ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья
УДК 622.243.23

Экспериментальные исследования теплового способа бурения плавлением скважины в ледовом массиве с одновременным контролируемым расширением ее диаметра

Д.В.СЕРБИН ✉, А.Н.ДМИТРИЕВ
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Сербин Д.В., Дмитриев А.Н. Экспериментальные исследования теплового способа бурения плавлением скважины в ледовом массиве с одновременным контролируемым расширением ее диаметра // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 833-842. DOI: 10.31897/PMI.2022.82

Аннотация. В сезонные работы 64-й Российской антарктической экспедиции в 2018-2019 гг. на буровом комплексе им. Б.Б.Кудряшова (станция «Восток», Антарктида) специалисты Санкт-Петербургского горного университета провели экспериментальные исследования процесса бурения плавлением с одновременным расширением скважин в ледовом массиве. Для исследований были разработаны, изготовлены и испытаны стенд и натурная модель термогидравлического бурового снаряда-расширителя. Первые стендовые испытания натурной модели подтвердили ее работоспособность и пригодность для экспериментального бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве, определены эксплуатационные возможности, обнаружены недостатки, которые будут учтены в будущем. В статье обоснован выбор конструктивных элементов термогидравлического бурового снаряда-расширителя. Установлено, что технологию бурения сплошным забоем с одновременным расширением скважины в ледовом массиве возможно реализовать за счет комбинирования процесса контактного бурения плавлением и конвективного расширения с созданием принудительной призабойной кольцевой циркуляции подогретого теплоносителя. Определены зависимости интенсивности расширения от основных технологических параметров: активной тепловой мощности нагревательных элементов пенетратора и циркуляционной системы, механической скорости бурения, производительности насоса. По результатам исследований будет спроектирован и изготовлен экспериментальный образец термогидравлического бурового снаряда-расширителя для испытания его в условиях скважины 5Г.

Ключевые слова: бурение льда плавлением; бурение с одновременным расширением; Антарктида; термогидравлический буровой снаряд-расширитель; эксперименты; стендовые испытания

Благодарность. Исследование выполнено с помощью субсидии на выполнение Государственного задания в сфере научной деятельности на 2022 г. № FSRW-2021-0011.

Поступила: 15.10.2021 ***Принята: 06.09.2022*** ***Онлайн: 17.10.2022*** ***Опубликована: 10.11.2022***

Введение. Детальное изучение ледников и подледниковой среды осуществляется благодаря сочетанию прямых и дистанционных методов исследований [1-3]. К прямым методам относится бурение скважин с отбором проб льда, газовых и твердых включений [4-6]. В зависимости от цели подбирается технология бурения и соответствующее оборудование [7-9]. Проведенный анализ технологий бурения выявил отсутствие единого разработанного и испытанного способа, а также технического средства бурения скважин во льду с одновременным их расширением. Накопленный специалистами Санкт-Петербургского горного университета опыт бурения скважин тепловым и механическим способами в ледовом массиве Антарктиды [10-12] позволил достигнуть рекордных глубин ледовых скважин в 2755 [13] и 3769 м [14]. Также существует большое количество научных исследований процесса образования каверн тепловым способом в ледовом массиве, проведенных в 80-х годах XX в. [15], успешные теоретические и экспериментальные исследования российских ученых [2, 16-18] являются научным заделом для разработки технологии и технических средств бурения льда плавлением с одновременным или последующим расширением [19].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 833-842 DOI: 10.31897/PMI.2022.82
© Д.В.Сербин, А.Н.Дмитриев, 2022

В практике бурения скважин в ледовом массиве наибольшее распространение получили механический и тепловой способы. Бурение плавлением по физике процесса разрушения льда относится к тепловому способу и выгодно отличается от других известных [20]. Техническое средство, основанное на тепловом способе разрушении льда, требует наименьшего количества конструктивных элементов, при этом извлекается в два и более раза меньший объем продуктов бурения. Например, талая вода или лед в водосборном баке теплового снаряда имеют плотность 1000 и 920 кг/м^3 соответственно, а при механическом разрушении шлам имеет плотность 390-480 кг/м^3.

Суровые условия заполярных регионов и отдаленность от населенных пунктов предъявляют особые требования к буровому оборудованию: минимальные массогабаритные характеристики, простота и надежность, возможность использования при низких температурах ледников (до −57 °С на станции «Восток») и окружающей среды [21-23]. Таким образом, стандартные технологические и технические решения бурения скважин в условиях Арктики и Антарктики требуют значительной модернизации перед началом научно-исследовательских работ, а использование грузонесущего кабеля при бурении в несколько раз снижает массу бурового оборудования.

В сезонные работы 64-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) гляцио-буровой отряд, в состав которого входят специалисты Санкт-Петербургского горного университета и НИИ Арктики и Антарктики, на буровом комплексе им. Б.Б.Кудряшова станции «Восток» в Антарктиде выполнил ряд экспериментальных исследований, предусмотренных программой буровых работ [24]. Целью исследований была оценка эксплуатационных возможностей бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве с использованием термогидравлического бурового снаряда-расширителя (ТБСР). Это позволит определить зависимость скорости контактного бурения плавлением и интенсивности конвективного расширения от мощности нагревательных элементов, производительности насоса и массогабаритных характеристик бурового снаряда для проверки теоретических исследований, которые описывают тепломассообменные процессы, происходящие на забое и в призабойной зоне.

Результаты данных исследований станут научным обоснованием разработки эскизного проекта термогидравлического бурового снаряда-расширителя [13], который будет применяться при сооружении новой скважины чистого доступа к подледниковому озеру Восток для подготовки нижнего участка скважины и вскрытия озера [25-27]. Расширение нижнего участка скважины с последующим вскрытием подледникового озера позволит уменьшить высоту и снизить скорость подъема озерной воды, что, в свою очередь, обеспечит долговременный доступ в подледниковое пространство и предотвратит активное перемешивание заливочной жидкости с водой. Поскольку прослойка талой воды является буферным слоем, повышается экологичность процесса вскрытия.

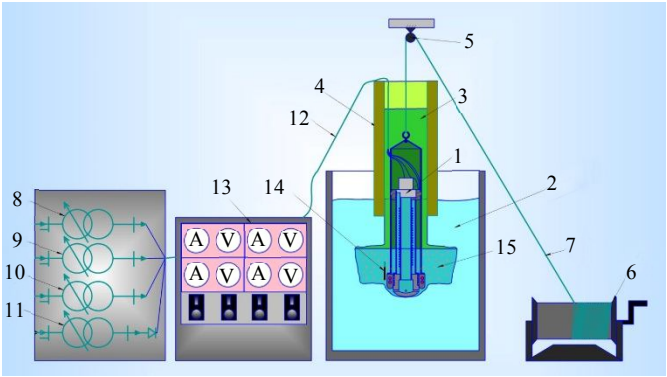


Рис.1. Схема экспериментального стенда для исследования процесса бурения плавлением с одновременным расширением скважин в ледовом массиве

1 – модель термогидравлического бурового снаряда-расширителя; 2 – блок льда; 3 – заливочная жидкость; 4 – обсадная труба; 5 – блок; 6 – ручная лебедка; 7 – трос; 8, 9, 10 – автотрансформаторы переменного тока; 11 – лабораторный автотрансформатор переменного тока с выпрямителем; 12 – токоведущие жилы; 13 – пульт управления; 14 – термометр; 15 – талая вода

По заявленной технологии подготовки нижнего участка скважины с последующим вскрытием необходимо бурение одного метра на контакте с подледниковым озером и одновременное расширение диаметра в два-три раза от номинального. По аналогии со скважиной 5Г на станции «Восток» диаметр бурения составляет 135 мм, что требует расширения диаметра до 170-305 мм.

В настоящее время на базе Санкт-Петербургского горного университета не имеется криокамер, поэтому был сооружен стенд для испытаний модели разработанного устройства на станции «Восток» в Антарктиде, где погодные условия и техническое оснащение бурового комплекса позволяют в полном объеме обеспечить проведение экспериментальных исследований бурения льда.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Методология. Для проведения экспериментальных исследований на базе бурового комплекса им. Б.Б.Кудряшова станции «Восток» в Антарктиде был разработан специальный экспериментальный стенд (рис.1), который имитирует работу термогидравлического бурового снаряда-расширителя в призабойной зоне с системой нагревательных элементов и принудительной циркуляцией теплоносителя, способного осуществлять необходимые технологические процессы с возможностью регулирования основных параметров (электрической мощности нагревательных элементов, производительности насоса, скорости подачи снаряда на забой). Все оборудование размещалось в здании бурового комплекса [17, 28, 29].

Ручная лебедка 6 жестко болтовым соединением закреплена в основании помещения бурового комплекса, с ее помощью осуществляется спуск, подъем и поддержание в вертикальном положении модели ТБСР 1 в скважине. Модель ТБСР 1 через блок 5 подвешивается на трос 7, другой конец троса закреплен в барабане лебедки 6 и намотан на нее.

Блоки льда (рис.1) цилиндрической формы были заготовлены зимовочным составом 63-й РАЭ станции «Восток» путем постепенного искусственного замораживания дистиллированной воды в металлических бочках, объемом 216,5 л, высотой 878 и диаметром 585 мм. Полученный матовый лед обладал плотностью 912-920 кг/м^3 и слоистой мелкотрещиноватой структурой, а также имел включения воздушных пузырьков. Для увеличения проходки по льду и приближения к реальным скважинным условиям перед каждым опытом в блок льда вмораживалась труба из стеклотекстолита длиной 1 м на глубину 0,2 м. Такая труба используется в качестве обсадной трубы в скважине 5Г и имеет внутренний диаметр 165 мм, что позволяет обеспечить беспрепятственный спуск ТБСР на забой.

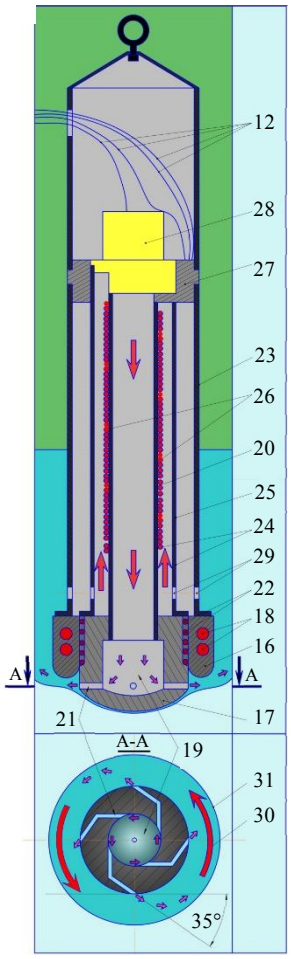


Рис.2. Схема модели термогидравлического бурового снаряда-расширителя

16 – коронка; 17 – пенетратор; 18 – кольцевые электрические нагреватели; 19 – коллектор; 20 – внутренняя водонагнетательная трубка; 21 – гидравлические каналы; 22 – нагревательный элемент (КНМС НХ); 23 – корпус; 24 – центральная двойная труба; 25 – наружная труба; 26 – нагревательный элемент (КНМС НХ); 27 – корпус насоса; 28 – насос; 29 – заборные окна; 30 – кольцевая циркуляция; 31 – стенки скважины

Внутреннее пространство трубы после заморозки заполняется заливочной жидкостью 3 в объеме 13-15 л, что соответствует столбу жидкости высотой 0,5-0,6 м. В качестве заливочной жидкости 3 применялись авиационное топливо марки ТС-I (керосин), используемое для бурения скважины 5Г, и кремнийорганическая жидкость марки ПМС-10 (полиметилсилоксан), приготовленная для экспериментальных исследований [14, 30, 31].

Разработаны, изготовлены и собраны две модели термогидравлического бурового снаряда-расширителя по патенту на изобретение RU № 2700143 C1 [5, 32], которые предназначены для экспериментального бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважины. Модель ТБСР I (рис.2) включает рабочий орган, состоящий из коронки 16 и пенетратора 17. Коронка изготовлена из алюминия в лаборатории LGGE (Франция) и использовалась в снаряде ТБЗС-132 при бурении глубоких скважин в Антарктиде [3, 11]. Внутри коронки жестко закреплены кольцевые электрические нагревательные элементы 18, которые представляют собой трубчатые электронагреватели (ТЭНы) [33, 34]. Пенетратор 17 цилиндрической формы с закругленной нижней частью изготовлен из металла с высокой теплопроводностью – алюминия [35], внутри него расположен коллектор 19 диаметром, равным наружному диаметру водонагнетательной трубки 20 и глубиной 50 мм для посадки в натяг. В нижней части пенетратора 17 из коллектора 19 выполнены гидравлические

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 833-842 DOI: 10.31897/PMI.2022.82
© Д.В.Сербин, А.Н.Дмитриев, 2022

а *б*



Рис.3. Модели термогидравлического бурового снаряда-расширителя: ТБСР II (*а*); ТБСР I (*б*)

каналы 21, выходящие по периметру нижнего торца пенетратора 17 и расположенные диаметрально противоположно относительно друг друга. Гидравлические каналы 21 позволяют направить поток теплоносителя к стенке скважины тангенциально, что инициирует закручивание потока теплоносителя вокруг оси ТБСР. Создание такой кольцевой циркуляции на забое обеспечивает образование полости, близкой к цилиндрической форме. На внешней стороне пенетратора 17 выполнены каналы для возможности кольцевой укладки электрического нагревательного элемента 22. В качестве нагревательного элемента 22 был выбран хорошо зарекомендовавший себя в условиях бурения при низких температурах ледового массива (до −60 °С) кабель нагревостойкий с минеральной изоляцией из периклаза в оболочке из нержавеющей стали и однопроволочной токопроводящей жилой из нихрома марки Х20Н80-Н (КНМС НХ). Выбранная конструкция и геометрическая форма рабочего органа не предполагает достижения высоких значений скорости бурения, а должна обеспечивать нагрев теплоносителя в коллекторе и гидравлических каналах и минимальные затраты тепловой энергии на процесс бурения при малых значениях скорости проходки (до 1 м/ч).

Верхняя часть коронки 16 жестко болтовым соединением скреплена с корпусом 23. В качестве корпуса 23 использовались укороченные колонковые трубы с наружным диаметром 108 мм и толщиной стенки 4,5 мм (ГОСТ Р 51682-2000). Внутри корпуса 23 установлена центральная двойная труба 24, состоящая из внутренней трубы 20, соединенной с коллектором 19, и наружной трубы 24. В качестве труб 20 и 24 использовались стандартные стальные трубы БХ-48×4-А-ГОСТ и БХ-26×3-А-ГОСТ (ГОСТ 32678-2014). Соединение труб циркуляционной системы осуществлялось с использованием соединительных муфт стандартных типоразмеров промышленного выпуска.

На внутренней трубе 20 закреплен электрический нагревательный кабель КНМС НХ 26. Верхняя часть центральной двойной трубы 20 прикреплена к насосному отсеку, состоящему из корпуса насоса 27 и установленного в нем насоса 28. Рациональным выбором механизма прокачки теплоносителя в модели ТБСР стал успешно эксплуатируемый электроцентробежный насос ЭЦН-91С, который входит в состав снарядов ТБЗС-132, ТБЗС-152М, ТБС-112ВЧ и работает от постоянного тока напряжением до 27 В.

Модель ТБСР II (рис.3, *а*) конструктивно отличается от модели ТБСР I (рис.3, *б*) отсутствием в рабочем органе коронки 16 с нагревательными элементами 18 и корпуса 23, все остальные элементы остались без изменений. Технические характеристики моделей термогидравлических буровых снарядов-расширителей представлены в табл.1.

Таблица 1

Технические характеристики моделей ТБСР

Параметры	ТБСР I	ТБСР II
Диаметр коронки, мм:		
наружный	132	–
внутренний	90	–
Диаметр пенетратора, мм	90	90
Номинальная мощность коронки, кВт	3,0	–
Номинальная мощность пенетратора, кВт	1,5	
Номинальная мощность нагревателей циркуляционной системы, кВт	1	2,5
Циркуляционная система:		
длина внешней трубы, м	0,4	
диаметр наружный/внутренний	48/40	
длина внутренней трубы, м	0,4	
диаметр наружный/внутренний	26,8/20	

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.82

Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 833-842
© Д.В.Сербин, А.Н.Дмитриев, 2022

Окончание табл.1

Параметры	ТБСР I	ТБСР II
Насос:	ЭЦН-91С	
мощность приводного двигателя, кВт	0,2	
производительность, л/мин	63,3	
Электропитание:		
ТЭНы коронки (тип, напряжение), В	~1ф, 0-220	
КНМСНХ (тип, напряжение), В	~1ф, 0-220	
насос (напряжение), В	27	
Номинальная мощность снаряда, кВт	5,7	4,2
Длина снаряда, м	1,07	
Масса снаряда, кг	35,4	31,0

Питание нагревательных элементов КНМС НХ 22 и 26, нагревательного элемента 18 коронки 16 осуществляется через автотрансформаторы переменного тока 8, 9 и 10, подключенные к бытовой сети. Подключение насоса 27 осуществляется через лабораторный автотрансформатор переменного тока с выпрямителем 11, также подключенный к бытовой сети. Оперативный контроль выполняется при помощи адаптированного авторами под проводимые исследования пульта управления 13 от малогабаритной буровой установки, которая была разработана для колонкового электромеханического бурения ледников на Алтае. На передней панели пульта фиксируются электрические характеристики энергопотребителей. Управление и регулирование технологических параметров бурения происходит вручную. Включение и выключение всех энергопотребителей (КНМС НХ 22 и 26, нагревательного элемента 18 и насоса 28) осуществляется с пульта управления 13.

Стенд работает следующим образом (рис.4). Один конец троса 7 через блок 5 крепится к верху модели ТБСР I, другой конец троса 7 закреплен и намотан на барабан лебедки 6. Модель ТБСР I поднимается на максимальную высоту, под нее устанавливается заготовленный блок льда 2 цилиндрической формы, оси модели ТБСР и блока льда центрируются вертикально. Внутритрубное пространство заполняется заливочной жидкостью. Модель ТБСР I спускается в обсадную трубу 4, спуск останавливается по достижении пенетратором 17 блока льда 2. После постановки на блок льда модели ТБСР I через АТР 8 и 9 подается регулируемый переменный электрический ток по токоведущим жилам 12 к нагревательным элементам 22 и 18. Пенетратор 17 и коронка 16 постепенно нагреваются, по достижении положительной температуры рабочего органа происходит плавление льда, образуется забой скважины. Процесс бурения продолжается до тех пор, пока объем талой воды (теплоносителя) 15 не достигнет необходимого объема для заполнения циркуляционной системы, затем включаются нагревательный элемент 26 и насос 28. Как изображено на рис.2, талая вода 15 через заборные окна 29 попадает в центральную двойную трубу 24, пространство между наружной 25 и внутренней 20 трубами является всасывающей линией. Талая вода 15 поднимается по ней и прокачивается насосом 28, откуда нагнетается по внутренней трубе 20 в коллектор 19, где равномерно распределяется по четырем гидравлическим каналам 21 малого диаметра, тангенциальная ориентация которых создает на выходе кольцевую циркуляцию 30 в призабойной зоне.

За счет создания кольцевой циркуляции 30 в призабойной зоне стенки скважины 31 оплавляются в радиальном направлении, при этом происходит расширение. Во время циркуляции талой воды 15 в центральной двойной трубе 24 осуществляется постоянный ее подогрев, что количественно можно оценить при помощи показаний термометров как энтальпию. Рейс бурения плавлением с одновременным расширением скважины в ледовом массиве производится, как правило, на всю мощность блока льда. Измерение диаметра скважины осуществлялось при помощи ручного каверномера, собранного на станции «Восток».



Рис.4. Внешний вид модели и ледового блока

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 833-842 DOI: 10.31897/PMI.2022.82
© Д.В.Сербин, А.Н.Дмитриев, 2022

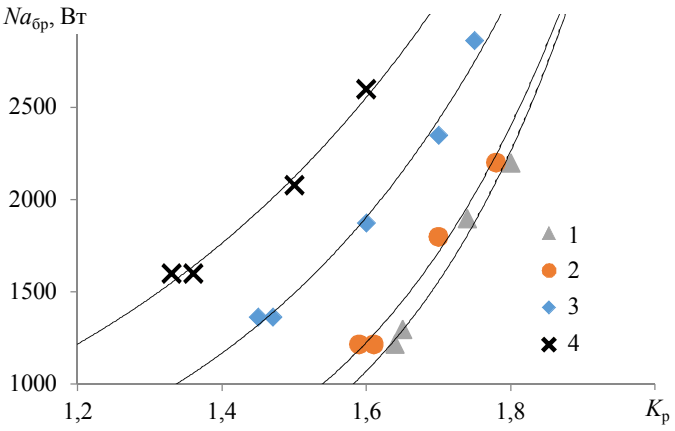


Рис.5. Опытные значения зависимости коэффициента расширения $K_р$ от суммарной активной тепловой мощности $Na_{бр}$

Механическая скорость бурения-расширения $v_{бр}$
1 – 0,2; 2 – 0,3; 3 – 0,5; 4 – 0,8 м/ч

Анализ результатов. Проведение запланированного количества экспериментов в условиях станции «Восток» обладает своей спецификой и требует больших временных затрат на монтажные работы, подготовку (намораживание) блоков льда, замену нагревательного кабеля КНМС НХ при выходе его из строя, изменение конструкции рабочего органа и циркуляционной системы, настройку и подготовку оборудования. Учитывая сложности проведения экспериментальных исследований и короткий сезонный рабочий период, была проведена серия экспериментов, включающая 17 успешных опытов. Исследования велись при одинаковых условиях: температуре льда –20 (±2) °С, температуре окружающей среды −20 (±2) °С, атмосферном давлении 450 мм рт.ст.

В ходе исследований (рис.4) были испытаны основные узлы и система энергообеспечения экспериментального стенда, отработаны технологии приготовления блоков искусственного льда с вмораживанием обсадной колонны в ледовый массив и последующей заливкой низкотемпературной жидкостью. Эксперименты, проведенные на стенде, показали, что вмораживание обсадной трубы на глубину 150 мм в блок искусственного льда позволяет провести эксперимент с проходкой 0,5-0,6 м, что соответствует 0,5-2 ч времени бурения, обеспечивая полную герметизацию внутрискважинного пространства. По окончании каждого опыта из скважины в течении 2-3 мин при помощи ручного насоса полностью откачивалась заливочная жидкость и талая вода.

При подаче модели бурового снаряда на забой под собственным весом и без поддержания равновесного состояния при помощи лебедки, ввиду неравномерности распределения тепловой энергии в рабочем органе и несовпадении центра масс модели с ее центральной осью, происходило отклонение в 18° от вертикального направления. Рациональным выбором способа подачи ТБСР на забой, по мнению авторов, является дискретный способ, обеспечивающий строго вертикальное продвижение снаряда.

Также экспериментально подтверждено, что шероховатость поверхности рабочего органа или минимальное засорение забоя ледовой скважины приводит к уменьшению механической скорости бурения или к полной остановке бурения [4, 8]. Для предотвращения подобных ситуаций необходимо контролировать целостность пенетратора и следить за чистотой поверхности льда перед началом проведения каждого опыта.

Конструкция модели ТБСР I оказалась непригодна для проведения экспериментальных исследований, она не обеспечила процесс расширения. Тепловая коронка подогревала талую воду в затрубном пространстве, а выходящий турбулизированный поток воды уносил ее наверх, что приводило к бесполезным потерям тепловой энергии и минимизации энтальпии в циркуляционной системе. Также плотно прилегающая к стенкам скважины коронка создавала дополнительные гидравлические сопротивления при движении теплоносителя в призабойной зоне. Таким образом, только модель ТБСР II позволила успешно провести эксперименты, удовлетворив предъявляемые к ней требования.

Серия экспериментальных исследований проводилась с целью определения влияния суммарной активной тепловой мощности рабочего органа и циркуляционной системы, а также (рис.5) механической скорости бурения на интенсивность расширения скважины в ледовом массиве. Механическая скорость бурения при проведении исследований изменялась в пределах от 0,2 до 0,8 м/ч. В конструкции рабочего органа модели ТБСР II два ТЭНа (КНМС НХ), суммарная мощность которых в процессе проведения опытов изменялась от 1,2 до 3 кВт. Удельная нагрузка достигалась собственным весом модели и составила 17,0 кН/м^2, лебедкой поддерживалось только осевое вертикальное направление

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

модели. Откачка талой воды с забоя в процессе проведения опыта не производилась, только по его завершении. В качестве показателя расширения введен безразмерный коэффициент расширения $K_р$, который численно равен отношению радиуса расширения к радиусу бурения.

Основные результаты серии экспериментального бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважины в ледовом массиве:

• Разработанная и изготовленная модель термогидравлического бурового снаряда-расширителя конструкции по патенту на изобретение RU № 2700143 C1 для бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважины в ледовом массиве работоспособна и пригодна для экспериментального бурения.

• Технологию бурения сплошным забоем с одновременным расширением скважины в ледовом массиве возможно реализовать при комбинации контактного плавления для процесса бурения и создания принудительной призабойной кольцевой циркуляции подогретого теплоносителя для процесса расширения.

• Основными факторами, определяющими радиус расширения скважины, являются механическая скорость бурения, активная тепловая мощность рабочего органа и циркуляционной системы, рабочие характеристики насоса (давление и производительность).

• На основе результатов экспериментальных данных (рис.5) сделаны выводы, что в процессе бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважин в ледовом массиве при постоянных параметрах механической скорости бурения, производительности насоса и активной тепловой мощности образуется полость усеченной конусоидальной формы с закругленными углами и большим верхним основанием. А при постоянной активной тепловой мощности и увеличении механической скорости бурения уменьшаются радиус расширения, средняя температура талой воды в призабойной зоне и потери тепла на рассеивание и оплавление боковых стенок скважины. При постоянной механической скорости бурения и увеличении активной тепловой мощности также увеличиваются радиус расширения, средняя температура талой воды в призабойной зоне и потери тепла на рассеивание и оплавлением боковых стенок скважины.

• Конструкция модели ТБСР II, состоящая из пенетратора и двойной центральной трубы с намотанным на них нагревательным кабелем КНМС НХ суммарной мощностью 4 кВт, корпуса и насоса ЭЦН-91С, а также выполненные в пенетраторе коллектор и горизонтальные гидравлические каналы, образующие с касательной пенетратора угол 30°, обеспечивают бурение сплошным забоем диаметром 90 мм и расширение ледовой скважины до 180 мм.

• Опытным путем определен безразмерный коэффициент увеличения радиуса скважины $K_к$ на границе контакта заливочная жидкость-талая вода, характеризующий потери тепловой энергии на прогрев и оплавление боковых стенок, а также перегрев талой воды, который находится в пределах от 0,77 до 3,33 и зависит от механической скорости бурения, коэффициента расширения, суммарной активной тепловой мощности, времени бурения, теплофизических свойств льда и заливочной жидкости. В результате обработки экспериментальных данных получена плоскость для определения $K_к$ в диапазоне изменения коэффициента расширения $K_р$ от 1 до 2 и механической скорости бурения расширения $v_{бр}$ от 0,2 до 0,8 м/ч (рис.6). Коэффициент $K_к$ имеет экспоненциальную зависимость от скорости бурения-расширения и коэффициента расширения, что приводит к экспоненциальному росту затрачиваемой тепловой энергии на процесс бурения с одновременным расширением. Рациональный диапазон скорости бурения-расширения составляет 0,5-0,8 м/ч, при этом $K_к$ не превышает 1 (при проходке 0,5 м (рис.6, *а*), что свидетельствует о минимальных тепловых потерях и, соответственно, минимальной разработке радиуса расширения. При значении $v_{бр} \le 0{,}3$ м/ч $K_к$ резко возрастает, и его величина превышает 1, что ведет к значительному росту непроизводительных тепловых потерь. На рис.6, *б* представлен $K_к$, приведенный к времени.

• Рациональные эксплуатационные параметры для процесса бурения плавлением с одновременным расширением скважин в ледовом массиве с использованием модели ТБСР II достигается в интервале скоростей бурения-расширения 0,5-0,8 м/ч, отношением радиуса бурения к радиусу расширения 1:2 и проходкой до 1 м. При этом затрачиваемая тепловая мощность экспоненциально растет с увеличением проходки, и радиус скважины на верхней границе участка расширения до двух раз больше конечного радиуса расширения.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 833-842 DOI: 10.31897/PMI.2022.82
© Д.В.Сербин, А.Н.Дмитриев, 2022

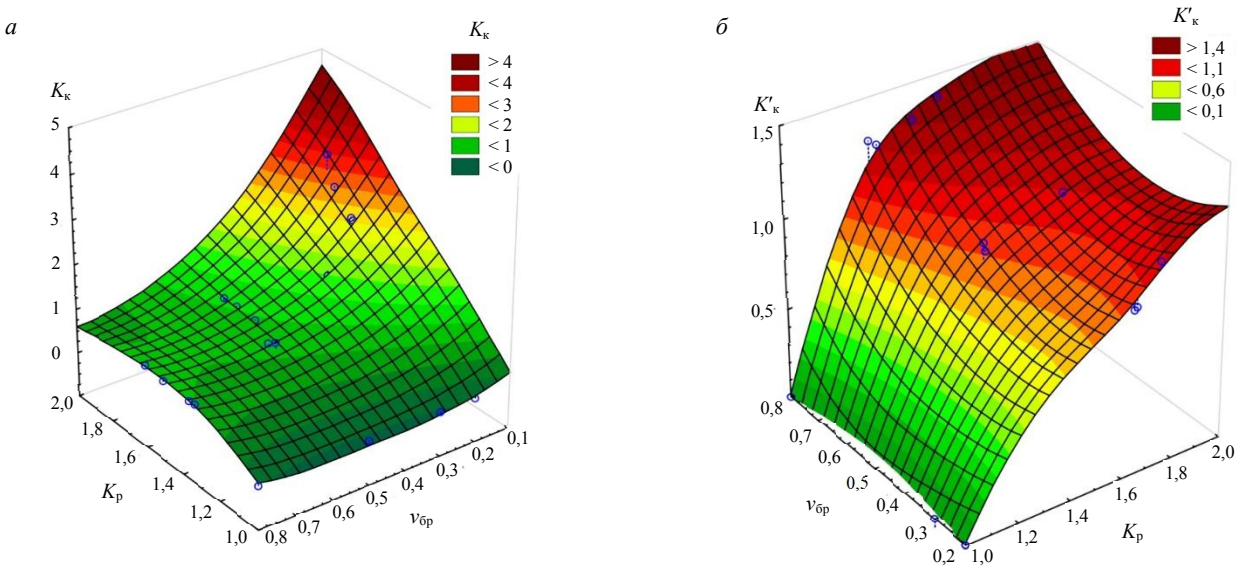


Рис.6. Эмпирические зависимости коэффициента увеличения радиуса расширения $K_к$ от механической скорости бурения-расширения $v_{бр}$ = 0,2-0,8 м/ч и коэффициента расширения $K_р$ = 1-2 при диаметре бурения 90 мм и проходке 0,5 м (*а*), времени бурения-расширения 1 ч (*б*)

В табл.2 представлены параметры, характеризующие процесс бурения плавлением с одновременным расширением в зависимости от скорости бурения при проходке 0,5 м и $K_р$ = 1,6.

Таблица 2

Сравнение экспериментальных данных различных скоростей бурения

Параметры	Скорость бурения, м/ч			
	0,2	0,3	0,5	0,8
Активная тепловая мощность, кВт	1,08	1,24	1,91	2,56
Затраченное время, ч	2,50	1,67	1,00	0,63
Затраченная энергия, кДж	2,69	2,06	1,91	1,60
$\frac{Q_i - Q_{min}}{Q_{min}} \cdot 100\,\%$	+67,97	+28,65	+19,06	0

Примечание. Q_i – активная тепловая мощность *i*-го опыта, Вт; Q_{min} – минимальная активная тепловая мощность, затраченная при различных скоростях бурения-расширения и одинаковой проходке в 0,5 м.

Температура талой воды во время экспериментальных исследований при скорости бурения 0,2 и 0,3 м/ч находилась в пределах 10-11 °С, при 0,5 м/ч – 8-9 °С, а при 0,8 м/ч – 5-6 °С.

По результатам исследований сделан вывод, что нижний предел скорости бурения находится на отметке 0,5 м/ч, при снижении скорости бурения от 0,3 до 0,2 м/ч затраты энергии увеличиваются на 30,5 %, причем это увеличение расхода энергии можно отнести к бесполезным потерям тепла. Верхний предел скорости бурения зависит от активной тепловой мощности снаряда и характеристик насоса. Так с увеличением скорости бурения от 0,3 до 0,8 м/ч и суммарной активной тепловой мощности от 1,24 до 2,56 кВт при постоянной производительности насоса, затрачиваемой энергии, обеспечивающей расширение на 60 %, требуется на 22,3 % меньше.

В реальных скважинных условиях при бурении на больших глубинах (2000-4000 м) возможен отказ нагревательных элементов из-за высокого гидростатического давления и низкого качества соединения выводных контактов. Используемый в данной конструкции насос ЭЦН-91С не проходил испытания при давлении более 30 МПа. Известно, что ствол скважины 5Г-1 был пробурен до глубины 2755 м при помощи бурового снаряда ТБЗС-132, который включал в себя данный насос и успешно эксплуатировался, в связи с этим можно предположить, что насос ЭЦН-91С является надежным устройством и вполне пригоден для скважинных испытаний в условиях высокого гидростатического давления.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Заключение. Разработанный стенд и экспериментальные модели для имитации бурения плавлением с одновременным расширением позволили выполнить первые исследования процесса образования локальных полостей в ледовом массиве тепловым способом с заданной геометрической формой. Экспериментальные исследования доказали возможность технической реализации способа бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважин в ледовом массиве и позволили определить эксплуатационные технологические параметры процесса и пути совершенствования применяемого оборудования. Конструкция модели ТБСР II обеспечила расширение скважины в ледовом массиве в два раза, при этом диаметр на границе талой воды и заливочной жидкости или воздуха составил отношение с диаметром бурения 4:1 в рациональном диапазоне механических скоростей бурения-расширения, который находится в интервале 0,5-0,8 м/ч. Для расширения скважины в ледовом массиве более чем в два раза при диаметре бурения равном или более 90 мм необходима замена насоса ЭЦН-91С на насос с большими производительностью и давлением нагнетания.

Способ бурения плавлением с одновременным расширением скважин в ледовом массиве, несмотря на высокую энергоемкость процесса и низкую скорость бурения-расширения (0,2-0,5 м/ч), имеет явное преимущество перед механическим способом, который заключается в разрушении (расплавлении) большего по объему льда, что, в свою очередь, увеличивает проходку за рейс в два раза. Также объединение технологических процессов бурения и расширения в одном устройстве позволяет сократить количество рейсов и время на сборку/разборку бурового снаряда. Аналогов термогидравлического бурового снаряда-расширителя по функциональности в практике бурения не существует, что является его дополнительным преимуществом.

Авторы выражают глубокую признательность за помощь при подготовке и проведении экспериментальных исследований участникам гляциобурового отряда 64-й Российской антарктической экспедиции: начальнику гляциобурового отряда канд. географических наук А.А.Екайкину, ведущим инженерам-буровикам канд. техн. наук А.В.Большунову и А.В.Туркееву, главному специалисту по эксплуатации бурового оборудования И.О.Шпанскому.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алехина И.А., Васильев Н.И., Липенков В.Я.* Проблемы защиты окружающей среды и экологического мониторинга в проектах изучения подледниковых озер Антарктиды // Лед и снег. 2012. Т. 52. № 4. С. 104-114. DOI: 10.15356/2076-6734-2012-4-104-114

2. *Кудряшов Б.Б., Соловьев Г.Н.* Анализ теплообменных процессов при бурении-плавлении льда паровым конденсатором // Записки Горного института. 1981. Т. 86. С. 111-117.

3. *Литвиненко В.С., Васильев Н.И.* Разработка породоразрушающего инструмента для бурения скважин во льду // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 15-20.

4. *Онищин В.П.* Комплекс технических средств для изыскательских работ на шельфе арктических морей // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 46-49.

5. Патент № 2700143 С1 РФ. Тепловой снаряд для бурения плавлением / Н.И.Васильев, Д.В.Сербин, А.Н.Дмитриев, А.В.Большунов. Опубл. 12.09.2019. Бюл. № 26.

6. *Полякова Е.В.* Статистическая обработка результатов микроструктурного анализа ледяных кернов из глубоких скважин на станции «Восток» (Центральная Антарктида) // Записки Горного института. 2007. Т. 173. С.17-19.

7. *Масолов В.Н., Попов С.В., Лукин В.В., Попков А.М.* Рельеф дна и водное тело подледникового озера Восток, Восточная Антарктида // Доклады Академии наук. 2010. Т. 433. № 5. С. 693-698.

8. *Christner B.C., Royston-Bishop G., Foreman C.M. et al.* Limnological conditions in Subglacial Lake Vostok, Antarctica // Limnology and Oceanography. 2006. Vol. 51. Iss. 6. P. 2485-2501. DOI: 10.4319/lo.2006.51.6.2485

9. *Clow G.D., Koci B.R.* A fast mechanical access drill for polar glaciology, paleoclimatology, geology, tectonics and biology // Memoirs of National Institute of Polar Research. 2002. Special issue. Vol. 56. P. 5-37.

10. *Барков Н.И.* Первая скважина на станции Восток // Лед и снег. 2012. Т. 52. № 4. С. 9-11.

11. *Yazhou Li, Talalay P.G., Xiaopeng Fan et al.* Modeling of hot-point drilling in ice // Annals of Glaciology. 2021. Vol. 62. Iss. 85-86. P. 360-373. DOI: 10.1017/aog.2021.16

12. *Litvinenko V.S.* Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development // Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125652. DOI: 10.1016/j.chemer.2020.125652

13. *Липенков В.Я., Лукин В.В., Булат С.А. и др.* Итоги исследования подледникового озера Восток в период МПГ // Вклад России в Международный полярный год 2007/08: полярная криосфера и воды суши. М.-СПб.: Паулсен, 2011. С. 17-45.

14. *Васильев Н.И., Дмитриев А.Н., Блинов П.А.* Бурение глубокой скважины на российской антарктической станции «Восток» // Вестник Отделения наук о Земле Российской академии наук. 2012. Т. 4. № NZ2001. DOI: 10.2205/2012NZ000111

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

15. *Земцов А.А., Меньшиков Н.Г.* Комплекс технических средств для отбора проб на углеродный анализ из ледовых толщ // Записки Горного института. 1988. Т. 116. С. 78-81.

16. *Кудряшов Б.Б., Меньшиков Н.Г.* Расчет скорости колонкового бурения плавлением с помощью жидкого теплоносителя // Записки Горного института. 1993. Т. 136. С. 6-13.

17. *Чистяков В.К., Пашкевич В.М.* Экспериментальный стенд для исследования устойчивости ствола скважины при бурении в ледниковом покрове // Записки Горного института. 1976. Т. 71. С. 42-45.

18. *Литвиненко В.С.* Уникальные техника и технологии бурения скважин во льдах Антарктиды // Записки Горного института. 2014. Т. 210. С. 5-10.

19. *Кадочников В.Г., Двойников М.В., Блинов П.А.* Влияние пространственной формы бурильной колонны на вынос шлама в наклонно направленных скважинах // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2020. № 2. С. 12-19.

20. *Zelenchuk A.V., Krylenkov V.* Thermohydraulic Drilling Probe for Studying Ice Sheets and the Subglacial Environment of the Earth and Others Heavenly Bodies // Emerging Challenges in Environment and Earth Science. 2022. Vol. 3. P. 41-50. DOI: 10.9734/bpi/ecees/v3/15837D

21. *Полякова Е.В.* Структурные особенности льда озера Восток (Центральная Антарктида) // Записки Горного института. 2009. Т. 182. С. 45-47.

22. *Bulat S.A., Alekhina I.A., Lipenkov V.Y. et al.* Cell Concentrations of Microorganisms in Glacial and Lake Ice of the Vostok Ice Core, East Antarctica // Microbiology. 2009. Vol. 78. Iss. 6. P. 808-810. DOI: 10.1134/S0026261709060216

23. *Fricker H.A., Powell R., Priscu J. et al.* Siple Coast subglacial aquatic environments: the Whillans Ice Stream Subglacial Access Research Drilling (WISSARD) Project // Proceedings of the Chapman Conference on the Exploration and Study of Antarctic Subglacial Aquatic Environments. Washington: American Geophysical Union, 2011. P. 199-220. DOI: 10.1029/2010GM000932

24. *Kennicutt M.C., Siegert M.J.* Subglacial Aquatic Environments: A Focus of 21st Century Antarctic Science. Washington: American Geophysical Union, 2011. P. 1-8. DOI: 10.1002/9781118670354.CH1

25. *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. Iss. 65. P. 83-89. DOI: 10.3189/2014AoG65A002

26. *McKay R.M., Barrett P.J., Levy R.S. et al.* Antarctic Cenozoic climate history from sedimentary records: ANDRILL and beyond // Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. DOI: 10.1098/rsta.2014.0301

27. *Makinson K., Anker P., Garcés J. et al.* Development of a clean hot water drill to access Subglacial Lake CECs, West Antarctica // Annals of Glaciology. 2021. Vol. 62 (85-86). P. 250-262. DOI: 10.1017/aog.2020.88

28. *Priscu J.C., Powell R.D., Tulaczyk S.* Probing subglacial environments under the Whillans Ice Stream // Eos. 2010. Vol. 91. № 29. P. 253-254. DOI: 10.1029/2010EO290002

29. *Siegert M.J., Ross N., Le Brocq A.M.* Recent advances in understanding Antarctic subglacial lakes and hydrology // Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. DOI: 10.1098/rsta.2014.0306

30. *Купавых К.С., Купавых А.С., Моренов В.А.* Анализ эффективности применения двух рабочих жидкостей с различными вязкоупругими характеристиками при гидродинамическом воздействии на призабойную зону пласта // Наука и техника. 2019. Т. 18. № 2. С. 164-170. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-164-170

31. *Weiss P., Yung K.L., Ng T.C. et al.* Study of a thermal drill head for the exploration of subsurface planetary ice layers // Planetary and Space Science. 2008. Vol. 56. Iss. 9. P. 1280-1292. DOI: 10.1016/j.pss.2008.04.004

32. *Сербин Д.В., Васильев Н.И., Дмитриев А.Н., Большунов А.В.* Тепловой снаряд для бурения плавлением с одновременным расширением ледовых скважин // Материалы XIV Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле». М.: Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, 2019. Т. 4. С. 297-300.

33. *Hoseon Yoo.* Analytical solutions to the unsteady close-contact melting on a flat plate // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2000. Vol. 43. Iss. 8. P. 1457-1467. DOI: 10.1016/S0017-9310(99)00221-5

34. *Зеленчук А.В., Крыленков В.А.* Зонды для исследования ледяных и подледных сред планет // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 123-134. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-123-134

35. *Wirtz M., Hildebrandt M.* IceShuttle Teredo: An Ice-Penetrating Robotic System to Transport an Exploration AUV into the Ocean of Jupiter's Moon Europa // 67th International Astronautical Congress (IAC), 26-30 September 2016, Guadalajara, Mexico. № 34241.

***Авторы*: Д.В.Сербин,** *ведущий инженер, serbin_dv@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0002-9855-7178* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **А.Н.Дмитриев,** *канд. техн. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0003-4615-3179* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0