

УДК 622.243.23

Оценка процесса замерзания озерной воды в приконтактном участке ствола скважины 5Г с подледниковым озером Восток, (Антарктида)

Канд. техн. наук А. Н. ДМИТРИЕВ¹, канд. техн. наук А. В. БОЛЬШУНОВ²,
Д. В. СЕРБИН³

¹123456789nika@mail.ru, ²av_bol@mail.ru, ³danil.serbin11@yandex.ru

Санкт-Петербургский государственный горный университет

Скважина 5Г, пробуренная на российской антарктической станции Восток, является в настоящее время самой глубокой из пробуренных когда-либо в ледниковых покровах Гренландии и Антарктиды. Этот проект бурения подарил миру данные, определившие направления исследований на десятилетия вперед. Продолжение исследований, даст новые сведения об очертаниях и глубинах озера, о мощности и строении его донных осадков, а также позволит провести дополнительные модельные построения, касающиеся термодинамических особенностей состояния системы «ледник — подледное озеро». Задача получения проб воды озера является одной из ключевых в обеспечении прогресса в изучении природы этого уникального объекта. Решение этой задачи является первоочередной целью дальнейшего использования скважины 5Г. Кратковременное вскрытие озера Восток и отбор проб воды из его приповерхностного слоя позволяет получить первичную информацию об его современном состоянии. В данной статье приводятся результаты расчетов времени замерзания поднявшейся в скважину озерной 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, ледниковый массив, ледяной керн, скважина, вскрытие, озерная вода, теплообмен, подледниковое озеро Восток.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 03.02.2017, принята к печати 15.05.2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-2-73-76

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Дмитриев А. Н., Большунов А. В., Сербин Д. В. Оценка процесса замерзания озерной воды в приконтактном участке ствола скважины 5Г с подледниковым озером Восток, (Антарктида) // Вестник Международной академии холода. 2017. № 2. С. 73–76.

Estimation of the freezing process for lake water in the near-contact section of the 5G borehole with subglacial lake Vostok (Antarctica)

Ph.D A. N. DMITRIEV¹, Ph.D A. V. BOLSHUNOV², D. V. SERBIN³

Saint-Petersburg state mining University

5G borehole drilled at Vostok Russian Research Station in Antarctica is currently the deepest ice hole ever drilled in the ice shields of Greenland and the Antarctic continent. This drilling project produced data that predetermined research trends for decades to come. Further surveys will provide new information on the lake configuration and depths as well as the thickness and structure of its bottom sediments. This will help to carry out additional simulations of thermodynamic properties of the glacier-subglacial lake system. Sampling of the lake water is a key task to secure significant progress in the research of this unique natural object. Solution of this problem is a primary objective for further investigations in 5G Borehole. Unsealing Lake Vostok for a short time and collecting water samples from its surface helps to obtain source information about its current condition. This paper presents results of freezing time calculations for the lake water with 'positive' temperature that entered the borehole once the subglacial lake was unsealed. These calculations were made using independent techniques. The paper studies temperature conditions in the borehole at the interface with the subglacial lake.

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

Article info:

Received 03/02/2017, accepted 15/05/2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-2-73-76

Article in Russian

For citation:Dmitriev A. N., Bolshunov A. V., Serbin D. V. Estimation of the freezing process for lake water in the near-contact section of the 5G borehole with subglacial lake Vostok (Antarctica). *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2017. No 2. p. 73–76.

Благодаря уникальным технологиям, разработанным в Санкт-Петербургском Горном университете, 5 февраля 2012 г. 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 метра, что вызвало большой интерес мирового научного сообщества (рис. 1) [1].

Подледниковое озеро Восток расположено под мощным (3750–4200 м) ледниковым покровом Антарктиды на значительном (более 1000 км) удалении от ее побережья в Восточной Антарктиде, и находится в поздне-ранне-мезозойской рифтовой системе, которая протягивается от побережья моря Содружества вдоль ложа гор Гамбургцева в высокоширотную область Центральной Антарктиды.

Вскрытию озера предшествовали научные исследования по отработке технологии бурения скважин во льду при температуре близкой к точке фазового перехода [2–5].

Заключительным этапом работ, проводимых в скважине 5Г после вскрытия ею подледникового озера Восток, является замерзание поднявшейся в скважину озерной воды на определенную высоту, что подразумевается технологией буровых работ.

Для успешного применения разработанной технологии вскрытия подледникового озера Восток, необходимо прогнозировать динамику времени замерзания озерной воды в скважине. Учитывая сложность экспериментального изучения поставленной задачи, можно провести теоретическое исследование процесса замерзания воды в приконтактном участке ствола скважины с озером [6, 7].

При рассмотрении стационарного процесса теплопередачи от озерной воды, поднявшейся в скважину, к холодной цилиндрической стенке массива льда, окружающего скважину, совместно решены уравнения теплопередачи и теплового баланса и получена формула для времени замерзания всей озерной воды в скважине [7]:

$$\tau_3 = \frac{\rho_{\text{в}} q_{\text{л}} D_{\text{СКВ}}^2}{8\lambda(t_{\text{в}} - t_{\text{л}})} \cdot \ln r, \quad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности льда, Вт/(м·°С); r — радиус изотермической цилиндрической поверхности скважины, м; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воды, кг/м³; $q_{\text{л}}$ — удельная теплота плавления льда, $3,34 \cdot 10^5$ Дж/кг; $D_{\text{СКВ}}$ — диаметр скважины, м; $t_{\text{в}}$ — температура озерной воды, °С; $t_{\text{л}}$ — температура льда, °С.

Так как в процессе теплообмена температура жидкости меняется, то будут меняться и ее физические свойства [8]. 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:

$$\bar{t}_{\text{ж}} = t_{\text{с}} \pm \Delta t,$$

где $t_{\text{с}}$ — температура стенки в рассматриваемом сечении, °С; Δt — среднее значение температурного напора, °С. Знак “+” берется при охлаждении жидкости, знак “–” — при нагревании. Разность температур между стенкой и соприкасающейся с ней жидкостью (температурный напор):

$$\Delta t = t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}.$$

Отсюда в нашем случае:

$$\Delta t = t_{\text{л}} - t_{\text{в}} = -2,87 - (-1,8) = -1,07 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\bar{t}_{\text{в}} = t_{\text{л}} - \Delta t = -2,87 + (-1,07) = -3,94 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Заменим $t_{\text{в}}$ в формуле (1) на $\bar{t}_{\text{в}}$, тогда суммарное время охлаждения воды до ее полного замерзания определится в виде:

$$\tau_0 = \tau_{\text{в}} - \tau_3, \quad (2)$$

Расчетные параметры, соответствующие охлаждению и замерзанию воды в скважине, сведены в таблицу:

Расчетные параметры, соответствующие охлаждению и замерзанию воды в скважине

$D_{\text{СКВ}}$, мм	140
$t_{\text{в}}$, сут	1,6
t_3 , сут	10,3
τ_0 , сут	11,9

Оценим время замерзания допускаемой доли воды, при которой напряжения в ледяной стенке становятся равными допускаемому напряжению во льду [9]. Определим напряжение в стенке скважины при замерзании в нем всего объема воды.

Объем всей замерзшей воды в скважине с учетом коэффициента объемного расширения при изменении агрегатного состояния превращения воды в лед β составляет [10–12]

$$V_{\text{л}} = (1 + \beta) \frac{\pi \cdot D_{\text{СКВ}}^2}{4} L. \quad (3)$$

Относительное удлинение периметра участка скважины при замерзании всей воды составит относительная деформация. Приращение объема замерзшей воды:

$$\Delta V_{\text{л}} = \frac{\pi D_{\text{л}}^2}{4} L - \frac{\pi D_{\text{СКВ}}^2}{4} L,$$

или с учетом предыдущего выражения:

$$\Delta V_{л} = \beta \frac{\pi D_{скв}^2}{4} L.$$

В этом случае диаметр $D_{скв}$ увеличился бы и составил $D_{л}$, в таком случае:

$$\Delta V_{л} = \frac{\pi D_{л}^2}{4} L - \frac{\pi D_{скв}^2}{4} L,$$

или после алгебраических преобразований с учетом предыдущей формулы

$$D_{л}^2 - D_{скв}^2 = \beta D_{скв}^2. \quad (4)$$

Удлинение периметра участка скважины при замерзании всей воды составит

$$\Delta = \pi(D_{л} - D_{скв}),$$

а относительное удлинение

$$\epsilon = \frac{(D_{л} - D_{скв})}{D_{скв}}. \quad (5)$$

Что с учетом уравнения (4) приводит к алгебраическому выражению

$$\epsilon = (2 + \epsilon) = \beta, \quad (6)$$

из которого относительная деформация определяется в виде

$$\epsilon = \sqrt{-1 + \beta} - 1. \quad (7)$$

И с учетом численного значения коэффициента объемного расширения ($\beta = 0,11$) воды в лед относительная деформация дает величину $\epsilon = 0,0004$.

Тогда напряжения в стенке скважины составили бы согласно закону Гука:

$$\sigma_{ст} = E\epsilon = 9000 \times 0,0004 = 3,6 \text{ МПа}, \quad (8)$$

что значительно больше допустимых напряжений для льда $[\sigma]$.

Необходимо найти долю α замерзшей в скважине воды, при которой напряжения начинают превышать допустимые.

Уравнение (3) для доли $[\alpha]$ замерзшей воды в скважине запишется в виде

$$V_{\alpha} = (1 + \alpha\beta) \frac{\pi D_{л}^2}{4} L.$$

Тогда уравнение (6), после аналогичных для него выводов математических выкладок, приобретает вид

$$\epsilon(2 + \epsilon) = \alpha\beta. \quad (9)$$

Подставляя в закон Гука (5) допустимые напряжения $[\sigma]$ получаем выражение для допустимой относительной деформации [9, 13, 14]:

$$[\epsilon] = \frac{[\sigma]}{E} = \frac{3200}{9000} = 0,36.$$

Тогда допустимая доля замерзшей в скважине воды, при которой напряжения в стенке становятся равными допустимым напряжениям, определяется выражением (с учетом уравнения (9)):

$$[\alpha] = \frac{\frac{[\sigma]}{E} (2 + \frac{[\sigma]}{E})}{\beta} = 7,7\%. \quad (10)$$

То есть уже при 7,7% воды, превращаемой в лед, напряжения в стенке скважины становятся равным допустимому напряжению $[\sigma]$.

Уравнение теплового баланса для доли $[\alpha]$ замерзшей воды в скважине запишется в виде уравнения

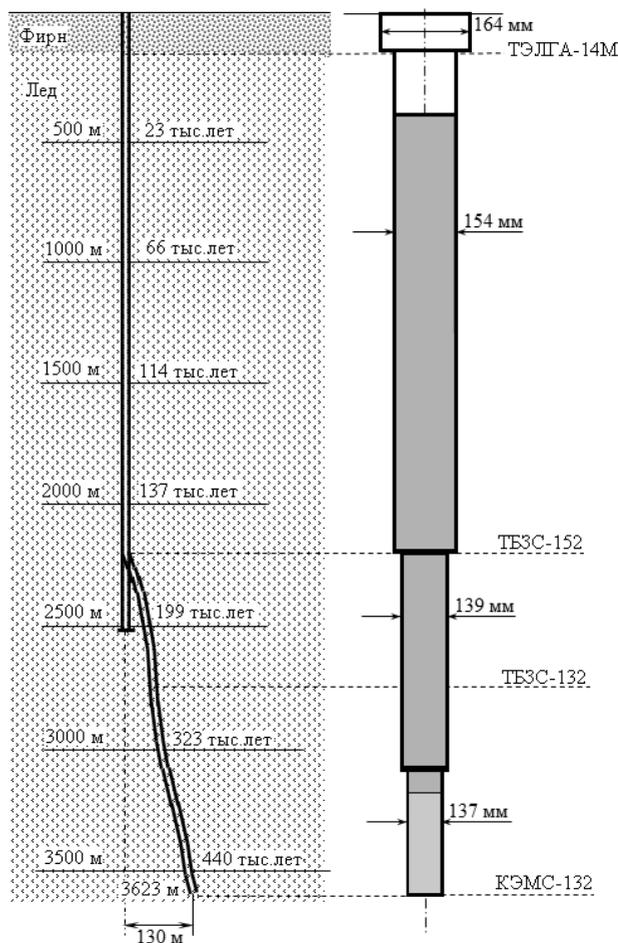


Рис. 1. Схема скважины 5Г-1 на станции Восток в Антарктиде: а — профиль скважины с указанием глубин и возраста льда; б — конструкция скважины с указанием типов использованных колонковых буровых снарядов на грузонесущем кабеле

$$Q_{\alpha} = \alpha \frac{\pi D_{скв}^2}{4} L \rho_c r, \quad (11)$$

решение которого, совместно с уравнением (4), приводит к виду

$$\tau_{\alpha} = \frac{\alpha \rho_v q_{л} D_{скв}^2}{8\lambda(t_b - t_k)} \ln r = 12,8314, \quad (12)$$

времени замерзания ее допустимой доли, при которой напряжения в стенке скважины становятся равными допустимому напряжению. Лед, образующийся на стенке скважины, будет выдавливать незамерзшую воду, что уменьшает напряжения в стенке и увеличивает время до возникновения в скважине допустимых напряжений.

Полученные данные, выполненные двумя независимыми методами (2) и (12) имеют близкое количественное совпадение. Оно может оказаться еще ближе при меньших значениях перепада температуры, которые на самом деле могут оказаться еще ниже, использованных при расчетах.

Авторы благодарят Российскую антарктическую экспедицию за логистическое обеспечение данных работ, которые выполнялись при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № НК 14-05-93107/14 и № 15-05-05413.

Литература

1. 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 // Лед и Снег. 2012. № 4 (120). С. 12–20.
2. Васильев Н. И., Дмитриев А. Н., Подоляк А. В. Бурение глубоких скважин во льду на российской станции «Восток». // Вестник МАНЭБ. 2015. № 2 (15). С. 21–26.
3. Kapitsa A. P., Ridley J. R., 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.
4. Petit JR., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N. I., Barnola J.-M., etc. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature. 1999. Vol. 399. No 6735. P. 429–436.
5. Lukin V. V. and Vasiliev N. I. Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica // Ann. Glaciol. 2014. 55 (65). P. 83–89.
6. 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. Berlin: Wissenschaftliche Welt e. 2013. No 1. p. 159–167.
7. Дмитриев А. Н., Сербин Д. В., Кадочников В. Г. К методике определения времени замерзания озерной воды в скважине. // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование. 2016. № 2. С. 12–17.
8. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебн. пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. П. Г. Романкова, 10-е изд., перераб. и доп. — Л.: Химия, 1987. 576 с.
9. Богородский В. В., Гаврило В. П., Недошивин О. А. Разрушение льда: методы, технические средства. — Л.: Гидрометеоздат, 1983. 232 с.
10. Шавлов А. В. Лед при структурных превращениях. — Новосибирск: Наука, 1996. 362 с.
11. Litvinenko V. S., Vasiliev N. I., Dmitriev A. N., Lipenkov V. Y., Podoliak A. V. Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok station, Antarctica. // Ann. Glaciol. 2014. Vol. 55 (68). P. 173–178.
12. Васильев Н. И., Дмитриев А. Н., Липенков В. Я. Результаты бурения скважины 5Г на Российской станции «Восток» и исследования кернов льда. // Записки Горного института, 2015. № 1.
13. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике: 2-е изд. перераб. — М: Наука, 1985. 512 с.
14. ГОСТ 14249–89 Сосуды и аппараты. Нормы расчета на прочность.

Сведения об авторах

Дмитриев Андрей Николаевич

к.т.н, доцент кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского государственного горного университета, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, 123456789nika@mail.ru

Большунов Алексей Викторович

к.т.н, доцент кафедры механики Санкт-Петербургского государственного горного университета, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, av_bol@mail.ru

Сербин Данил Васильевич

аспирант кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского государственного горного университета, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, danil.serbin11@yandex.ru

References

1. Vasilyev N. I., Lipenkov V. Ya., Dmitriev A. N., Podoliak A. V., Zubkov V. M. Results and features of drilling borehole 5G and the first opening of lake Vostok. *Ice and Snow*. 2012. No 4 (120), p. 12–20. (in Russian)
2. Vasilyev N. I., Dmitriev A. N., Podoliak A. V. Drilling deep holes into the ice at the Russian station «Vostok». *Vestnik MANEB*, 2015. No. 2 (15). p. 21–26. (in Russian)
3. Kapitsa A. P., Ridley J.R., 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.
4. Petit JR., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N. I., Barnola J.-M., etc. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. 1999. Vol. 399. No 6735. P. 429–436.
5. Lukin V. V. and Vasiliev N. I. Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica. *Ann. Glaciol.*, 2014. 55 (65). p. 83–89.
6. 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. Berlin: Wissenschaftliche Welt e. 2013. No 1. p. 159–167.
7. Dmitriev A. N., Serbin D. V., Kadochnikov V. G. On the method of determining the time of freezing lake water in the well. *Scientific journal ITMO. Series: Refrigeration and air conditioning*. 2016. No. 2. p. 12–17. (in Russian)
8. Pavlov K. F. Examples and problems for the course of processes and apparatuses of chemical technology: The allowance for high schools / K. F. Pavlov, P. G. Romankov, A. A. Noskov; ed. by P. G. Romankov — 10 Pub., Rev. and add. Leningrad, Khimiya, 1987. 576 p. (in Russian)
9. Bogorodskiy V. V., Gavrilov V. P., Nedoshivin O. A. Ice Destruction: methods, technical tools. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1983, 232 p. (in Russian)
10. Shavlov A. V. Ice during structural transformations. Novosibirsk, Nauka, 1996. 362. (in Russian)
11. Litvinenko V. S., Vasiliev N. I., Dmitriev A. N., Lipenkov V. Y., Podoliak A. V. Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok station, Antarctica. *Ann. Glaciol.* 2014. Vol. 55 (68). P. 173–178.
12. Vasilyev N. I., Dmitriev A. N., Lipenkov, V. Ya. Results of drilling borehole 5G at the Russian station «Vostok» and the study of ice cores. *Proceedings of the Mining Institute*, 2015. No. 1. (in Russian)
13. Yavorsky B. M., Detlaf A. A. Handbook of physics: 2-e Pub. Pererab. Moscow, Nauka, 1985. 512 p. (in Russian)
14. GOST 14249–89 Vessels and equipment. Norms for strength calculation. (in Russian)

Information about authors

Dmitriev Andrey Nikolaevich

PhD, associate professor of department of well-drilling of the Saint-Petersburg state mining University, 199106, Saint-Petersburg, Vasilievsky island, 21st line, 123456789nika@mail.ru

Bolshunov Aleksey Viktorovich

PhD, associate professor of department of mechanics of the Saint-Petersburg state mining University, 199106, Saint-Petersburg, Vasilievsky island, 21st line, av_bol@mail.ru

Serbin Danil Vasilyevich

Postgraduate student of department of well-drilling of the Saint-Petersburg state mining University, 199106, Saint-Petersburg, Vasilievsky island, 21st line, danil.serbin11@yandex.ru