решением.

Исследование процессов протаивания грунта — проблема сложная; при ее решении требуется рассматривать и учитывать совместно действующие внешние и внутренние факторы механизма передачи тепла, а также фазовое состояние влаги. Кроме того, необходимо принимать во внимание цилиндрическую форму керна. Все это не позволяет решить указанную задачу математически точно. Имеющиеся решения задачи о протаивании пород [2, 4, 5] являются приближенными с определением границы раздела мерзлой и немерзлой зон. Эти приближенные решения задачи о промерзании (протаивании) грунта, а также близкой к ней задачи о застывании жидкости в цилиндрическом сосуде при внешнем охлаждении изучены на основе упрощенных допущений или же не могут быть применены ввиду их сложности.

Протаивание с поверхности дает возможность упростить постановку задачи. Принимаем следующие основные допущения: 1) начальная температура в теле керна постоянна и равна естественной температуре пород на данной глубине; 2) в любой отдельно взятый момент распределение температур по радиусу в мерзлой и оттаявшей зонах прямолинейно.

Рассмотрим процесс теплообмена в тающем керне радиуса R . В начальный момент времени на поверхности керна устанавливается некоторая температура, которая всегда выше температуры оттаивания и равна температуре циркулирующего в скважине агента. В результате происходит оттаивание керна на глубину z . Между мерзлой и немерзлой зонами

породы имеется граница, на которой происходит переход из одного агрегатного состояния в другое, для чего требуется скрытая теплота плавления льда ρ (теплота фазового перехода).

Для распределения температуры в немерзлой зоне керна (рис. 1) имеем выражение

$$T_1 = t_{\text{арп}} + \frac{t_{\text{ср}} - t_{\text{арп}}}{R - \eta} (r - \eta), \quad (1)$$

$$T_1 = t_{\text{арп}} \text{ при } r = \eta, \quad T_1 = t_{\text{ср}} \text{ при } r = R.$$

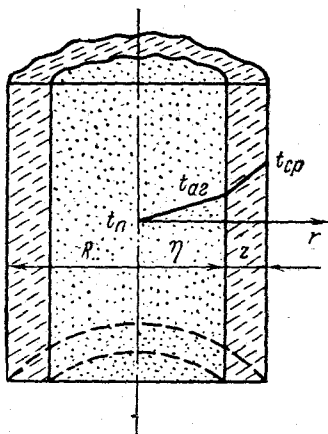


Рис. 1. Условное распределение температуры в теле протаивающего керна (к выводу приближенной аналитической зависимости для описания его температурного режима)

Распределение температуры в мерзлой зоне

$$T_2 = t_{\text{п}} + \frac{t_{\text{арп}} - t_{\text{п}}}{\eta} r, \quad (2)$$

$$T_2 = t_{\text{п}} \text{ при } r = 0, \quad T_2 = t_{\text{арп}} \text{ при } r = \eta.$$

В формулах $t_{\text{арп}}$ и $t_{\text{п}}$ — температура агрегатного перехода и породы, °C; $t_{\text{ср}}$ — средняя температура омывающей керна среды, °C; r — текущая координата, м; R и η — радиусы соответственно керна и незатронутой протаиваемой зоны, м.

Воспользовавшись известным соотношением Стефана, получим связь между радиусом протаявшей и мерзлой зон керна

$$\lambda_1 \frac{dT_1}{dr} - \lambda_2 \frac{dT_2}{dr} = -\rho W \gamma \frac{d\eta}{d\tau}, \quad (3)$$

где λ_1, λ_2 — соответственно теплопроводность немерзлой и мерзлой породы, ккал/(м²·ч·°C); W — эффективная влажность, доли единицы; γ — плотность породы, кг/м³.

Подставляя первые производные температуры по радиусу в немерзлой и мерзлой зонах в уравнение (3), после решения получим *

$$\tau = \frac{\rho W \gamma}{b^3} (Rb + a) \left[(R - \eta) b - a \ln \frac{a + b}{a + b\eta} \right] - \frac{b^2}{2} (R^2 - \eta^2), \quad (4)$$

$$a = R \lambda_2 t_{\text{п}};$$

$$b = \lambda_1 t_{\text{ср}} - \lambda_2 t_{\text{п}}.$$

* Решение задачи получено совместно с Б. Б. Кудряшовым.

Для анализа полученного решения проведены расчеты на ЭВМ «Проминь» при следующих исходных данных: диаметр керна 0,1 м; порода — мерзлый суглинок с объемным весом $\gamma = 1600 \text{ кг/м}^3$; λ_1 и λ_2 принималась равной 1,09 и 1,41 ккал/(м·ч·°С) соответственно; температура пород t_n составляла -1 ; -2 ; -3 ; -5 ; -7 и -10°C ; температура омывающей керна среды t_{cp} была $+10$; $+7$; $+5$; $+3$ и $+1^\circ\text{C}$; теплота фазового перехода $\rho = 80 \text{ ккал/кг}$.

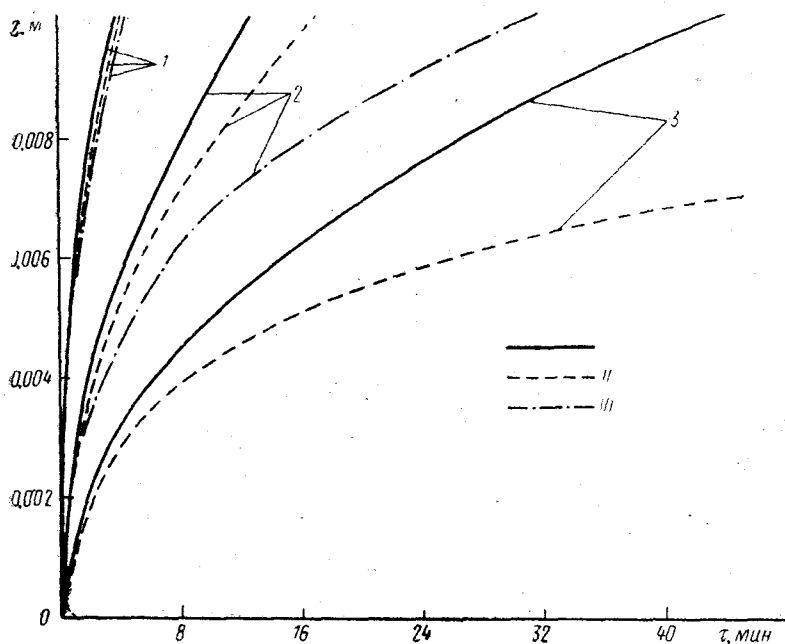


Рис. 2. Расчетная зависимость времени протаивания керна от температуры омывающего воздуха при различных значениях температуры породы: I, II, III — соответственно -1 ; -3 ; -5°C
Температура среды: $+10$ (I); $+3$ (2); $+1$ C(3)

Результаты расчетов приведены в виде графических зависимостей на рис. 2. При сравнительно большой температуре омывающей керна среды ($+10^\circ\text{C}$) керна протаивает очень быстро, причем время протаивания породы практически не зависит от естественной (первоначальной) температуры пород. С уменьшением температуры воздуха температура циркулирующей среды начинает влиять на продолжительность протаивания в сторону увеличения. Так, если керна протаивает на глубину 1 см при $t_{cp} = +10^\circ\text{C}$ за 4 мин, то при $t_{cp} = +1^\circ\text{C}$ на ту же глубину за 44 мин.

Для проверки полученных теоретических зависимостей и отработки рациональных режимных параметров бурения, при которых не происходило бы растепление керна, проведены эксперименты в лаборатории. Циркулирующим агентом служил сжатый воздух, предварительно охлажденный в охлаждающей системе. Для разбуривания применялись искусственно приготовленные блоки мерзлых пород (табл. 1). Всего проведено 22 опыта и пробурено 15 м по блокам мерзлых грунтов.

Таблица 1

Гранулометрический состав и физико-механические свойства мерзлых пород

Составляющие грунта	Содержание фракций, %				Влажность, %	Объемный вес, т/м ³
	до 10 мм	10—2 мм	2—0,2 мм	менее 0,2 мм		
Среднезернистый песок . .	—	—	92	8	20	2,1
Порошок бентонитовой глины	—	—	—	100	32	1,9
Смесь щебня и песка . . .	27	12	54	7	12	2,3
Смесь среднезернистого песка и порошка бентонитовой глины	—	—	62	38	19	1,8

Состояние грунта контролировалось сравнением удельного электросопротивления перед началом и после бурения, так как всякое изменение температуры породы влечет резкое изменение удельного электросопротивления. Из табл. 2 видно, что наиболее резкое изменение удельного электросопротивления наблюдалось при бурении без применения продувки скважины и с применением в качестве циркулирующего агента теплого сжатого воздуха (опыты 3, 8). Наиболее уменьшается удельное электросопротивление при применении горячего (+25°C) воздуха. Это можно объяснить тем, что, кроме поглощения керном тепла, выделяющегося за счет механической работы инструмента на забое, происходит передача тепла от сжатого воздуха. Но, хотя керн оттаивает интенсивнее, механическая скорость бурения выше (см. опыты 2 и 3). В опытах 4 и 5 наблюдалось повышение удельного электросопротивления, что объясняется дополнительным промораживанием грунта. При проведении опыта 7 давление сжатого воздуха резко повышалось (до 7 атм).

При бурении по блоку из смеси щебня и песка, при условии подачи сжатого воздуха с температурой 4—5°C, никакого оттаивания породы не происходило даже при встрече довольно крупных включений гранитного щебня. В случае подачи на забой горячего воздуха керн растеплялся на глубину 1—1,5 см (опыт 8).

Необходимо отметить, что помимо сохранения керна в естественном состоянии при бурении с продувкой охлажденным воздухом увеличивается механическая скорость бурения в 1,5—3 раза.

Полученные данные экспериментального бурения в лаборатории подтвердились производственными экспериментами [1, 3].

Выводы

1. В результате приближенного решения задачи о протаивании мерзлого керна получена простая формула, учитывающая физические и теплофизические свойства породы в немерзлой и мерзлой зонах, начальную температуру породы, теплоту фазового перехода, температуру циркулирующего агента и продолжительность процесса протаивания. Справедливость полученной аналитической зависимости, описывающей температурный режим керна, подтверждена лабораторными исследованиями.

Результаты экспериментального бурения

Номер опыта	Состав грунта	Диаметр бурения, мм	Тип коронки	Температура грунта в блоке, °С	Режимные параметры бурения					Температура воздуха, °С					Механическая скорость бурения, м/ч	Удельное электро-сопротивление, Ом·м	
					расход воздуха, м³/мин	давление воздуха, кг/см²	скорость вращения снаряда, об/мин	осевая нагрузка на забой, кг	из компрессора	из 1-й ступени охлаждения	в скважину	из скважины	в блоке	в керне			
1	Супесь	76	СМ-1 (усиленная)	-1,5	—	—	68	350	—	—	—	—	4,2	25,66	12,98		
2	"	76	СМ-1	-1,4	—	—	121	600	—	—	—	—	4,5	23,54	9,36		
3	"	76	СМ-1	-1,4	3,0	3,0	68	600	+35	+25	+25	+5	7,0	22,64	6,04		
4	Глина	76/93	КР-4	-1,0	1,0	3—4	121	600	+36	+5	-9	-5	10,8	72,46	90,57		
5	"	76/93	КР-4	-1,0	4,0	3,0	68	600	+40	+5	-9	-6	11,2	73,96	93,59		
6	"	76	МР-2НП-1	-0,4	3,0	3,0	68	450	+40	+6	-4	-3	13,2	39,24	39,54		
7	"	76	МП-2НП-1	-0,4	3,0	3,5—4,0	6,8	600	+50	+6	-4	-3,5	14,0	38,34	37,74		
8	Смесь песка и щебня	76	СМ-1 (усиленная)	-7,0	3,0	3,5—5,0	121	500	+51	—	+30	+5	5,0	—	—		

2. Расчеты, проведенные на основе полученной аналитической зависимости, описывающей протаивание мерзлого керна, позволили выявить степень влияния различных факторов на глубину протаивания керна в процессе бурения и определить требования к температуре омывающего керна воздуха.

3. Применение охлажденного воздуха в качестве циркулирующей среды является эффективным технологическим средством устранения осложнений повышения выхода и качества керна при бурении в мерзлых породах.

4. На основании экспериментальных исследований в лаборатории определены рациональные технологические режимы проходки скважин в грунтах различного гранулометрического состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко В. И. Обеспечение естественной структуры керна мерзлых пород при инженерно-геологических изысканиях. В сб. Новые исследования в геологии. Изд. Ленингр. горн. ин-та, 1969.

2. Колесников А. Т. К изменению математической формулировки задачи о промерзании грунта. ДАН СССР, Новая серия, т. 82, № 6, 1952.

3. Кудряшов Б. Б. и др. Эффективный способ повышения выхода и качества керна в мерзлых породах. Записки Ленингр. горн. ин-та, т. 57, вып. 2, 1969.

4. Лукьянов В. С. Гидравлические приборы для технических расчетов. Известия АН СССР, ОТН, № 2, 1939.

5. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., «Высшая школа», 1967.