

УДК 536.71

К вопросу поддержания необходимого диаметра участка скважины тепловым способом

Канд. техн. наук **Дмитриев А.Н.** 123456789nika@mail.ru

Зими́на Д.А. ziminadar@yandex.ru

Санкт-Петербургский государственный горный университет
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2

Заключительным этапом работ проводимых в скважине 5Г после вскрытия ею подледникового озера Восток, является замерзание поднявшейся в скважину озёрной воды на определённую высоту, что подразумевается технологией буровых работ. Далее осуществляется повторное бурение скважины, что позволяет получить керн замёрзший воды озера. Такая чистая технология не нарушает экологию подледникового озера. Для успешного применения разработанной технологии вскрытия подледникового озера Восток, необходимо прогнозировать динамику времени замерзания озёрной воды в скважине. Учитывая сложность экспериментального изучения поставленной задачи, можно провести теоретическое исследование процесса замерзания воды в приконтактном участке ствола скважины с озером. В данной статье приводятся сведения по технологии поддержания в рабочем состоянии выхода скважины в подледниковое озеро в процессе его исследования. Рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением необходимого диаметра и температурного режима скважины вблизи границы лёд-вода (скважина-озеро).

Ключевые слова: Антарктида, глубокое бурение, ледниковый массив, ледяной керн, скважина, вскрытие, озёрная вода, теплообмен, подледниковое озеро Восток.

doi: 10.17586/2310-1148-2016-9-2-1-5

To a question of maintenance of necessary diameter of a site of a well in the thermal way

Ph.D. **Dmitriyev A.N.** 123456789nika@mail.ru

Zimina D.A. ziminadar@yandex.ru

St. Petersburg state Mining University
199106, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 21 lines of 2

The final stage of work carried out in the borehole 5G after uncovering its subglacial Lake Vostok is the freezing of lake water to climb into the borehole to a certain height which meant the drilling technology. Further drilling is carried out repeated for receipt ice core. This clean technology doesn't disturb the ecology of the subglacial lake. For the successful use of developed technology of uncovering subglacial Lake Vostok, it's necessary to predict the dynamics of time freezing of lake water in the borehole. In consideration of complexity of the experimental study of the problem it's possible to undertake a theoretical study process of water freezing in the near-contact of the borehole to the lake. This article provides information on the technology of maintaining in operant condition discharge of borehole in the subglacial lake in the course of its investigation. The considered questions associated with securing of the required diameter and temperature requirements of borehole near the ice-water interface (borehole-lake).

Keywords: Antarctica, deep drilling, ice massif, ice core, borehole, uncovering, lake water, heat exchange, subglacial Lake Vostok.

Благодаря уникальным технологиям, разработанным в Санкт-Петербургском национальном минерально-сырьевом университете «Горный» 5 февраля 2012 года в Антарктиде российскими специалистами с помощью электромеханического бурового комплекса на основе бурового снаряда КЭМС – 132 выполнено вскрытие крупнейшего в мире подледникового озера Восток на глубине 3769,3 м.

Достигнутые результаты открывают перед российскими учёными широкие перспективы проведения комплексных исследований подледникового озера Восток с целью получения новых данных о глобальных изменениях природной среды нашей планеты.

При повторном вскрытии подледникового озера для проведения исследований водной толщи озера, а также его донных осадков предполагается выполнить расширение призабойного участка скважины, который заполнит поднявшиеся в скважину до заданного уровня озёрная вода.

Диаметр этого участка определяется потребным временем работы исследовательской аппаратуры на грузонесущем кабеле в глубинах озера. Возможности по расширению скважины электромеханическим снарядом КЭМС – 132 ограничены диаметром 145 мм, что недостаточно, т.к. требуемый минимальный диаметр призабойного участка скважины во льду составляет 300 мм.

Для безопасного проведения исследований в подледниковом озере необходимо обеспечить сохранность нижнего участка скважины на весь период ведения работ. Для этого должна быть исключена возможность намерзания воды на стенки скважины.

Решение поставленной задачи предполагается реализовать тепловым способом, когда используется мощность электрического нагревателя для интенсивного теплообмена его свободных поверхностей с окружающей средой (водой). Нагретая вода, находящаяся в состоянии естественной конвекции, вызывает необходимое в технологическом отношении расширение скважины.

В горном университете в течение 50 лет ведутся работы по созданию эффективных энергосберегающих технологий и технических средств, для колонкового бурения льда тепловым способом, с помощью которых этим способом в Антарктиде и горных ледниках островов Арктики, пробурено с полным отбором керна более 15 000 метров скважин.

Определим необходимую мощность электрического тока нагревателя для образования нужного диаметра скважины во льду.

Потребляемую мощность электрического тока для образования “лунки” во льду в течение времени можно оценить по формуле [1]:

$$N = k \cdot m \cdot (c \cdot \Delta t + q_l) \cdot \tau^{-1} = 6,84 \text{ Вт} \cdot \text{час}$$

где: m – масса расплавляемого льда; c – удельная теплоёмкость льда, $2,26 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{°C}$; q_l – удельная теплота плавления; Δt – средняя температура льда; k – коэффициент, учитывающий потери тепла, $k = 1,1 \div 1,2$.

Масса льда

$$m = \rho_l \cdot V = \rho_l \cdot F \cdot h = \rho_l \cdot \pi \cdot R^2 h = 64,765 \text{ кг}$$

где: ρ_l – плотность льда, $916,7 \text{ кг/м}^3$; V – объём льда, м^3 ; $h = 1 \text{ м}$; $R = 0,15 \text{ м}$.

В цилиндрической скважине расположим электрический нагреватель определённой мощности. На стационарном режиме количество теплоты N_Q , проходящей сквозь воду к стенке скважины за секунду (мощность теплового потока, Вт), равно мощности N'_Q электрического нагревателя. Уравнение теплового баланса [2]:

$$N_Q = N'_Q,$$

Величина

$$N_Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_v}{\ln \frac{D_{скв}}{D_{нагр}}} \cdot (t_1 - t_2) = 45,72 \text{ Вт}$$

где: $D_{скв}$ – диаметр скважины, $0,300 \text{ м}$; $D_{нагр}$ – диаметр нагревателя, $0,132 \text{ м}$; λ_v – коэффициент теплопроводности воды, $0,597 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$; t_1 – температура воды, $-1,8 \text{ °C}$; t_2 – температура льда, $-2,8 \text{ °C}$; L – длина участка скважины, 10 м .

Величина

$$N'_Q = I \cdot \Delta\varphi,$$

где: I – сила электрического тока, А; $\Delta\varphi$ – разность электрических потенциалов, В.

Максимальная тепловая мощность нагревателя, погружённого при работе в воду, не может превышать значения, при котором удельный тепловой поток с его поверхности равен критической тепловой нагрузке при атмосферном давлении или превышает её [3]:

$$\frac{860 \cdot N}{F_{\text{общ}}} < 1,25 \cdot 10^6, \quad \text{Вт}/\text{м}^2,$$

где: N электрическая мощность нагревателя, кВт; $F_{\text{общ}}$ общая суммарная площадь поверхности нагревателя, м².

Из уравнения (14) получим необходимую мощность нагревателя для поддержания необходимого диаметра призабойного участка скважины:

$$N'_Q = 45,72 \text{ Вт},$$

что не противоречит условию (16).

На основе расчётов с помощью изложенных здесь теоретических положений делаем вывод о целесообразности передачи тепла от рассредоточенного по высоте нагревателя стенкам скважины на их протаивание, что исключает намерзание воды на стенки скважины и обеспечивает требуемый диаметр нижнего участка скважины на весь период ведения исследовательских работ в подледниковом озере.

Спрогнозируем динамику времени замерзания озёрной воды в скважине. Пусть граница промерзания (см. рис. 1.) дана окружностью радиуса R_3 для момента времени τ_3 , считая начало времени с началом промерзания. Тогда за счёт $d\tau_3$ граница промерзания продвинется внутрь на величину dR_3 . Очевидно внутренность радиального сечения скважины разделится на две области: область 2, где жидкость не замёрзла; область 1, где она уже замёрзла.

Связь между положением границы замерзания талой воды в скважине, определяемой расстоянием от этой границы R_3 до оси термобурового снаряда и временем с начала замерзания τ_3 , приближённо описывается выражением, полученным Л.С. Лейбензоном [4]:

$$\frac{R_3^2}{2} \ln\left(\frac{R}{R_3}\right) - \frac{R^2 - R_3^2}{4} = \frac{\lambda_w (t_l - t_{пл})}{\Psi \rho_l} \tau_3, \quad (17)$$

где: λ_w – коэффициент теплопроводности воды, $0,597 \text{ Вт}/\text{м}\cdot^\circ\text{C}$; Ψ – скрытая теплота плавления льда, $3,35 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$; ρ_l – плотность льда, $923 \text{ кг}/\text{м}^3$; t_l – температура льда, $-2,8^\circ\text{C}$; $t_{пл}$ – температура плавления льда, $-2,5^\circ\text{C}$; R – радиус скважины, $0,0685 \text{ м}$.

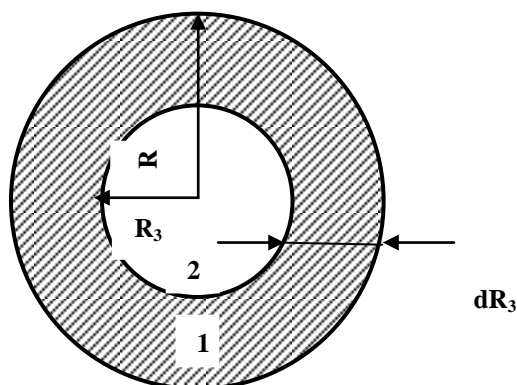


Рис. 1. Радиальное сечение границы замерзания талой воды в стволе скважины

Определим время полного промерзания жидкости. Для этого вводим в уравнение (17) $R_3=0$, что даёт

$$\tau_3 = \frac{\Psi \rho_l R^2}{4\lambda_g (t_{nl} - t_l)}$$

Результаты расчётов времени замерзания жидкости, при различной границе замерзания в радиальном сечении ствола скважины, сведены в таблицу 1 и иллюстрируются графически на рис. 2.

Таблица 1

Результаты расчётов времени замерзания талой воды в скважине

$R_3, \text{ м}$	0,0685	0,065	0,050	0,035	0,020	0,010	0
$\tau_3, \text{ час}$	0	-2,66	73,84	218	396,4	504,2	562,6
$\tau_3, \text{ сут}$	0	-0,11	3,07	9,09	16,52	21	23,44

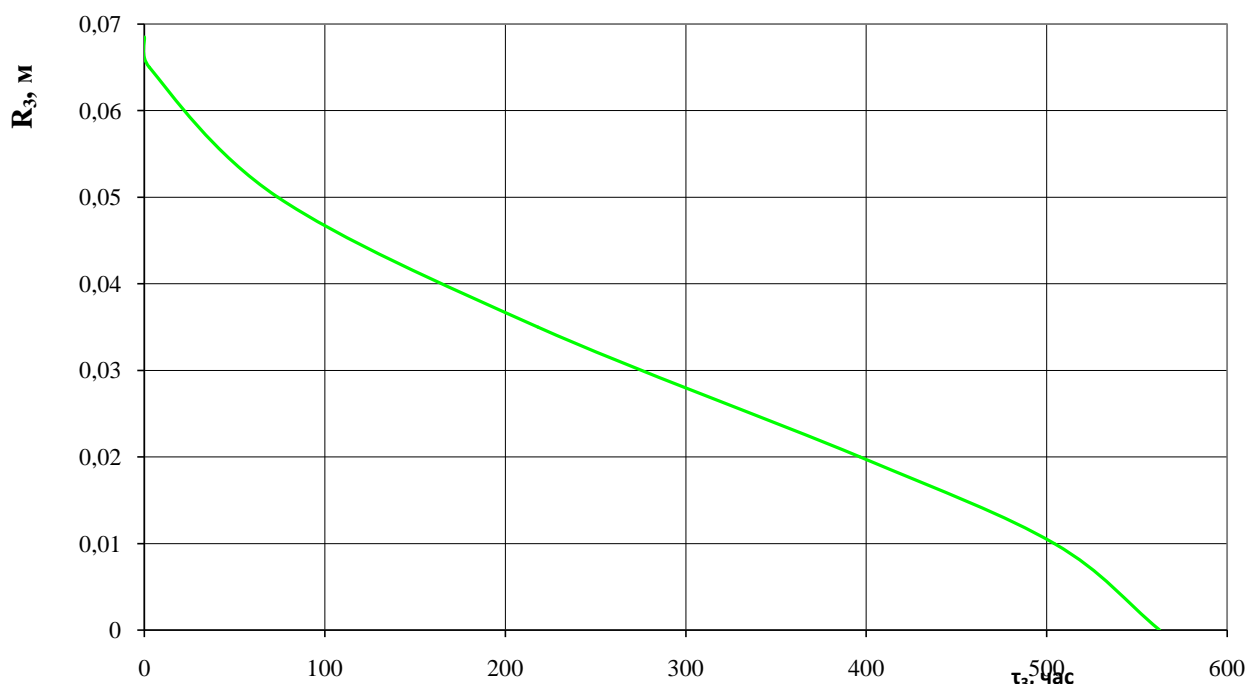


Рис. 2. Расчётная зависимость времени замерзания талой воды от границы замерзания в стволе скважины

Полученные расчётные результаты показывают, что проведение работ по исследованию подледникового озера может быть осуществлено без риска осложнений, связанных с полной кристаллизацией озёрной воды впризабойном участке скважины до того, как исследовательский зонд достигнет границы «лёд-озеро».

Литература

1. *Богородский В.В.* Разрушение льда: методы, технические средства / В.В. Богородский, В.П. Гаврило, О.А. Недошивин // Л.: Гидрометеиздат, 1983 – 232 с.
2. *Веник А.И.* Общая теплотехника: лабораторный практикум / В.А. Бондарев, Л.М. Михайлова, А.Е. Процкий // Минск: «Высшая школа», 1965 – 132 с.
3. *Кудряшов Б.Б., Фисенко В.Ф.* Анализ и пути совершенствования процесса бурения-протаивания во льдах Антарктиды // Труды Советской антарктической экспедиции, т. №60. Л.: Гидрометеиздат, 1972, с. 129 – 143.
4. *Лейбензон Л.С.* Собрание трудов, т. 3 М.: Изд-во АН СССР, 1955, с. 438.
5. *Васильев Н.И., Липенков В.Я., Дмитриев А.Н., Подоляк А.В., Зубков В.М.* Результаты и особенности бурения скважины 5Г и первого вскрытия озера Восток // «Лёд и Снег», № 4 (120), 2012, С.12-20.
6. *Васильев Н.И., Дмитриев А.Н., Блинов П.А.* Бурение глубокой скважины на российской антарктической станции Восток // Вестник ОНЗ РАН, том 4, NZ2001, doi:10.225/2012 NZ000111, 2012
7. V.S. Litvinenko, N.I. Vasiliev, A.N. Dmitriev, V.Y. Lipenkov. Results and peculiarities of hole 5G drilling and first opening of lake Vostok. Proceedings of International scientific and technical Conference named after Leonardo da Vinci. № 1. -Berlin: Wissenschaftliche Welt e. V., 2013, p. 159 – 167.
8. V.S. Litvinenko, N.I. Vasiliev, A.N. Dmitriev, V.Y. Lipenkov, A.V. Podoliak. Special aspect of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok station, Antarctica. Ann. of Glaciol. 2014. Vol. 55 (68). P. 173–178.
9. *Васильев Н.И., Дмитриев А.Н., Подоляк А.В.* Бурение глубоких скважин во льду на российской станции «Восток» // Вестник МАНЭБ, №2 (15), 2015. стр. 21–26.

Статья поступила в редакцию 18.05.2016 г.