Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XXI, вып. 2, 1976 г.

ТЕПЛООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СТЕРИЛЬНОМ ОТБОРЕ ПРОБ ИЗ ЛЕДОВОГО КЕРНА ДЛЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б.Б.КУДРЯШОВ, Н.Е.БОБИН

Тепловой способ бурения по снежно-фирновым и ледовым отложениям в труднодоступных районах имеет ряд преимуществ перед обычными механическими способами бурения. Он не требует тяжеловесного оборудования и больших энергетических затрат, обеспечивает высокое качество и 100%-ный выход керна, который может быть использован для широкого круга исследований: гляциологических, петрографических, кристалломорфологических, геохимических и др. При микробиологическом изучении глубоких горизонтов ледниковых отложений тепловой способ бурения является незаменимым, поскольку позволяет обеспечить стерильный отбор проб.

При отборе микробиологических проб необходимо соблюдать два основных условия: 1) исключить возможность попадания в пробу посторонних микроорганизмов из окружающей среды; 2) обеспечить сохранение жизнеспособности микроорганизмов, находящихся во льду в анабиотическом состоянии.

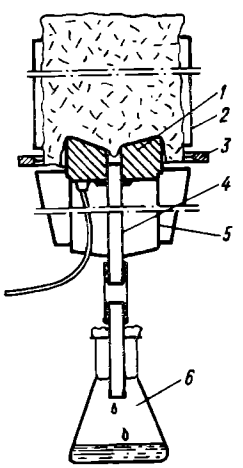


Рис.1. Схема установки УСЛ-3

Работами Лаборатории космической микробиологии ИНМИ АН СССР установлено [1], что лед практически непроницаем для микроорганизмов. Таким образом, первое условие может быть соблюдено, если проводить отбор пробы из внутренней части образца льда.

Существуют микроорганизмы, для жизнедеятельности которых температура плюс 20-30°С является предельной. Поэтому для соблюдения второго условия температурный режим при отборе таких проб должен быть задан достаточно жестко.

Основой разработанного в ЛПИ комплекса для проведения микробиологических исследований глубоких горизонтов ледниковых отложений является установка УСЛ-3 (рис.1), состоящая из нагревателя 1, укрепленного на гильзе 5, водосборной трубки 4, герметично подсоединенной к центральному отверстию нагревателя, скалывающего уст-

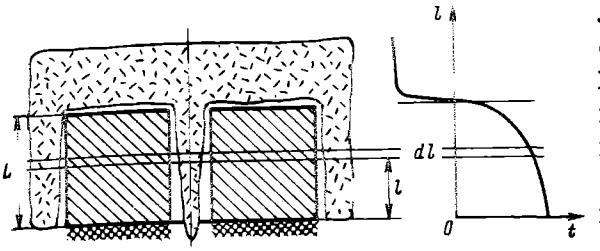


Рис.2. Схема к выводу исходного дифференциального уравнения теплового баланса

ройства 3, направляющего цилиндра 2 и приемной емкости 6, смонтированных на штативе. Пробу отбирают вытаиванием внутренней части ледового керна. При этом наружный не растаявший слой льда служит экраном, изолирующим пробу от окружающей среды и препятствующим попаданию в нее посторонних микроорганизмов.

Для выявления границ режимных параметров, при которых микроорганизмы, находящиеся во льду в состоянии анабиоза, сохранят свою жизнеспособность, необходимо детально проанализировать теплообменные процессы, определяющие вытаивание пробы из ледового керна.

При анализе теплообменных процессов на забое при бурении-протаивании нагреватель установки УСЛ-3 можно рассматривать как находящееся в тепловом взаимодействии с ледовым забоем и окружающей средой толстостенное кольцо с равномерно распределенным внутренним источником тепла [2,3]. При этом можно не учитывать незначительной конусности рабочего торца, приданной ему для обеспечения стока образующейся воды в центральный канал.

Пренебрегая потерями тепла на нижнем торце нагревателя (который из экономических соображений целесообразно изолировать), начало координат поместим внизу (рис.2). Тогда для баланса тепла на элементарном участке dl на расстоянии l от начала координат будет справедливо дифференциальное уравнение

$$\frac{\pi}{4}\left(D^2-d^2\right)q_V dl-\pi(D+d)(t-t')\,\alpha dl=\frac{\pi}{4}\left(D^2-d^2\right)\lambda_н\left(\frac{dt}{dl_{(l)}}-\frac{dt}{dl_{(l+dl)}}\right), \qquad (1)$$

где D и d – наружный и внутренний диаметры нагревателя, м; q_V – удельная объемная теплопроизводительность нагревателя, Вт/м^3; l – текущая координата, м; t и t' – температура соответственно боковой поверхности нагревателя и окружающей нагреватель среды, ^{0}С; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м$^2\cdot{}^0$С); $\lambda_н$ – коэффициент теплопроводности материала нагревателя, Вт/(м$\cdot{}^0$С).

Это уравнение приводится к общепринятой форме неоднородного линейного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами

$$\frac{d^2t}{dl^2}-\frac{4\alpha}{\lambda_н(D-d)}t+\frac{4\alpha}{\lambda_н(D-d)}t'+\frac{q_V}{\lambda}=0. \qquad (2)$$

Принимая для дальнейших построений $t' = 0$ и введя сокращающие обозначения

$$A = \frac{4\alpha}{\lambda_н (D - d)}; \quad B = \frac{q_V}{\lambda_н},$$

получим

$$\frac{d^2 t}{dl^2} - At = -B \tag{3}$$

Общее решение уравнения (3) имеет вид

$$t = C_1 e^{\sqrt{A}l} + C_2 e^{-\sqrt{A}l} + \frac{B}{A}. \tag{4}$$

Постоянные интегрирования найдем из граничных условий. На нижнем торце нагревателя, где процесс теплообмена прекращается, т.е. при $l = 0$

$$\frac{dt}{dl} = C_1 \sqrt{A} e^{\sqrt{A}\cdot 0} - C_2 \sqrt{A} e^{-\sqrt{A}\cdot 0} = 0,$$

откуда

$$C_1 \sqrt{A} - C_2 \sqrt{A} = 0; \quad C_1 = C_2 = C.$$

Верхний рабочий торец нагревателя при установившемся процессе протаивания имеет некоторую температуру $t_т$, отличающуюся от нулевой в положительную сторону из-за теплового сопротивления непрерывно образующейся водяной прослойки, т.е. при $l = L$

$$t_т = Ce^{\sqrt{A}L} + Ce^{-\sqrt{A}L} + \frac{B}{A},$$

откуда

$$C = \frac{t_т - \frac{B}{A}}{e^{\sqrt{A}L} + e^{-\sqrt{A}L}}.$$

Подставив значение C в общее решение для распределения температуры в теле нагревателя при установившемся режиме, получим окончательно

$$t = \left(t_т - \frac{B}{A}\right) \frac{e^{\sqrt{A}l} + e^{-\sqrt{A}l}}{e^{\sqrt{A}L} + e^{-\sqrt{A}L}} + \frac{B}{A}. \tag{5}$$

Зная характер распределения температуры в теле нагревателя (5), можно определить удельный тепловой поток с его верхнего рабочего торца как

$$Q_т = -\lambda_н \left(\frac{dt}{dl}\right)_{l=L} = -\lambda_н \left(t_т - \frac{B}{A}\right) \sqrt{A} \frac{e^{\sqrt{A}L} - e^{-\sqrt{A}L}}{e^{\sqrt{A}L} + e^{-\sqrt{A}L}}. \tag{6}$$

При установившемся режиме работы нагревателя тепловой поток, идущий с его рабочего торца, расходуется на нагрев воды в пленке между нагревателем и льдом $Q_в$ плавление льда $Q_{пл}$ и создание температурного поля во льду впереди забоя $Q_п$:

$$Q_т = Q_в + Q_{пл} + Q_п. \qquad (7)$$

На основе методики движущегося теплового источника можно показать [2, 3], что для удельного теплового потока, идущего на создание квазистационарного температурного поля впереди движущегося забоя в условиях установившегося режима протаивания, справедливо выражение

$$Q_п = (t_{агр} - t_л)\frac{\lambda_л}{a_л} v \ , \qquad (8)$$

где $t_{агр}$ – температура агрегатного перехода (плавления льда), °С; $t_л$ – естественная температура льда в массиве, °С; $\lambda_л$ – коэффициент теплопроводности льда, Вт/(м·°С); $a_л$ – коэффициент температуропроводности льда, $м^2/с$; v – установившаяся скорость бурения-протаивания, м/ч.

Подставив значение $a_л = \frac{\lambda_л}{c_л \gamma_л}$ в формулу (8), получим

$$Q_п = (t_{агр} - t_л) c_л \gamma_л v \ , \qquad (9)$$

где $c_л$ – теплоемкость льда, кДж/(кг·°С); $\gamma_л$ – плотность льда, $кг/м^3$.

Удельное количество тепла, затрачиваемое на нагрев воды,

$$Q_в = c_в \gamma_в t_{ср} v,$$

где $c_в$ – теплоемкость воды, кДж/(кг·°С); $\gamma_в$ – плотность воды, $кг/м^3$; $t_{ср}$ – средняя температура воды в пленке между рабочим торцом нагревателя и льдом, °С.

Учитывая малую толщину пленки воды (десятые доли миллиметра), характер изменения температуры в ней можно принять прямолинейным, тогда

$$t_{ср} = \frac{t_т - t_{агр}}{2} = \frac{t_т}{2},$$

откуда

$$Q_в = \frac{1}{2} c_в \gamma_в t_т v \qquad (10)$$

Удельное количество тепла, затрачиваемое на плавление льда,

$$Q_{пл} = \rho \gamma_л v, \qquad (11)$$

где ρ – скрытая теплота плавления льда, кДж/кг.

Приравняв формулы (6) и (7) и подставив значения для $Q_в$ $Q_{пл}$ и $Q_п$, получим

$$\lambda_н \left(\frac{B}{A} - t_т\right) \sqrt{A}\, th \sqrt{A} L = \rho \gamma_л v + \frac{1}{2} c_в \gamma_в t_т v + (t_{агр} - t_л) c_л \gamma_л v. \qquad (12)$$

Таким образом, для температуры рабочего торца справедливо выражение

$$t_т = \frac{B}{A} - \frac{v}{\lambda_н \sqrt{A}} \left[(t_{агр} - t_л) c_л \gamma_л + \frac{c_в \gamma_в t_т}{2} + \rho \gamma_л \right] \operatorname{ctg} \sqrt{A} L . \qquad (13)$$

В процессе бурения-протаивания на контакте лед – нагреватель всегда присутствует пленка воды. При наличии внутреннего конуса практически вся образующаяся вода движется в сторону центрального канала нагревателя. При установившемся режиме бурения давление на забой P, равное весу образца льда P_1, уравновешивается гидравлическим сопротивлением непрерывно движущейся пленки воды P_2, которое определяется формулой Дарси-Вейсбаха

$$P_1 = P_2 = \lambda \frac{\gamma_в w^2}{2 g D_э} S , \qquad (14)$$

где λ – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления; w – средняя по сечению канала объемная скорость движения жидкости, м/с; g = = 9,81 – ускорение земного тяготения, м/с^2; $D_э$ и S – эквивалентный диаметр и длина канала потока, м.

Для упрощения задачи можно пренебречь изменением давления и толщины пленки по радиусу, рассматривая ее в вертикальном сечении радиального канала на окружности, делящей площадь рабочего торца на две равные части. Через это сечение в единицу времени проходит половина объема воды, образующейся в процессе плавления льда, что наиболее просто позволяет оценить гидравлическое давление пленки в средней части рабочего торца. При этих предположениях значение S в формуле (14) равно расстоянию от кромки центрального канала до рассматриваемого сечения, а $D_э$ определяется из выражения

$$D_э = \frac{4f}{П} , \qquad (15)$$

где f – площадь сечения вертикального кольцевого канала, м^2; $П$ – смоченный периметр вертикального кольцевого канала, м.

Из выражения (15) для нашего случая получим

$$D_э = 2\delta ,$$

где δ – толщина пленки воды между рабочим торцом нагревателя и льдом, м.

Поскольку толщина этой пленки очень мала, режим движения жидкости в ней будет ламинарным. В этом случае коэффициент гидравлического сопротивления λ определяется формулой Стокса:

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64 \nu}{2 w \delta} , \qquad (16)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости воды в пленке, м^2/с.

Скорость движения жидкости w определяется объемом воды, получаемой при плавлении льда в единицу времени V и площадью поперечного сечения канала f :

$$w = \frac{V}{2f} = 4{,}91 \cdot 10^{-5} \frac{(D^2 - d^2)v}{\delta\sqrt{D^2 + d^2}}, \qquad (17)$$

так как

$$V = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} v \; ; \quad f = \pi\sqrt{\frac{D^2 + d^2}{2}}\delta$$

Подставив в формулу (14) значения $D_э$, λ и w, получим

$$P = 3{,}928 \cdot 10^{-4} \frac{\nu\gamma_в v(D^2 - d^2)S}{g\delta^3\sqrt{D^2 + d^2}}. \qquad (18)$$

Решив это уравнение относительно δ найдем

$$\delta = 0{,}0732\sqrt[3]{\frac{\nu\gamma_в v(D^2 - d^2)S}{gP\sqrt{D^2 + d^2}}}. \qquad (19)$$

Удельный тепловой поток, проходящий через пленку воды от торца нагревателя в лед,

$$q = \frac{\lambda_в}{\delta}(t_т - t_{згр}). \qquad (20)$$

Этот тепловой поток расходуется на плавление льда $Q_{пл}$ и создание температурного поля во льду впереди забоя $Q_п$ т.е.

$$q = Q_{пл} + Q_п. \qquad (21)$$

Приравняв выражение (20) сумме выражений (9) и (11) и решив относительно δ, получим

$$\delta = \frac{\lambda_в t_т}{\rho\gamma_л v - c_л\gamma_л v t_л} = \frac{\lambda_в t_т}{\gamma_л v(\rho - c_л t_л)} \qquad (22)$$

Имея теперь для δ два независимых выражения (19) и (22) и приравняв их, находим аналитическую зависимость скорости бурения-плавления от температуры рабочего торца нагревателя

$$\frac{\lambda_в t_т}{\gamma_л v(\rho - c_л t_л)} = 0{,}0732\sqrt[3]{\frac{\nu\gamma_в v(D^2 - d^2)S}{gP\sqrt{D^2 + d^2}}},$$

откуда

$$v = 7{,}106\left[\frac{\lambda_в t_т}{\gamma_л(\rho - c_л t_л)}\right]^{0{,}75}\left[\frac{\sqrt{D^2 + d^2}\,gP}{\nu\gamma_в(D^2 - d^2)S}\right]^{0{,}25} \qquad (23)$$

Для удобства дальнейших выкладок введем сокращающее обозначение

$$M=\left[\frac{\lambda_в}{\gamma_л(\rho-c_л t_л)}\right]^{0,75}\left[\frac{gP\sqrt{D^2+d^2}}{\nu\gamma_в(D^2-d^2)S}\right]^{0,25}$$

Тогда

$$v = 7,106\,M\,t_т^{0,75} \qquad (24)$$

Подставив выражение (24) в соотношение (13), получим, наконец, для температуры торца $t_т$ трансцендентное уравнение, в которое входят лишь заранее известные или независимо вычисляемые величины:

$$t_т=\frac{B}{A}-\frac{7,106\,M\,t^{0,75}}{\lambda_н\sqrt{A}}\left[c_л\gamma_л(t_{агр}-t_л)+\frac{1}{2}c_в\gamma_в t_т+\rho\gamma_л\right]cth\sqrt{A}L\,. \qquad (25)$$

Решая это уравнение методом последовательных приближений, можно определить температуру рабочего торца нагревателя.

Рассмотрим пример расчета температуры при рабочем торце алюминиевого литого нагревателя установки УСЛ-3.

И с х о д н ы е д а н н ы е д л я р а с ч е т а. Электрическая мощность нагревателя 1,25 кВт; габаритные размеры: D = 90 мм; d = = 10 мм; L = 40 мм; коэффициент теплопроводности материала нагревателя (алюминий) $\lambda_н$ = 206 Вт/(м·°С); естественная температура льда $t_л$ =55°С; свойства льда: $\gamma_л$ = 920 кг/м³; $c_л$ = 2,26 кДж/(кг·°С) = 0,6278 Вт·ч/(кг·°С); $\lambda_л$ = 2,25 Вт/(м·°С); ρ = 335 кДж/кг = = 93,04 Вт·ч/кг; свойства воды: $\gamma_в$ = 1000 кг/м³; $c_в$ = 4,187 кДж/(кг·°С)= 1,163 Вт·ч/(кг·°С); $\lambda_в$ = 0,580 Вт/(м·°С); ν = 1,3 · 10^{-6} м²/с. Толщина воздушной прослойки между боковыми поверхностями нагревателя и льдом Δ = 2÷3 мм. В этом случае теплоотдачу от боковых поверхностей нагревателя можно рассматривать как теплоотдачу в ограниченном пространстве. В таких условиях теплопередача от горячей стенки к холодной обуславливается только теплопроводностью жидкости (в данном случае – воздуха), т.е. можно принять [4], что

$$\alpha = \lambda_{возд} / \Delta \quad Вт/(м^2\cdot°С); \quad \lambda_{возд} = 0,025\ Вт/(м\cdot°С);$$

$$\Delta = 0,0025\ м.$$

Среднее давление льда на рабочий торец нагревателя, равное половине веса ледового керна диаметром 120 мм и длиной 800 мм, составляет 4,15 кг. Удельное давление на торец нагревателя

$$P = \frac{4,15}{0,00628} = 660,8\ кг/м^2.$$

Полученное при указанных исходных данных значение температуры рабочего торца нагревателя $t_т$ = 9,75°С.

В рамках принятых нами исходных данных результат проведенного расчета убедительно подтверждает, что условия отбора микробиологических проб на установке УСЛ-3 вполне обеспечивают жизнеспособность микроорганизмов, находившихся во льду в анабиотическом состоянии.

В ходе лабораторных испытаний установки УСЛ-3 проводились непосредственные замеры температуры на торце нагревателя при отборе микробиологических проб. Измерения выполнялись с помощью хромель-капелевой термопары, смонтированной на торце нагревателя в наиболее нагретой его части - у центрального отверстия, и зеркального гальванометра М-II5/I. При многократных замерах в процессе выплавления пробы температура торца колебалась в пределах плюс 6-I3°С в зависимости от начальной температуры льда.

Выводы

I. Расчетные данные хорошо совпадают с опытными и дают основание считать, что предложенный способ отбора микробиологических проб вполне обеспечивает условия для жизнедеятельности микроорганизмов, находившихся во льду в состоянии анабиоза.

2. Полученные аналитические зависимости могут быть использованы для практических расчетов в целях совершенствования конструкций и повышения эффективности коронок - нагревателей термобуровых снарядов.

ЛИТЕРАТУРА

Имшенецкий А.А., Абызов С.С. Метод микробиологического анализа метеоритов и горных пород, исключающий возможность загрязнения проб посторонней микрофлорой. - В кн.: Микробиология, т.35, вып.3. М., Изд-во АН СССР, 1966.

2. Кудряшов Б.Б. Бурение-протаивание льда в Антарктиде. - В кн.: Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых Севера. Изд.ЛГИ, 1970.

3. Кудряшов Б.Б., Фисенко В.Ф. К теории бурения-протаивания снежно-фирновых отложений и льдов Антарктиды. - В кн.: Д-ды Междуведомственной комиссии по изучению Антарктики, вып.12. М., „Наука", 1973.

4. Михеев М.А. Основы теплопередачи. М., „Энергия", 1973.