УДК 622.24

Бурение скважин в Антарктиде с применением горячего теплоносителя

Ирина Сергеевна МОИСЕЕНКО* Андрей Николаевич ДМИТРИЕВ**

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Актуальность работы определяется необходимостью совершенствования технологии бурения глубоких скважин в ледниках. Необходимость бурения в Антарктике для решения геологических задач отмечена в «Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2020 г. и на более отдаленную перспективу», утвержденной Правительством РФ в 2010 г. С учетом имеющегося опыта бурения глубоких скважин на ледниках Арктики и Антарктики сотрудниками кафедры бурения скважин Санкт-Петербургского горного университета и существующей инфраструктуры Российской Антарктической экспедиции наиболее целесообразным и эффективным для изучения подледникового озера Восток будет использование пробуренной на станции Восток скважины 5Г, где ведутся исследования, направленные на технологии вскрытия и поддержания в рабочем состоянии скважины в процессе изучения озера Восток. Это позволит не только получить абсолютно уникальную информацию по различным научным дисциплинам, но и в немалой степени укрепит престиж нашей страны в антарктических исследованиях.

Объектом исследований является технология бурения глубоких скважин во льду (центральная Антарктида). Экологические требования, предъявляемые к буровым работам, имеют особое значение, так как последствия воздействия на окружающую среду в полярных районах с уникальным сочетанием природных условий могут иметь катастрофический, необратимый характер. Применение традиционных технических средств при бурении глубоких скважин во льдах Антарктиды оказывается малоэффективным. К настоящему времени все разработанные способы бурения льда в зависимости от характера его разрушения на забое можно разделить на тепловые, механические и термомеханические.

Целью работы является теоретический анализ способа бурения с горячим теплоносителем, который должен обеспечить выход глубокой скважины (глубиной 2000–4000 м) в подледниковые коренные породы, и в данной статье приводятся результаты расчетов температурного режима скважины, при котором будет или не будет происходить замерзания скважины.

Анализ современного состояния технологии бурения скважин в ледниках свидетельствует о низкой эффективности и высокой аварийности при проходке глубоких горизонтов ледниковых покровов, для которых характерно увеличение размеров кристаллов и наличие температур, близких к точке плавления льда. Общепринятых рекомендаций по выбору рациональных параметров бурения такого льда на сегодняшний момент не существует. Недостаточная надежность процесса бурения нередко приводила к наиболее тяжелым по последствиям авариям в скважине – прихватам буровых снарядов.

Ключевые слова: Антарктида, глубокое бурение, лед, ледовый керн, скважина, теплообмен, теплоноситель.

Введение

Особую актуальность в последние годы приобрел экологический аспект бурения скважин в ледниках, связанный как со вступлением в силу Международного протокола по защите окружающей среды Антарктики, так и с планируемым исследованием озер, расположенных под ледниковым покровом Антарктиды и Гренландии. Само обнаружение этих озер уже причислено к самым значительным географическим открытиям XX в. Задача проникновения в подледниковые водоемы может быть решена только путем использования экологически чистой технологии бурения, исключающей попадание в водоем современной микрофлоры и обеспечивающей сохранение жизнеспособности реликтовых организмов.

К настоящему времени специалистами Австралии, Германии, Дании, Италии, Канады, Новой Зеландии, России, США, Франции, Японии и других стран разработаны десятки специальных буровых установок, предназначенных для сооружения скважин в ледниках. За последние 50 лет в ледниках пробурено около 110 тыс. м скважин. Примерно четверть от общего объема бурения составляют глубокие скважины (глубиной более 1000 м), проходка которых проводилась электромеханическими снарядами на грузонесущем кабеле.

Санкт-Петербургский горный университет является лидирующей и в настоящее время единственной в России организацией, занимающейся разработкой технических

 \boxtimes s215086@stud.spmi.ru

^{** 1234567890}nika@mail.ru

средств и методов бурения глубоких скважин в ледниках. Сотрудниками университета пробурено около 20 тыс. м скважин, включая три глубокие скважины на станции Восток в центральной Антарктиде.

Бурение льда можно выполнить двумя способами: тепловым и механическим. При тепловом способе бурения лед на забое плавится под воздействием термобуровой коронки, при механическом - за счет разрушения льда коронками резцового типа. Тепловой способ бурения привлекает в первую очередь относительной простотой буровых снарядов. Но плавление льда на забое требует большого количества энергии, что связано с фазовым переходом из твердого в жидкое состояние.

Для плавления льда требуется в десятки раз большее количество энергии, чем при его механическом разрушении, что приводит к использованию грузонесущих кабелей значительно большего диаметра, чем для механического бурения. Оборудование для бурения скважин тепловым способом получается значительно более тяжелым и энергоемким, кроме того, качество керна при механическом бурении значительно выше, чем при термобурении.

В тесной связи с задачей, направленной на минимизацию массы используемого бурового оборудования, а именно на снижение массы источников энергии, стоит проблема сокращения уровня энергоемкости буровых работ. Потребление энергии при бурении происходит практически на всех этапах сооружения скважины.

Энергоемкость разрушения льда на забое скважины характеризуется удельной энергией разрушения, т. е. энергией разрушения, отнесенной к единице объема или массы разрушенного материала. При термическом способе разрушения удельная энергия разрушения на два порядка выше удельной энергии, необходимой для механического разрушения (табл. 1).

В основе теплового способа бурения лежат специфические свойства льда, заключающиеся в его низкой температуре плавления. Плавление льда может осуществляться как за счет контактной теплопередачи забоя с нагревательным устройством, так и за счет конвективного теплообмена с высокотемпературным промежуточным теплоносителем.

Использование в качестве теплоносителя воды (газа, пара), нагреваемой на поверхности и нагнетаемой непосредственно на забой скважины с помощью трубопроводов или шлангокабелей, сможет обеспечить возможность бурения в ледниках, вероятно, но не на всех глубинах. При бурении этим способом скважин глубиной вплоть до подстилающих пород, которые в Восточной Антарктиде можно ожидать на отметках до 4500 м, возможно замерзание теплоносителя в интервале глубин 300-500 м,

Таблица 1. Удельная энергия разрушения льда [1] Table 1. Specific energy of ice destruction [1]

Способ разрушения	Удельная энергия, МДж/м³
Тепловой	590–680
Механический ударный	~
Механический вращательный	1,9–4,8

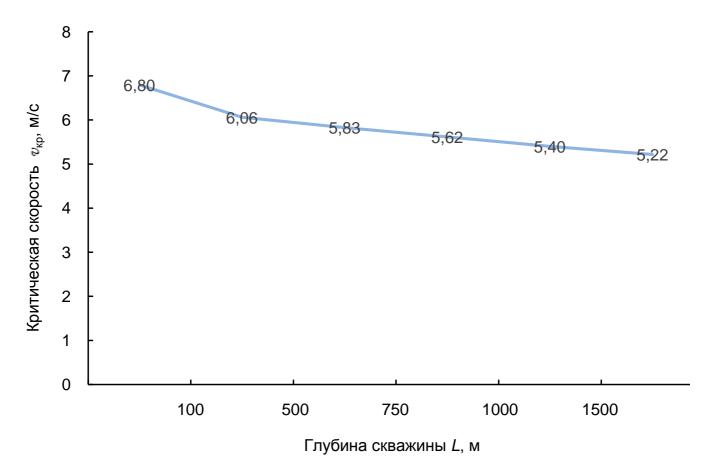


Рисунок 1. График предельных значений критической скорости теплоносителя, при которых его замерзание не происходит Figure 1. Graph of the limiting values of the critical speed of the coolant, at which its freezing does not occur

где стенки скважины имеют очень низкие температуры и не устраняются неизбежные потери тепловой энергии при транспортировании теплоносителя от устья на забой скважины.

Рассмотрим вопрос о критической скорости потока горячего теплоносителя, после чего наступает прекращение циркуляции потока и теплоноситель замерзает.

Существует предельное значение критической скорости циркуляции потока жидкости $v_{\rm kp}$, м/с, при котором промерзания в трубопроводе (шлангокабеле) вообще не происходит. При этом плотность теплового потока через поверхность трубопровода (шлангокабеля) вычисляется по формуле Форхгеймера. Тогда для критической скорости получаем:

$$v_{\text{kp}} = \frac{\sqrt{0.58\lambda_{\pi}t_{\pi}}}{r_{0}^{0.75}\ln\left(\frac{2L}{r_{0}}\right)};$$

Проведен расчет предельных значений критической скорости на различных глубинах скважины с учетом температурных данных, полученных при бурении глубокой скважины на станции Восток (Антарктида):

При данном способе бурения поддержание найденных значений критических скоростей и получение качественного керна затруднительно, а продолжительное изучение и использование скважины невозможно. В процессе бурения расходуется огромное количество энергии для поддержания скважины в незамерзающем состоянии и на само плавление льда, что неактуально [2, 3].

Так известен американский проект бурения горячей водой «AMANDA Project», по которому при помощи поверхностного насоса вода поступает в серию основных нагревателей (на выходе температура воды около 90 °C) и затем через термопластиковый гибкий шланг подается на забой скважины. Общие энергозатраты на гидродинамическое бурение очень высоки и достигают 2500 кВт при колоссальном расходе топлива (до 25 л на 1 м проходки) [4, 5].

Рассмотрим возможный риск сооружения скважины горячим теплоносителем на глубине 300 м от поверхности ледникового покрова, где температура стенки составляет -57 °C [6].

По известной подаче насоса $q_{_{\rm H}}$ и фактическому числу Нуссельта Nu объемной теплоемкости горячего теплоносителя $(c\rho)_{_{\rm B}}$, а также заданной температуре теплоносителя на входе (устье скважины) $t_{_{\rm BX}}$ определим устьевую температуру теплоносителя на выходе по формуле [7]:

$$c_{_{\mathrm{B}}}\rho_{_{\mathrm{B}}}q_{_{\mathrm{H}}}\left(t_{_{\mathrm{BX}}}-t_{_{\mathrm{BbIX}}}\right)=\pi\lambda_{_{\mathrm{B}}}\mathrm{Nu}H(t_{_{3}}-t_{_{\Pi}}),$$

где H – текущая глубина забоя, м; $q_{_{\rm H}}$ – подача насоса, м³/с;

 $c_{\rm B}$ – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг · °С); $\rho_{\rm B}$ – плотность воды, кг/м³; $\lambda_{\rm B}$ – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м · °С); $t_{\rm BX}$ – температура промывочной жидкости на устье (входе) скважины, °С; $t_{\rm BMX}$ – температура промывочной жидкости на устье (выходе) скважины, °С; $t_{\rm A}$ – температура стенки скважины (льда) в интервале бурения, °С; $t_{\rm A}$ – средняя температура промывочной жидкости на забое скважины (в интервале бурения), °С,

$$t_{_{3}}=\frac{1}{2}\left(t_{_{\rm BX}}+t_{_{\rm BMX}}\right).$$

Методом Левека [6, 8] получена формула для числа Нуссельта при ламинарном течении вязкой жидкости в кольцевом пространстве между двумя соосными трубами:

$$Nu_{i} = 0.15 \left[\frac{v_{m}d_{s}}{a} \right]^{1/3} \varphi_{i} (i=1),$$

где $v_m \cdot d_3/a=\mathrm{Re}\cdot\mathrm{Pr}=\mathrm{Pe}$ — безразмерное число Пекле; a — температуропроводность жидкости (воды), м²/с; Pr — число Прандтля (по таблице П.V.1 [9] для воды при температуре 80 °C $\mathrm{Pr}=2,25$); Re — число Рейнольдса; v_m — расходная скорость; d_3 — эквивалентный диаметр, м,

$$d_{a} = d_{u} - d_{uu}$$

где $d_{_{\rm H}}$, $d_{_{\rm BH}}$ – диаметры наружной и внутренней стенки кольцевого канала, м.

Число Рейнольдса при температуре жидкости на входе

$$Re = \frac{\rho_{\rm B} \vartheta d}{\mu},$$

где ϑ – средняя скорость жидкости, м/с; d – внутренний диаметр, м; μ – коэффициент динамической вязкости, (H · c)/м² (по таблице П.V.1 [10] для воды при температуре 80 °C μ = 3,52 · 10⁻⁴);

Методом Левека [11] получена формула для числа Нуссельта при ламинарном течении вязкой жидкости в круглой трубе:

$$Nu = 1,651 [Pe \cdot d/l]^{1/3}$$

при расстоянии $l = 10^3 d$, где d – диаметр скважины, м.

Для расчетов были использованы следующие значения: диаметр скважины 300 мм; внутренний диаметр трубопровода (шлангокабеля) 50 мм.

Полученные расчетные данные температуры $t_{\text{вых}}$ при фиксированном расходе горячей воды показаны ниже [12–14]:

$$q_{\text{H}}$$
, л/мин ... 50 100 150 200 300 400 500 $t_{\text{вых}}$, °C -2,18 -1,08 -0,73 -0,545 -0,363 -0,27 -0,21

Для получения положительных значений температур $t_{\scriptscriptstyle \mathrm{BMX}}$ при бурении этого самого холодного интервала потребуется, по всей видимости, запредельный расход горячего теплоносителя, что невозможно осуществить в условиях удаленности участка работ в Восточной Антарктиде [15].

Установлено, что допущения о равенстве температуры стенки трубопровода температуре воды и соизме-

римости удельной величины теплопотерь при движении воды по трубопроводу с коэффициентом теплоотдачи от воды к стенке несостоятельны [16, 17].

Количество тепла Q, теряемое водой в единицу времени на коротком участке трубопровода у забоя скважины, можно определить по уравнению Ньютона:

$$Q = \alpha S(t_{_{\rm B}} - t_{_{\rm CT}}),$$

где $t_{_{\rm B}}$ – температура воды, °C; $t_{_{\rm CT}}$ – температура стенки трубопровода, °C; α – коэффициент теплоотдачи от воды к стенке; S – площадь поверхности трубопровода, м².

Для условия теплообмена в системе вода-трубопровод, когда среда, вмещающая трубопровод имеет отрицательную температуру, получено расчетное выражение [18–20] для определения температуры первых порций воды в конце неизолированного трубопровода (у забоя):

$$t_{\text{\tiny BMX}} = t_{\pi} + (t_{\text{\tiny BX}} - t_{\pi}) \exp\left(-\alpha \omega \frac{\pi dL}{q}\right),$$

где $t_{_{\rm BMX}}$ — температура воды в начале трубопровода, °C; $t_{_{\rm BMX}}$ — температура воды в конце трубопровода, °C; $t_{_{\rm T}}$ — температура льда на глубине выхода воды из трубопровода, °C; ω — поправочный коэффициент, ω = 0,2–0,3; d — диаметр трубопровода, м; L — длина трубопровода, м; q — расход воды, л/ч.

В результате расчетов по формуле [21] на интересующем нас интервале (глубина скважины $L=300\,$ м) получили отрицательные температуры $t_{\text{вых}}=-3.76\,$ и $-6.6\,$ °C соответственно при поправочном коэффициенте ω , равном $0.2\,$ и 0.3.

Дополнительными факторами, влияющими на процесс теплообмена при отрицательной температуре стенок трубопровода, являются: образование ледяной корки внутри трубопровода и выделение тепла за счет фазового перехода воды; замещение первых охлажденных порций воды последующими (вследствие образования ледяной корки) с более высокой температурой перемешивания воды [22, 23].

Целесообразно учитывать поправочным коэффициентом о влияние дополнительного источника тепла, которое выделяется за счет образования ледяной корки на внутренней поверхности трубопровода, которая равномерно распределяется по его поверхности [24]. Этот коэффициент не зависит от теплофизических свойств вмещающей среды, а определяется гидродинамическими условиями движения воды, ее температурой и диаметром трубопровода.

Чем ниже температура воды, тем более интенсивным будет образование ледяной корки на стенках трубопровода. Так, на начальном участке трубопровода (на входе), где температура первых порций воды более высокая, ледяная корка если и образуется, то удельный вес этого количества тепла в общем тепловом балансе незначителен. Это также относится и к более глубоким горизонтам окружающей среды (льда), где ее температура близка к фазовому переходу.

Одним из условий успешного бурения глубоких скважин в сплошных ледниках Антарктиды, Гренландии горячим теплоносителем будет учет температурного фактора – поддержание температуры в стволе в определенных пределах. Температура в скважине становится одним из основных параметров режима бурения. Здесь надо при-

нимать во внимание распределение температуры циркулирующего теплоносителя в трубопроводе и кольцевом пространстве скважины в зависимости от глубины бурения, продолжительности циркуляции, свойств теплоносителя, его расхода и начальной температуры, свойств окружающих ледовых интервалов (проходимой толщи), возрастания их температуры с глубиной. Все это ставит задачу изучения температурного режима проходимой скважины в целях его сознательного регулирования и нормализации [25].

В общем случае при бурении глубокой скважины горячим теплоносителем температура последнего в нисходящем потоке непрерывно убывает за счет теплообмена через стенку трубопровода с восходящим по кольцевому каналу потоком, имеющим более низкую температуру. Поднимаясь от забоя, теплоноситель продолжает охлаждаться за счет теплообмена с окружающей ледовой толщей, имеющей в верхних горизонтах меньшую температуру, а также отдавая тепло нисходящему потоку.

Далее на рис. 2–5 приведены результаты расчетов бурения с помощью горячего теплоносителя трубопроводом из ПВХ диаметром 50 мм (на стальных неизолированных трубопроводах теплоноситель застывает уже на глубине 200 м) с расходом 200 и 400 л/мин, время циркуляции соответственно 2 и 20 ч. Расчет выполнен по специальной компьютерной программе «Расчет температурного режима бурящейся скважины», разработанной на кафедре бурения скважин.

Резкого снижения теплового взаимодействия между нисходящим и восходящим потоками можно достигнуть за счет теплоизоляции трубопровода с помощью синтетических материалов [26–29]. При этом нисходящий поток практически не участвует в теплообмене, меняя характер распределения температуры в глубокой скважине. Призабойная температура будет приближаться к начальной устьевой температуре, максимум температуры сместится в верхнюю часть скважины, и температура из устья скважины возрастет [30].

Выводы

- 1. Эффективность применения установок для бурения горячим теплоносителем резко падает с увеличением глубины бурения, так как при этом, во-первых, значительно возрастают потери тепла в шлангопроводах от поверхностных нагревателей к забойному оборудованию и, во-вторых, увеличиваются расходы тепла, затрачиваемого на предохранение скважины, заполненной талой водой, от обратного промерзания. Общие затраты энергии на гидродинамическое бурение очень высоки и достигают 2500 кВт при колоссальном расходе топлива (до 25 л бензина на 1 м проходки) [31].
- 2. Главными недостатками этих буровых установок являются значительные размеры, масса и энергопотребление. Масса этих устройств в 12–30 раз выше, чем буровых установок со снарядами на грузонесущем кабеле. Энергопотребление промышленно выпускаемых буровых установок в 5–10 раз (а гидродинамических устройств в сотни раз) превышает энергопотребление установок со снарядами на грузонесущем кабеле. Столь высокие показатели массы и энергопотребления этих установок являются критическими при выборе способа бурения в труднодоступных и крайне удаленных от баз снабжения районах Антарктиды и Гренландии [32, 33].
 - 3. Проведенный расчет критической скорости тепло-

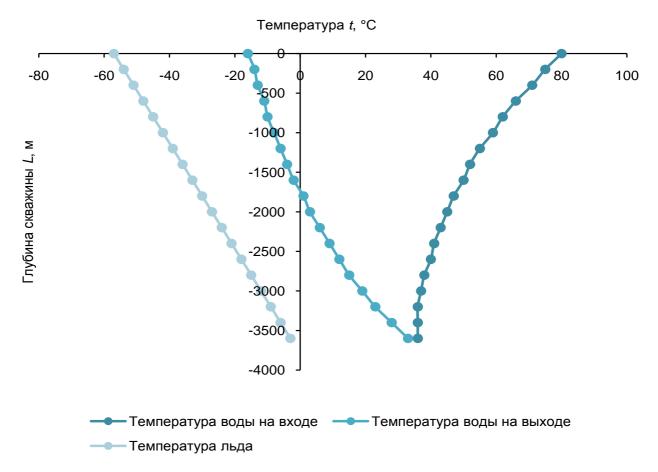


Рисунок 2. График температурного режима скважины 200 л/мин за 2 ч Figure 2. Graph of the temperature regime of the well 200 I / min for 2 hours

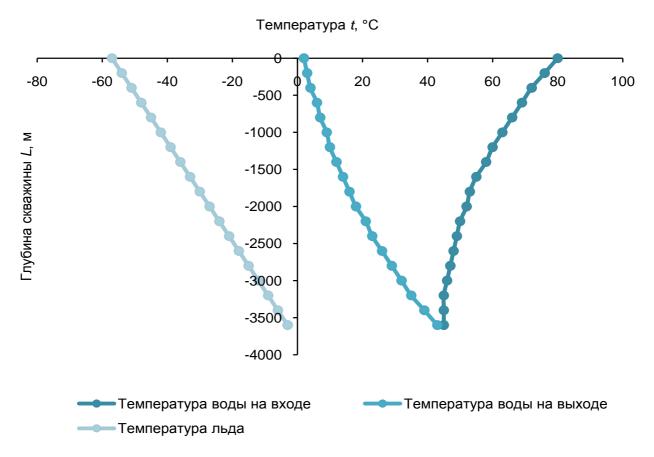


Рисунок 3. График температурного режима скважины 200 л/мин за 20 ч Figure 3. Graph of the temperature regime of the well 200 I / min for 20 hours

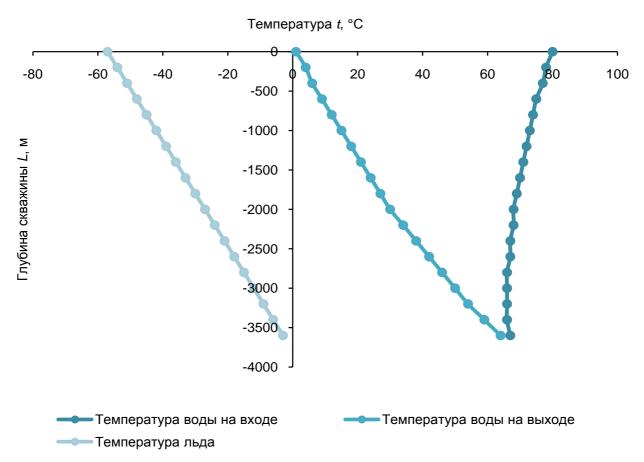


Рисунок 4. График температурного режима скважины 400 л/мин за 2 ч Figure 4. Graph of the temperature regime of the well 400 I / min for 2 hours

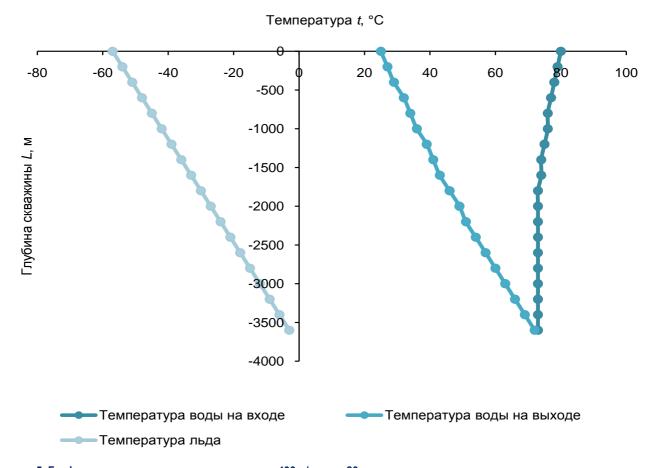


Рисунок 5. График температурного режима скважины 400 π /мин за 20 ч Figure 2. Graph of the temperature regime of the well 400 I / min for 20 hours

носителя, при несоблюдении которой происходит замерзание технологической жидкости, показал, что поддержание скорости в условиях Антарктиды невозможно из-за высоких требований к расходу жидкости.

- 4. При термическом способе разрушения удельная энергия разрушения на два порядка выше удельной энергии, необходимой для механического разрушения.
- 5. Основным материалом гляциологических исследований, получаемым в результате бурения, являются керновые пробы. Поэтому этот бескерновый способ проходки ледниковых покровов с горячим теплоносителем может иметь ограниченное применение, и с конца

1960-х гг. на практике не использовался [34].

- 6. Анализ результатов полученных температур нисходящего потока, восходящего потока, а также график зависимости температуры от глубины показали, что присутствует большая вероятность получить на устье скважины отрицательную температуру восходящего потока и, как следствие, аварийную ситуацию в скважине.
- 7. Если конечной целью является бурение глубоких и чистых подледниковых скважин экологически безопасным, эффективным и предсказуемым способом, то требуется тщательный анализ оптимизации и разработка

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Koci B. R., Sonderup J. M. Evaluation of deep ice core drilling system // PICO Tech. Rep. 90-1. Fairbanks: Univ. of Alaska, 1990. 34 p.
- 2. Кудряшов Б. Б., Чистяков В. К., Литвиненко В. С. Бурение скважин в условиях изменения агрегатного состояния горных пород. Л.: Недра, 1991. 295 с.
- 3. Литвиненко В. С. Уникальные техника и технологии бурения скважин во льдах Антарктиды // Записки Горного института. 2014. Т. 210. C. 5–10. URL: https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5259
- 4. Хэнкок В. Х., Куивинен К. С., Келти Дж. Р., Хансен Б. Л. Бурение методом горячей воды скважины доступа и технология термического зонда, разработанные в университете Небраска-Линкольн // Изучение озера Восток: научные задачи и технологии: тез. докл. Междунар. совещ. (24–26 марта 1998 г., Арктический и антарктический НИИ, СПб, Россия). СПб, 1998. 91 с.
- 5. Koci B. R. The AMANDA Project: Drilling precise, large-diameter holes using hot water // Mem. of National Inst. of Polar Research. 1994. No. 49. P. 203–211.
- 6. Koci B. Wotan: a drill for ice cube // Mem. of National Inst. of Polar Research. 2002. No. 56. P. 209-216.
- 7. Медведский Р. И. Строительство и эксплуатация скважин на нефть и газ в вечномерзлых породах. М.: Недра, 1987. 230 с.
- 8. Lukin V. V., Vasiliev N. I. Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica // Annals of Glaciology. 2014. Vol. 55. Issue 65. P. 83–89. https://doi.org/10.3189/2014AoG65A002
- 9. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: пер. с англ. М.: Мир, 1983. 512 с.
- 10. Talalay P. G., Hooke R. L. Closure of deep boreholes in ice sheets: a discussion // Annals of Glaciology. 2007. Vol. 47. P. 125–133. https://doi.org/10.3189/172756407786857794
- 11. Timofeev I., Bolshunov A., Avdeev A. Justification of Lever Arrangement Parameters for Friction-Type Traction Gear // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 1329–1334.
- 12. Talalay P., Fan X., Xu H., Yu D., Han L., Han J., Sun Y. Drilling fluid technology in ice sheets: Hydrostatic pressure and borehole closure considerations // Cold Regions Science and Technology. 2014. February. Vol. 98. P. 47–54. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.10.012
- 13. Чистяков В. К., Талалай П. Г. Особенности промывки при бурении скважин в ледниках и ледниковых покровах // Сб. науч. тр. НГА Украины. 1999. Т. 4. № 6. С. 85–89.
- 14. Кудряшов Б. Б., Талалай П. Г., Чистяков В. К. Бурение скважин в снежно-фирновых и ледниковых толщах за рубежом // Техника, технология и организация геологоразведочных работ: обзор. М.: ВИЭМС, 1991. Вып. 6. 57 с.
- 15. Захаров А. А., Соловей В. А. Проблемы изучения антарктического озера Восток через ледовую скважину // Вестник Международной академии холода. 2018. № 4. С. 3–9. https://doi.org/10.17586/1606-4313-2018-17-4-3-9
- 16. Каменский Р. М. Теплопотери воды при пуске трубопровода // Водоснабжение и санитарная техника. 1963. № 12. С. 17–25.
- 17. Каменский Р. М. Экспериментальные исследования теплового взаимодействия водопроводов с мерзлыми грунтами // Тепловые процессы в мерзлых горных породах. М.: Наука, 1964. 200 с.
- 18. Каменский Р. М. Теплообмен при заполнении водопровода, уложенного в мерзлый грунт // Процессы тепло- и массообмена в мерзлых горных породах. М.: Наука, 1965. С. 94–97.
- 19. 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. https://doi.org/10.21047/1606-4313-2017-16-2-73-76
- 20. Большунов А. В., Васильев Н. И., Тимофеев И. П., Игнатьев С. А., Васильев Д. А., Лейченков Г. Л. Перспективное технологическое решение по отбору проб донных отложений подледникового озера Восток: актуальность и постановка задач исследований // Записки Горного института. 2021. Т. 252. № 6. С. 779–787. https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.1
- 21. Ковальчук В. С., Певнева А. Г. Температурный режим бурения скважин в районах распространения многолетнемерзлых пород // VIII Междунар. студен. науч. конф. Студен. науч. форум-2016. М.: Российская академия естествознания, 2016. С. 45–49.
- 22. Filimonov M. Yu., Vaganova N. A. Simulation of Technogenic and Climatic Influences in Permafrost for Northern Oil Fields Exploitation // Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2015. Vol. 9045. P. 178–185. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20239-6_18
- 23. Талалай П. Г. Проникновение в подледниковые озера: планы и реальность // Природа. 2006. № 9(1093). С. 45–53.
- 24.. Север и Арктика в новой парадигме мирового развития: актуальные проблемы, тенденции, перспективы / Т. Е. Алиева [и др.]. Апатиты: Ин-т экономических проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН, 2016. 420 с.
- 25. Котляков В. М. К истории международного проекта бурения глубокой ледниковой скважины на станции Восток // Лёд и снег. 2012. Т. 52. № 4. С. 5–8. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-5-8
- 26. Котляков В. М., Липенков $\bar{\text{В}}$. Я., Васильев Н. И. Глубокое бурение в Центральной Антарктиде и проникновение в подледное озеро Восток // Вестник Российской академии наук. 2013. Т. 83. № 7. С. 591–605. https://doi.org/10.7868/S0869587313070062
- 27. Шкурко А. М. Основы теории и практика бурения плавлением в ледовых отложениях Антарктиды: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.14. СПб, 1998. 44 с.
- 28. Талалай П. Г. Научно-практические основы эффективной и экологически чистой технологии бурения глубоких скважин в ледниках: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.14. СПб, 2007. 41 с.
- 29. Kuhl T., Gibson C., Johnson J., Boeckmann G., Moravec E., Slawny K. Agile Sub-Ice Geological (ASIG) Drill development and Pirrit Hills field project // Annals of Glaciology. 2021. Vol. 62. Issue 84. P. 53–66. https://doi.org/10.1017/aog.2020.59
- 30. Васильев Н. И. Рациональная технология бурения скважин в ледовых массивах с использованием электромеханического снаряда на кабеле: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.14. СПб, 2004. 33 с.

- 31. Литвиненко В. С. Теоретические и экспериментальные основы бурения горных пород плавлением: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.15.14. М., 1991. 38 с.
- 32. Талалай П. Г. Разработка технологии бурения скважин во льду электромеханическими снарядами на грузонесущем кабеле: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.14. СПб, 1994. 21 с.
- 33. Humphrey N., Echelmeyer K. Hot-water Drilling And Bore-hole Closure In Cold Ice // Journal of Glaciology. 1990. Vol. 36. Issue 124. P. 287–298. https://doi.org/10.3189/002214390793701354
- 34. Li Y., Talalay P. G., Fan X., Li B., Hong J. Modeling of hot-point drilling in ice // Annals of Glaciology. 2021. September. Vol. 62. Issue 85-86. P. 360–373. https://doi.org/10.1017/aog.2021.16

Статья поступила в редакцию 10 июня 2022 года

http://doi.org/10.21440/2307-2091-2022-3-100-109

УДК 622.24

Drilling wells in Antarctica using a heat transfer medium

Irina Sergeevna MOISEENKO*
Andrey Nikolaevich DMITRIEV**

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract

The relevance of the work is determined by the need to improve the technology of drilling deep wells in glaciers. The need for drilling in Antarctica to solve geological problems noted in the Development Strategy of the Russian Federation in Antarctica for the period up to 2020 and for a more distant perspective, approved by the Government of the Russian Federation in 2010. Taking into account the existing experience of drilling deep wells on Arctic and Antarctic glaciers by the staff of the Well Drilling Department of the Mining University and the existing infrastructure of the Russian Antarctic Expedition, the most expedient and effective for studying the subglacial Lake Vostok will be the use of the 5G well drilled at the Vostok station, where research is being conducted aimed at the technology of opening and maintaining the well in working condition during the study of the lake The East. This will allow not only to obtain absolutely unique information on various scientific disciplines, but also to a considerable extent strengthen the prestige of our country in Antarctic research.

The objects of research are the technology of drilling deep wells in ice (central Antarctica). The environmental requirements imposed on drilling operations are of particular importance, since the consequences of environmental impact in polar regions with a unique combination of natural conditions can be catastrophic and irreversible. The use of traditional technical means when drilling deep wells in the ice of Antarctica is ineffective. To date, all the developed methods of drilling ice, depending on the nature of its destruction at the bottom, can be divided into thermal, mechanical and thermomechanical.

The purpose of the work is a theoretical analysis of the method of drilling with a hot coolant, which should ensure the exit of a deep well (depth of 2000–4000 meters) into subglacial bedrock, and this article presents the results of calculations of the temperature regime of the well, at which the well will or will not freeze.

Analysis of the current state of the technology of drilling wells in glaciers indicates low efficiency and high accident rate when penetrating deep horizons of glacial covers, which are characterized by an increase in the size of crystals and the presence of temperatures close to the melting point of ice. There are no generally accepted recommendations on the choice of rational parameters for drilling such ice at the moment. Insufficient reliability of the drilling process often led to the most severe consequences of accidents in the well – grabbing of drilling shells.

Keywords: Antarctica, deep drilling, ice, ice core, borehole, heat exchange, heat carrier.

REFERENCES

- 1. Koci B. R., Sonderup J. M. 1990, Evaluation of deep ice core drilling system. PICO Tech. Rep. 90-1. Fairbanks: Univ. of Alaska, 34 p.
- 2. Kudryashov B. B., Chistyakov V. K., Litvinenko V. S. 1991, Drilling wells under conditions of changes in the aggregate state of rocks. Leningrad, 295 p. (*In Russ.*)
- 3. Litvinenko V. S. 2010, Unique equipment and technologies for drilling wells in the ice of Antarctica. *Zapiski Gornogo instituta* [Proceedings of the Mining Institute], vol. 210, pp. 5–10. (*In Russ.*) URL: https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5259
- 4. Hancock W. H., Quivinen K. S., Kelty J. R., Hansen B. L. 1998, Hot water access borehole drilling and thermal probe technology developed at the University of Nebraska-Lincoln. Study of Lake Vostok: Scientific problems and technologies: Abstract report of the International Meeting. St. Petersburg, 91 p. (*In Russ.*)
- 5. Koci B. R. 1994, The AMANDA Project: Drilling precise, large-diameter holes using hot water. *Mem. of National Inst. of Polar Research*, no. 49, pp. 203–211.
- 6. Koci B. 2002, Wotan: a drill for ice cube. Mem. of National Inst. of Polar Research, no. 56, pp. 209-216.
- 7. Medvedsky R. I. 1987, Construction and operation of wells for oil and gas in permafrost. Moscow, 230 p. (In Russ.)
- 8. Lukin V. V., Vasiliev N. I. 2014, Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica. *Annals of Glaciology*, vol. 55, issue 65, pp. 83–89. https://doi.org/10.3189/2014AoG65A002
- 9. Crate F., Black U. 1983, Fundamentals of heat transfer: Transl. from English, Moscow, 512 p. (In Russ.)
- 10. Talalay P. G., Hooke R. L. 2007, Closure of deep boreholes in ice sheets: A discussion. *Annals of Glaciology*, vol. 47, pp. 125–133. https://doi.org/10.3189/172756407786857794
- 11. Timofeev I., Bolshunov A., Avdeev A. 2016, Justification of Lever Arrangement Parameters for Friction-Type Traction Gear. *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 1329–1334.
- 12. Talalay P., Fan X., Xu H., Yu D., Han L., Han J., Sun Y. 2014, Drilling fluid technology in ice sheets: Hydrostatic pressure and borehole closure considerations. *Cold Regions Science and Technology*, vol. 98, pp. 47–54. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.10.012
- 13. Chistyakov V. K., Talalay P. G. 1999, Peculiarities of flushing when drilling wells in glaciers and ice sheets. Sb nauch. tr. NGA Ukrainy [Collection of scientific works of NGA of Ukraine], vol. 4, no. 6, pp. 85–89. (In Russ.)

 $[\]boxtimes$ s215086@stud.spmi.ru

^{** 1234567890}nika@mail.ru

- 14. Kudryashov B. B., Talalay P. G., Chistyakov V. K. 1991, Drilling wells in snow-firn and glacial strata abroad. Technique, technology and organization of exploration work: A review. Moscow, issue 6, 57 p. (*In Russ.*)
- 15. Zakharov A. A., Solovey V. A. 2018, The study of antarctic lake Vostok through ice borehole. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda* [Journal of International Academy of Refrigeration], no. 4, pp. 3–9. (*In Russ.*) https://doi.org/10.17586/1606-4313-2018-17-4-3-9
- 16. Kamensky R. M. 1963, Heat loss of water during pipeline start-up. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], no. 12, pp. 17–25. (*In Russ.*)
- 17. Kamensky R. M. 1964, Experimental studies of the thermal interaction of water pipelines with frozen soils. Thermal processes in frozen rocks. Moscow, 200 p. (*In Russ.*)
- 18. Kamensky R. M. 1965, Heat transfer when filling a water pipeline laid in frozen soil. Processes of heat and mass transfer in frozen rocks. Moscow, pp. 94–97. (*In Russ.*)
- 19. Dmitriev A. N., Bolshunov A. V., Serbin D. V. 2017, Estimation of the freezing process for lake water in the near-contact section of the 5g borehole with subglacial lake Vostok (Antarctica). *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda* [Journal of International Academy of Refrigeration], no. 2, pp. 73–76. (*In Russ.*) https://doi.org/10.21047/1606-4313-2017-16-2-73-76
- 20. Bolshunov A. V., Vasiliev N. I., Timofeev I. P., Ignatiev S. A., Vasiliev D. A., Leichenkov G. L. 2021, Potential technological solution for sampling the bottom sediments of the subglacial lake Vostok: Relevance and formulation of investigation goals. *Zapiski Gornogo instituta* [Proceedings of the Mining Institute], vol. 252, no. 6, pp. 779–787. (*In Russ.*) https://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.1
- 21. Kovalchuk V. S., Pevneva A. G. 2016, Temperature regime of well drilling in permafrost areas. VIII International student scientific conference. Student scientific forum-2016. Moscow, pp. 45–49. (*In Russ.*)
- 22. Filimonov M. Yu., Vaganova N. A. 2015, Simulation of technogenic and climatic influences in permafrost for northern oil fields exploitation. *Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer*, vol. 9045, pp. 178–185. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20239-6_18
- 23. Talalay P. G. 2006, Penetration into subglacial lakes: Plans and reality. Priroda [Nature], no. 9 (1093), pp. 45–53. (In Russ.)
- 24. Aliyeva T. E. [et al.]. 2016, The North and the Arctic in the new paradigm of world development: Current problems, trends, prospects. Apatity: Institute of Economic Problems named after G. P. Luzin, KSC RAS, 420 p. (*In Russ.*)
- 25. Kotlyakov V. M. 2012, On the history of the international project of drilling a deep glacial well at Vostok station. *Lod i sneg* [Ice and snow], vol. 52, no. 4, pp. 5–8. (*In Russ.*) https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-5-8
- 26. Kotlyakov V. M., Lipenkov V. Ya., Vasiliev N. I. 2013, Deep drilling in Central Antarctica and penetration into the subglacial Lake Vostok. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], vol. 83, no. 7, pp. 591–605. (*In Russ.*) https://doi.org/10.7868/S0869587313070062
- 27. Shkurko A. M. 1998, Fundamentals of the theory and practice of drilling by fusion in the ice deposits of Antarctica, PhD thesis. St. Petersburg, 44 p. (*In Russ.*)
- 28. Talalay P. G. 2007, Scientific and practical foundations of efficient and environmentally friendly technology for drilling deep wells in glaciers, PhD thesis. St. Petersburg, 41 p. (*In Russ.*)
- 29. Kuhl T., Gibson C., Johnson J., Boeckmann G., Moravec E., Slawny K. 2021, Agile Sub-Ice Geological (ASIG) Drill development and Pirrit Hills field project. *Annals of Glaciology*, vol. 62, issue 84, pp. 53–66. https://doi.org/10.1017/aog.2020.59
- 30. Vasiliev N. I. 2004, Rational technology for drilling wells in ice massifs using an electromechanical projectile on a cable, PhD thesis. St. Petersburg, 33 p. (*In Russ.*)
- 31. Litvinenko V. S. 1991, Theoretical and experimental foundations of drilling of rocks by melting, PhD thesis. Moscow, 38 p. (In Russ.)
- 32. Talalay P. G. 1994, Development of technology for drilling wells in ice with electromechanical projectiles on a load-carrying cable, Phd thesis. St. Petersburg, 21 p. (*In Russ.*)
- 33. Humphrey N., Echelmeyer K. 1990, Hot-water drilling And bore-hole closure in cold ice. *Journal of Glaciology*, vol. 36, issue 124, pp. 287–298. https://doi.org/10.3189/002214390793701354
- 34. Li Y., Talalay P. G., Fan X., Li B., Hong J. 2021, Modeling of hot-point drilling in ice. *Annals of Glaciology*, vol. 62, issue 85-86, pp. 360–373. https://doi.org/10.1017/aog.2021.16

The article was received on June 10, 2022