

УДК 536.71

К методике определения времени замерзания озёрной воды в скважине*Канд. техн. наук* **Дмитриев А.Н.** 123456789nika@mail.ru**Сербин Д.В.** altaicheese@yandex.ru**Кадочников В.Г.** Kadochnikov93@gmail.com*Санкт-Петербургский государственный горный университет
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2*

Объектами исследований являются технология бурения глубоких скважин во льду и исследования скважин, технология экологически чистого проникновения в подледниковое озеро Восток (Антарктида). Буровые работы в скважине 5Г на российской антарктической станции Восток, проведены по разработанной в Санкт-Петербургском Университете технологии, что позволило вскрыть подледниковое озеро Восток, обеспечив экологическую безопасность реликтового озера. Цель дальнейших научно-исследовательских работ заключается в разработке технологии поддержания в рабочем состоянии выхода скважины в озеро в процессе непосредственного его исследования. В данной статье приводятся результаты расчётов времени замерзания поднявшейся в скважину озёрной воды с “положительной” температурой, после вскрытия подледникового озера, выполненные по независимым методикам. Рассмотрены вопросы температурного режима скважины вблизи границы скважина – подледниковое озеро.

Ключевые слова: Антарктида, глубокое бурение, лёд, ледовый керн, скважина, озёрная вода, теплообмен, подледниковое озеро Восток.

doi: 10.17586/2310-1148-2016-9-2-12-17**To a technique of definition of time of freezing of lake water in a well***Ph.D.* **Dmitriyev A.N.** 123456789nika@mail.ru**Serbin D.V.** altaicheese@yandex.ru**Kadochnikov V.G.** Kadochnikov93@gmail.com*St. Petersburg state Mining University
199106, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 21 lines of 2*

Objects of researching are technology of drilling deep boreholes in ice, technology of researching boreholes and ecologically clean penetration in subglacial Lake Vostok (Antarctica). Drilling operations in the borehole 5G at Russian Antarctic station Vostok had carried out on the technology developed in Saint-Petersburg University, which allowed to uncover subglacial Lake Vostok and allowed to support ecologically safety of relict lake. The goal of further scientific-researching works is to develop a technology of support in working condition the outlet of the borehole in the subglacial lake in process of its researching. This article presents the results of calculations the freezing time of lake water with “positive” temperature, which lifted in the borehole after uncovering subglacial lake, carried out by independent methods. The considered questions of the temperature mode near the boundary “borehole - subglacial Lake Vostok”.

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

Вскрытие подледникового озера Восток в Антарктиде в феврале 2012 г. вызвало большой интерес мирового научного сообщества. Вскрытию предшествовали научные исследования по отработке технологии бурения скважин во льду при температуре близкой к точке фазового перехода.

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, с последующим бурением для отбора проб озёрной воды в виде ледяного керна. 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.

Воспользуемся выражением, полученным Л.С. Лейбензоном [2] для определения времени полного замерзания жидкости на участке скважины при $R_3 = 0$, где R_3 расстояние от границы (радиуса) промерзания озёрной воды в скважине в момент времени τ_3 до оси скважины:

$$\tau_3 = \frac{\Psi \rho_l R^2}{4\lambda_g (t_{пл} - t_l)}, \tag{1}$$

где: λ_g – коэффициент теплопроводности воды, 0,597 Вт/м·°C; Ψ – скрытая теплота плавления льда, $3,35 \cdot 10^5$ Дж/кг; ρ_l – плотность льда, 923 кг/м³; t_l – температура льда, -2,8 °C; $t_{пл}$ – температура плавления льда, -2,5°C; R – радиус скважины, 0,0685м.

Для определения времени замерзания воды, поднявшейся в скважину, в зависимости от расстояния от поверхности озера, введём в формулу (1) значение t_l в функции от этого расстояния, тогда формула (1) примет вид

$$\tau_3 = \frac{\Psi \rho_l R^2}{4\lambda_g (t_{пл} - t_l(h^*))}, \tag{1, a}$$

где: $t_l(h^*)$ – зависимость температуры льда t_l на протяжении всего приконтактного участка ствола скважины с подледниковым озером (~ 30 м) от расстояния h^* до поверхности озера, которая рассчитывается из следующего очевидного выражения

$$t_l(h^*) = -2,8 - \eta h^* = -2,8 - 0,0208h^*$$

где: $\eta = 0,0208$ °C/м, [132] – градиент температуры; -2,8 – температура льда вблизи забоя скважины, °C.

Результаты расчётов сведены в таблицу 1 и представлены графически на рис. 1.

Таблица 1

Результаты расчётов зависимости времени замерзания воды от расстояний приконтактного участка скважины 5Г-1 до поверхности озера

h^* , м	0	5	10	15	20	25	30
τ_3 , час	562,6	417,8	332,2	275,8	235,7	205,8	182,4
τ_3 , сут.	23,5	17,5	13,9	11,5	9,8	8,6	7,5

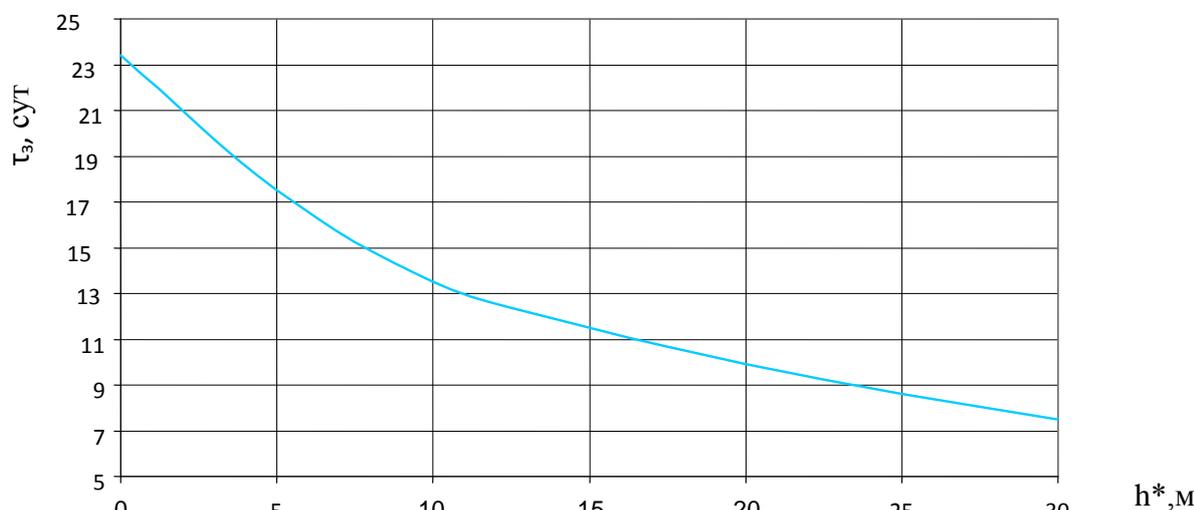


Рис. 1. Зависимость времени замерзания озёрной воды в скважине от расстояний до поверхности подледникового озера

Для сравнения примем методику оценки времени замерзания воды в скважине в результате длительной конвекции. По существующим методикам расчёт теплообмена при естественной конвекции ведётся с помощью эмпирических зависимостей числа Нуссельта Nu , в основном, от произведения чисел Грасгофа и Прандтля.

Проникшая в скважину озёрная вода в смеси с талой водой, образовавшейся в процессе бурения плавлением, будет иметь незначительную положительную температуру. Тепловое движение жидкой среды вдоль ледовой стенки скважины есть классический пример свободной конвекции, включающий на начальном участке теплообмена ламинарный, а затем турбулентный поток.

При этом коэффициент теплоотдачи сначала снижается, затем возрастает и становится постоянным. Перепад температуры Δt между ледовой стенкой и озёрной водой будет меняться как по высоте участка ствола скважины, так и во времени. Рассматриваем перепад температуры как параметр и рассчитываем зависимость затрат времени на замерзание воды от этого параметра.

Поскольку в процессе намерзания воды на стенках скважины температурный перепад будет снижаться, а коэффициент теплоотдачи α в конечном счёте примет нулевое значение, для приближённого учёта этих обстоятельств примем при расчётах половинное значение α .

При этих условиях для процесса замерзания озёрной воды в стволе скважины справедливо балансовое уравнение

$$Q = \frac{\alpha}{2} \pi D H t \tau, \tag{2}$$

Откуда для определения длительности (времени) процесса замерзания τ имеем

$$\tau = \frac{2Q}{\alpha \pi D H t}, \tag{3}$$

Результаты расчётов времени перемерзания ствола скважины от разницы температур озёрной воды и окружающего массива льда, сведены в таблицу 2 и иллюстрируются графически на рисунке 2, где в скобках указана высота от поверхности озера, соответствующая данной разности температур Δt , °С.

Таблица 2

Результаты расчётов времени замерзания озёрной воды в скважине

Δt , °С	3	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.25
Nu	135.15	129.13	122.12	113.65	102.69	86.35	72.61
α , Вт/м·°С	17.64	15.86	13.93	11.76	9.29	6.20	4.14
τ , час	14.69	19.61	27.90	44.07	83.69	250.79	756.16
τ , сут	0.61	0.82	1.16	1.84	3.49	10.45	31.30

Несмотря на всю условность использованных здесь приёмов результаты расчётов представляются правдоподобными, особенно при малых значениях перепада температуры. Полученные данные, выполненные двумя независимыми методами, имеют близкое количественное совпадение при перепаде температур $\Delta t=0,3$ °С, что свидетельствует о достоверности разработанной методике расчётов.

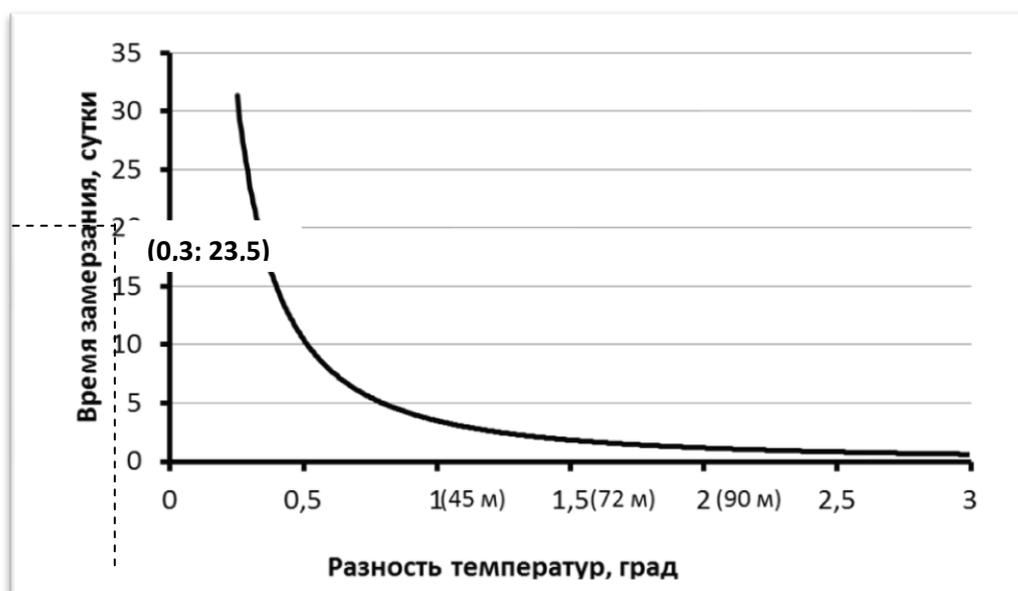


Рис. 2. График зависимости времени замерзания озёрной воды от температуры массива льда

Рассмотрим стационарный процесс теплопередачи от поднявшейся озёрной воды в скважину к холодной цилиндрической стенке массива льда, окружающему скважину. В этом случае дифференциальное уравнение теплопередачи через цилиндрическую стенку имеет вид

$$dQ = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (t_g - t_l) \cdot L}{\ln r} \cdot d\tau, \tag{4}$$

где: L – длина интересующего участка скважины от его забоя (*10 метров*), равному по высоте поднятия озёрной воды в скважине, m ; t_g – температура озёрной воды, $^{\circ}C$; t_l – температура льда, $^{\circ}C$; λ – коэффициент теплопроводности льда, $Вт/м \cdot ^{\circ}C$; r – радиус изотермической цилиндрической поверхности скважины, m ; τ – время, $мин$.

Дифференциальное уравнение теплового баланса для охлаждающейся воды может быть записано в виде

$$dQ = \frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \cdot L \cdot \rho_g \cdot C_g \cdot dt_g, \tag{5}$$

где: D_c – диаметр скважины, m ; ρ_g – плотность воды, $кг/м^3$; C_g – теплоёмкость воды, $Дж/кг \cdot ^{\circ}C$

Приравняв правые части уравнений (4) и (5) и разделяя переменные, получаем после интегрирования по параметру – времени выражение

$$\tau_g = \left(\frac{\rho_g \cdot C_g \cdot D_c}{8 \cdot \lambda} \right) \cdot \ln r \cdot \ln \left(\frac{t_{гн} - t_l}{t_{гк} - t_l} \right), \tag{6}$$

где: $t_{гн}$ – начальная температура воды, $^{\circ}C$; $t_{гк}$ – конечная температура воды, $^{\circ}C$.

Определим время замерзания всего объёма воды, находящейся в скважине при температуре стенки – $2,87^{\circ}C$, (градиент температуры – $0,02 град/метр$).

Дифференциальное уравнение теплопередачи (4) преобразуется к виду

$$Q_z = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (t_g - t_l) \cdot L}{\ln r} \cdot \tau_z, \tag{7}$$

а уравнение теплового баланса для замерзающей воды

$$Q_3 = \frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \cdot L \cdot \rho_6 \cdot q_l, \tag{8}$$

где: q_l – удельная теплота плавления льда, $3,34 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Из совместного решения уравнений (7) и (8) получаем формулу для времени замерзания всей озерной воды в скважине

$$\tau_3 = \frac{\rho_6 \cdot q_l \cdot D_c^2}{8 \cdot \lambda \cdot (t_6 - t_l)} \cdot \ln r, \tag{9}$$

Так как в процессе теплообмена температура жидкости меняется, то будут меняться и её физические свойства. Следовательно, важно условиться о некоторой единой, определяющей температуре, по которой можно было бы рассчитывать необходимые величины. Средняя по длине трубы (скважины) температура жидкости определяется по следующей формуле

$$\bar{t}_{ж} = t_c \pm \Delta t.$$

где: t_c – температура стенки в рассматриваемом сечении, °C; Δt – среднее значение температурного напора, °C. Знак “+” берётся при охлаждении жидкости, знак “-” при нагревании. Разность температур между стенкой и соприкасающейся с ней жидкостью (температурный напор)

$$\Delta t = t_c - t_{ж}$$

Отсюда в нашем случае

$$\Delta t = t_l - t_6 = -2,87 - (-1,8) = -1,07^\circ\text{C}$$

$$\bar{t}_6 = t_l + \Delta t = -2,87 + (-1,07) = -3,94^\circ\text{C}$$

Заменим t_6 в формуле (9) на \bar{t}_6 .

Тогда суммарное время охлаждения воды до “-”°C и её полного замерзания определяется в виде

$$\tau_o = \tau_6 + \tau_3, \tag{10}$$

Таблица 3

Расчётные параметры, соответствующие охлаждению и замерзанию воды в скважине

$D_{\text{скважины}}, \text{мм}$	300	200	140
$\tau_в, \text{сут}$	2,5	9,9	1,6
$\tau_3, \text{сут}$	33,7	18,2	10,3
$\tau_o, \text{сут}$	36,2	28,1	11,9

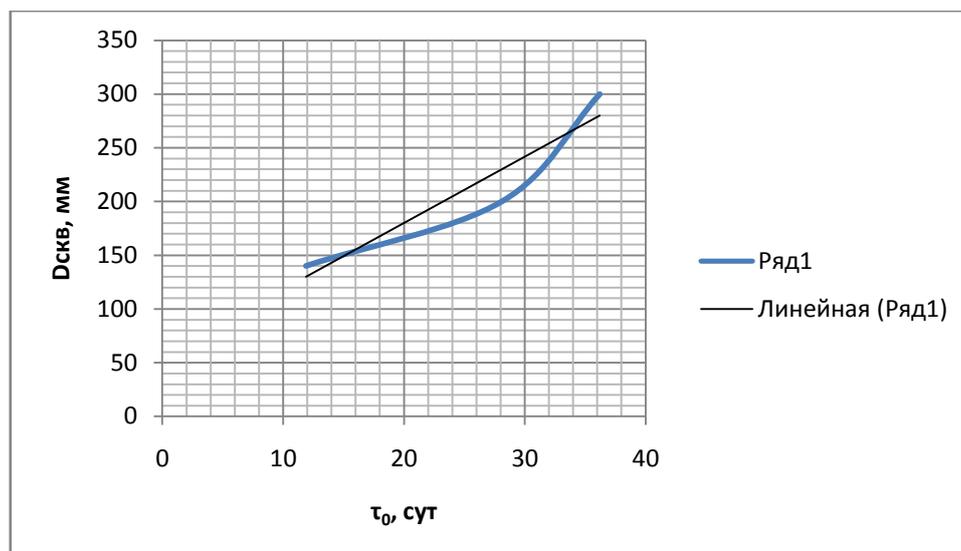


Рис. 3. Расчётная зависимость времени замерзания озёрной воды в скважине в зависимости от диаметра скважины

Исследование процесса теплообмена в скважине, при вскрытии подледникового озера, используется при разработке способа поддержания теплового баланса столба озёрной воды в нижней части буровой скважины для проведения прямых исследований водной толщи озера Восток.

Литература

1. Kapitsa A.P., Ridley JR., Robin G. de Q., Siegert M.J., Zotikov I.A. A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica // *Nature*. 1996. Vol. 381.P. 684-686.
2. Лейбензон Л.С. Собрание трудов, т. 3. М.: Изд-во АН СССР, 1955, с. 438.
3. 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.
4. Н.И. Васильев, А.Н. Дмитриев, П.А. Блинов. Бурение глубокой скважины на российской антарктической станции Восток. // *Вестник ОНЗ РАН*, том 4.
5. Litvinenko V.S., Vasiliev N.I., Dmitriev A.N., Lipenkov V.Y. 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.
6. V.S. Litvinenko, N.I. Vasiliev, A.N. Dmitriev, V.Y. Lipenkov, A.V. Podoliak. Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok station // *Antarctica. Ann. Of Glaciol.* 2014. Vol. 55 (68). P. 173-178.
7. 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.
8. Васильев Н.И., Дмитриев А.Н., Липенков В.Я. Результаты бурения скважины 5Г на Российской станции «Восток» и исследования кернов льда. *Записки Горного института*, том № 218 (2), 2016. 161–172 с.

Статья поступила в редакцию 18.05.2016 г.