

УДК 622.23.05

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ**

Н. Г. Тимофеев, Р. М. Скрябин, Б. В. Яковлев

*Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,
E-mail: ng.timofeev@s-vfu.ru, ул. Кулаковского, 50, 677000, г. Якутск, Россия*

Рассмотрена проблема разработки породоразрушающего инструмента (долота) для бурения скважин большого диаметра (от 500 мм и выше) вращательным способом в условиях многолетнемерзлых пород при разведке россыпных месторождений полезных ископаемых. Показано, что при контакте резцов породоразрушающего инструмента с забоем скважины происходит растепление мерзлых пород с последующим их налипанием к поверхности бурового инструмента и стенкам скважины и смерзанием, что снижает эффективность транспортирования породы и затрудняет получение достоверных проб. Установлена зависимость выделяемой теплоты на забое скважины от радиуса расположения резцов породоразрушающего инструмента. Разработана конструкция долота, обеспечивающего эффективное разрушение забоя скважины с минимизацией выделения тепла, и опытного образца бурового снаряда для вращательного бурения скважин большого диаметра. Приведены результаты натурных испытаний.

Бурение, скважина, мерзлые породы, буровой снаряд, шнек, температура, породоразрушающий инструмент, теплообмен, оттайка породы

DOI: 10.15372/FTPRPI20170610

Основная проблема разведки россыпных месторождений в многолетнемерзлых породах — осуществление горнопроходческих работ в зимнее время с проведением большого объема шурфов. Существующая практика шурфовочных работ основана на устаревших технологиях с большой долей ручного труда — буровзрывной способ, проходка с использованием отбойных молотков и др. [1, 2]. В этой связи наиболее эффективным способом ведения шурфопроходческих работ становится бурение скважин большого (500 мм и выше) диаметра.

Особенностью бурения скважин в условиях криолитозоны является высокая чувствительность породного массива к изменению теплового режима. Даже малые колебания температуры в скважине значительно меняют прочностные свойства мерзлых пород. Это обусловлено возникновением в порах мерзлых пород переходных процессов, связанных с трехфазным состоянием воды (твердым, жидким и газообразным) и приводящих к оттайке мерзлых пород в процессе бурения скважин. Оттайка — основная причина возникновения различных осложнений и аварий [2–10]. Весьма характерное изменение температурного режима в скважине

проявляется при бурении многолетнемерзлых пород вращательным способом. В процессе бурения, при вращательно-поступательном движении породоразрушающего инструмента, в местах контакта резцов с породой наблюдается нагревание, которое способствует изменению физико-механических свойств мерзлых пород [3–5, 7, 10–15].

Исследования, направленные на совершенствование технических средств и технологии бурения скважин в многолетнемерзлых породах в районах Северо-Востока и арктической зоны страны с экстремальными природно-климатическими условиями и мощной толщей многолетнемерзлых горных пород, — актуальная научно-техническая задача для разработчиков буровой техники, поскольку она связана с повышением эффективности работы геологоразведочных организаций.

Ведущими производителями буровой техники предлагается широкий спектр различных конструкций породоразрушающих инструментов. Из практики ведения буровых работ известно, что процесс разрушения мерзлых горных пород существенно зависит от их физико-механических свойств. Несоответствие конструкции бурового инструмента условиям разрушения и физико-механическим свойствам горных пород приводит к быстрому изнашиванию резцов и осложнениям в процессе проходки скважин [1, 8, 9, 16–18].

Основные компоненты многолетнемерзлых пород, определяющие их физико-механические свойства, — лед, вода незамерзшая и (или) прочносвязанная, твердые минеральные частицы, а также пары и газы [1]. Главная причина всех осложнений — это нарушение естественного температурного режима в скважине, при котором интенсивность теплообменных процессов между мерзлыми породами и резцами бурового инструмента вызывает нарушения агрегатного состояния породы.

Оптимизация тепловыделения и сохранения естественного температурного режима в процессе бурения скважины большого диаметра вращательным способом в условиях криолитозоны связана с совершенствованием конструкции бурового породоразрушающего инструмента (долота) — геометрией режущих элементов (размеры, форма резцов и корпуса), схемой расположения резцов на долоте, а также транспортирующих лопастей и созданием рациональной технологии бурения.

На основании проведенного анализа и практики бурения скважин в мерзлых породах, а также учитывая основные требования методики разведки россыпных месторождений полезных ископаемых, в которой указано, что минимальный диаметр скважин должен находиться в пределах 540–600 мм [19], предлагаются следующие требования по совершенствованию конструкции породоразрушающего инструмента и технологии бурения скважин большого диаметра в условиях криолитозоны:

1. Центральная опережающая режущая часть долота (забурник) в процессе бурения обеспечивает центрирование долота в скважине. Как показывает практика бурения скважин по мерзлым песчано-галечниковым отложениям, чем больше диаметр долота, тем малоэффективнее функция забурника. Это связано с тем, что окружная скорость резцов, расположенных по концентрическим кругам, снижается от периферии к центру забоя скважины, достигая нулевых значений ($v = 0$) на оси забурника, который разрушает породу только за счет раздавливания под осевой нагрузкой (C_0) без резания. Таким образом, при разработке конструкции долота предлагается исключить центральную опережающую часть (забурник), который превращается в, своего рода, опорный элемент вращающегося долота, вследствие чего в процессе бурения повышаются силы трения, увеличивается тепловыделение в скважине и снижается механическая скорость бурения ($V_{\text{мех}}$).

2. Рациональная форма, размеры и геометрия режущих элементов породоразрушающего инструмента должны обеспечивать минимальные энергозатраты при разрушении мерзлых горных пород. Этим требованиям наиболее отвечает цилиндрическая остроконечная форма резца [6, 7, 17].

3. В разрабатываемом буровом долоте для эффективного разрушения мерзлой горной породы на забое предлагается “амплитудное” (разновысотное) расположение резцов. При этом резцы должны иметь минимальную (для уменьшения выделяемой теплоты) и достаточную (для обеспечения объемного разрушения мерзлых пород на забое скважины) площадь контакта с горным массивом.

При исследовании процесса распределения температуры на режущей поверхности породоразрушающего инструмента рассмотрим принцип разрушения породы вращательным движением долота. Для моделирования теплообразования и определения совершаемой работы долота на забое предположим, что резцы долота распределены равномерно в один ряд по его диаметру.

При резании горной породы долотом, вращающимся с некоторой угловой скоростью, к резцам подводится механическая энергия, которая способствует изменению теплового режима в скважине: часть энергии Q идет на нагревание поверхности резцов, а часть A_a — на резание породы, совершая полезную работу. Если бы работа сил трения полностью преобразовывалась только в тепло, то зависимость распределения температуры на поверхности резцов была бы линейной. То есть температура рабочей поверхности, начиная с некоторого значения в центральной области долота, монотонно увеличивалась бы в направлении периферийной области (T_1). Учет трения режущей поверхности долота при разрушении забоя скважины приводит к немонотонной зависимости распределения температуры вдоль радиуса рабочей поверхности. В этом случае распределение температуры на забое скважины имеет максимум в области между центром и периферией долота T (рис. 1). Это связано с тем, что на периферийной части долота работа на резание породы увеличивается пропорционально площади.

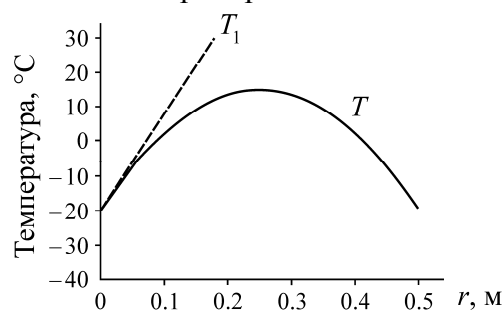


Рис. 1. Зависимость выделяемой теплоты при нагреве резца от радиуса расположения резцов $T=f(r)$ (пояснения в тексте)

При резании работа прямо пропорциональна объему раздробленной породы. Коэффициент дробления определяется как отношение объема разрушенной породы к затраченной работе: $a = \Delta V / \Delta A$ [2, 3, 9, 12, 15, 17].

Таким образом, для элементарной работы разрушения горной породы имеем выражение

$$dA = F_r dl = dQ + A_a = dQ + \frac{1}{a} dV, \quad (1)$$

где $F_r = \mu N$ — сила трения (Н), μ — коэффициент трения, N — сила нормального давления, которое прижимает резец к забою скважины; dl — перемещение резца за время dt ; dQ — теплота, выделяемая при трении; dV — объем разрушенной породы; a — коэффициент дробления.

Для решения поставленной задачи примем следующее допущение: так как основной рабочей поверхностью является поверхность резца долота, будем учитывать только ту теплоту, которая выделяется в объеме резца, и пренебрегаем количеством теплоты, уходящим вместе с разрушенной породой. Уравнение (1) делим на dt и получаем

$$mC \frac{dT}{dt} = \mu N \frac{dl}{dt} - \frac{h_b r^2}{a} \frac{d\varphi}{dt}, \quad (2)$$

где h_b — эффективная глубина резания; r — расстояние от центра рабочей поверхности бура до резца; m — масса резца; C — его удельная теплоемкость. Линейная скорость резца $v = dl/dt$, которая равна $v = \omega r$ ($\omega = d\varphi/dt$ — угловая скорость бура).

Подставляя значения линейной и угловой скорости в (2), имеем

$$mC \frac{dT}{dr} \omega r = \mu N \omega r - \frac{h_b}{a} r^2 \omega, \quad (3)$$

т. е. обыкновенное линейное дифференциальное уравнение первого порядка относительно $T(r)$. Здесь учитывается, что $l = 2\pi r$ и $dl \approx dr$.

Интегрируя уравнение (3):

$$\int dT = \int \frac{\mu N}{mC} dr - \int \frac{h_b}{mCa} r dr,$$

получаем распределение температуры на рабочей поверхности:

$$T(r) = \frac{\mu N}{mC} r - \frac{h_b}{2mCa} r^2 + \text{const}. \quad (4)$$

На рис. 1 представлено распределение температуры согласно (4) вдоль радиуса рабочей поверхности в зависимости от радиуса расположения резцов $T = f(r)$ (сплошная линия) при заданных при следующих значениях параметров: коэффициент трения $\mu = 0.2$, сила нормального давления 2500 Н, удельная теплоемкость резца 900 Дж/кг, эффективная глубина резания 0.01 м, коэффициент резания 0.00005, температура в центре бура 20°C. Штриховой линией изображено линейное распределение, при котором не учитывается работа, затрачиваемая на разрушение породы. Видно, что максимальная температура находится в области между центром и периферией породоразрушающего инструмента.

В этой области образовавшаяся при резании положительная температура интенсифицирует растепление мерзлых пород, что при их налипании к поверхности бурового снаряда и стенкам скважины и последующем смерзании приводит к снижению эффективности работы долота и шнекового транспортера. Уменьшения выделяемой теплоты можно достичь путем применения специального двухлопастного долота, в котором резцы на лопастях расположены по одному ряду с разными высотами. При этом резцы одного ряда, размещенные по концентрическим кругам, при вращении проходят между резцами второго ряда, что обеспечивает объемное разрушение мерзлой породы на забое с минимизацией выделяемой температуры (рис. 2). Устранение центрального опережающего резца позволяет повысить механическую скорость $V_{\text{мех}}$ за счет исключения сил трения центральной опорной точки с нулевой окружной скоростью ($v = 0$) о горную породу.

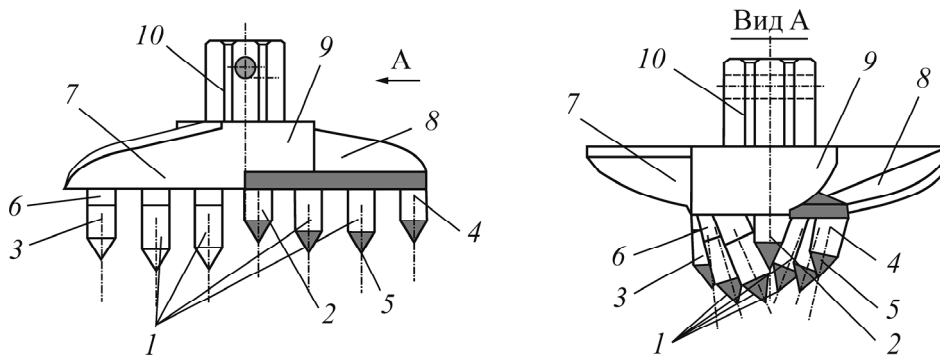


Рис. 2. Усовершенствованная конструктивная схема породоразрушающего инструмента (долота): 1, 3, 4 — рабочие резцы; 2 — центральный резец; 5 — твердосплавные режущие пластины; 6 — дополнительная вставка; 7 — первый ряд; 8 — второй ряд; 9 — корпус долота; 10 — хвостовик

В обстановке рассредоточенности производственных объектов на значительной территории Северо-Востока страны, сезонности ведения горных работ, низкого уровня механизации и трудоемких процессов необходим поиск новых буровых методов и совершенствование технических средств разведки россыпных месторождений в условиях мерзлых пород. Техника и технология бурения скважин должны соответствовать главному требованию методики опробования россыпных месторождений. Способы отбора и извлечения пробы из определенного интервала скважины должны исключить возможность ее обогащения или разубоживания породой других интервалов и обеспечить поинтервальное опробование продуктивного пласта с интервалом от 0.2 до 1.0 м. Этого сложно достигнуть при транспортировании разрушенной породы шнеками в открытом стволе скважины, когда на транспортируемую из забоя породу действует сила трения о стенки скважины $F_c = f_c F_{цс}$, где f_c — коэффициент трения породы о стенки скважины (порода по породе), вызванная центростремительной силой $F_{цс}$. При этом происходит смешивание породы, находящейся в межшнековом пространстве, с породой, попадающей в него со стенок скважины (разубоживание). Для решения проблемы разработана конструкция шнеко-аккумулялирующего бурового снаряда (рис. 3), в котором укороченный шнек (2–3 витка) располагается внутри трубы, обеспечивая рейсовый (поинтервальный) метод бурения и исключая возможность разубоживания разрушенной породы. В этом случае достигается наилучшая представительность пробы [2, 5].

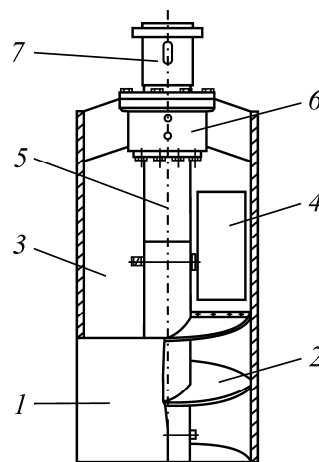


Рис. 3. Конструкция шнеко-аккумулялирующего бурового снаряда: 1 — труба; 2 — укороченный шнековый транспортер; 3 — пробоприемная камера; 4 — разгрузочное окно; 5 — буровая штанга; 6 — подшипниковый узел; 7 — переходник

При разработке бурового снаряда расстояние между ребордами шнека l_n является одним из главных параметров. Поскольку от шага шнека зависит производительность шнекового транспортера, при выборе его шага необходимо учитывать среднюю размерность встречаемых валунов. Теоретически, чем больше шаг шнека, тем беспрепятственнее будут транспортироваться валуны крупных размеров [1, 7]. Но, как показывает анализ рекомендаций в [11, 16], чем больше шаг шнека, тем меньше производительность транспортирования разрушенной породы. Исходя из этого оптимальным шагом будем считать то расстояние между ребордами, в котором учтены средние размеры валунов конкретного месторождения полезных ископаемых.

Учитывая физико-механические свойства многолетнемерзлых пород и требования к разведке россыпных месторождений [19], по разработанной методике конструирования шнеко-аккумулирующего бурового снаряда [2] изготовлена модель опытного образца бурового снаряда для проведения натуральных испытаний. По результатам экспериментальных исследований установлено, что объем V_k пробоприемной камеры 3 (рис. 3) зависит от конструктивных особенностей бурового снаряда (диаметра долота, трубы, количества витков шнека и др.), максимального интервала проходки скважины $l_{пр}$ по методике разведки полезных ископаемых, коэффициента разрыхления горной породы K_p , а также от коэффициента наполнения пробоприемной камеры K_n .

Объем извлекаемой пробы определяется по выражению

$$V_{пр} = \pi r_{скв}^2 l_{пр} K_p, \quad (5)$$

где $r_{скв}$ — радиус скважины, м; $K_p = 1.1 - 1.6$ — коэффициент разрыхления горной породы.

Объем пробоприемной камеры разработанного шнеко-аккумулирующего бурового снаряда (рис. 3) находится по формуле

$$V_k = (V_1 + V_2) K_n, \quad (6)$$

V_1, V_2 — объем пробоприемника и шнекового транспортера, м³.

Объем пробоприемника:

$$V_1 = \pi r_{вт}^2 h - \pi r_{шт}^2 h = \pi h (r_{вт}^2 - r_{шт}^2), \quad (7)$$

здесь $r_{вт}$ — внутренний радиус трубы, м; $r_{шт}$ — радиус буровой штанги, м; h — высота трубы и штанги, м.

Объем шнекового транспортера бурового снаряда:

$$V_2 = [\pi (r_{шт}^2 - r_{шт}^2) n_p l_p] - [\pi (r_{шт}^2 - r_{шт}^2) n h_p] = \pi (r_{шт}^2 - r_{шт}^2) n_p (l_p - h_p), \quad (8)$$

где $r_{шт}$ — радиус шнека, м; $r_{шт}$ — радиус буровой штанги, м; n_p — количество реборд; l_p — шаг между ребордами, м; h_p — толщина реборды, м;

Подставляя выражения (5) и (7) в (8), получаем следующее выражение для объема пробоприемной камеры бурового снаряда:

$$V_k = \pi h (r_{вт}^2 - r_{шт}^2) + [\pi (r_{шт}^2 - r_{шт}^2) n_p (l_p - h_p)] K_n. \quad (9)$$

По формуле (9) рекомендуется определить необходимый объем пробоприемной камеры бурового снаряда в зависимости от диаметра и максимального интервала проходки скважины.

С целью проверки работоспособности конструкции бурового снаряда (рис. 3) проведены натурные испытания опытного образца, одной из задач которых являлся выбор оптимального типа долота применительно к бурению скважин в условиях криолитозоны. Исследованы стан-

дартные серийно выпускаемые трехлопастное и разработанное двухлопастное долота со схожими технологическими параметрами: $\varnothing 170$ мм, режущие элементы наплавлены износостойкими материалами типа ВК6 на опытном образце и стандартном шнеке.

Испытания различных долот свидетельствуют о существенном влиянии на процесс бурения мерзлых пород температурного фактора, а именно процесса оттайки и замерзания разрушенной породы в буровом инструменте. С увеличением частоты вращения бурового инструмента механическая скорость возрастает, но при этом усиливается процесс оттайки мерзлой породы (случай трехлопастного долота). Это обусловлено тем, что при трехлопастном варианте увеличивается площадь контакта режущих элементов долота с забоем, что приводит к чрезмерному нагреву забоя скважины и оттайке разрушенной пробы. Растаявшие мерзлые породы во время транспортирования замерзают, прилипают к шнеку и стенке колонковой трубы.

Такой специфичный технологический фактор резко снижает производительность шнекового транспортера $Q_{\text{шн}}$ вплоть до его остановки (образуется “сальник”). При этом производительность долота $Q_{\text{дол}}$ на некоторое время сохраняется, но из-за прекращения транспортирования шнеком останавливается проходка скважины. В этом случае, если вовремя не остановить вращение и подачу осевой нагрузки на бур, усиливается нагрев и повышается износ режущих частей долота. Для извлечения прилипших и смерзшихся пород из бурового снаряда требуется снятие вспомогательного люка 4 (рис. 3) и сгребание вручную пробы, что приводит к дополнительным затратам времени на спуско-подъемные операции.

При бурении двухлопастным долотом такие осложнения не наблюдались, процесс бурения скважин был относительно интенсивным, долото сохраняло нормальный температурный режим и износ его резцов был незначительным. На технологию бурения особое влияние оказывают углы режущих элементов (резцов): задние α , передние β , заострения δ и резания γ [7, 13]:

— угол заострения δ устанавливается исходя из технико-технологических требований сооружения скважин, в практике он принят равным $70-90^\circ$;

— от переднего угла β зависит износостойкость и прочность режущих элементов резцов. Передние углы бывают нулевые $\beta = 0$, положительные $\beta > 0$ и отрицательные $\beta < 0$. При бурении пород средней крепости (IV–VII) рекомендуется применять $\beta = -15^\circ$, а по мягким породам — $\beta = 0$ и даже $\beta = +15^\circ$;

— задний угол α служит для уменьшения трения между задней поверхностью резца и забоем скважины, при конструировании резцов принимается равным $20-30^\circ$. При этом необходимо соблюдать следующее условие: не рекомендуется слишком увеличивать задний угол резцов при бурении крепких пород, поскольку это приводит к ослаблению прочности режущих кромок и их поломкам;

— угол резания γ является основным углом режущего элемента, в зависимости от категорий разрушаемых пород он устанавливается в пределах $60-115^\circ$. При бурении прочных мерзлых пород с твердыми включениями рекомендуется угол резания от 70 до 115° . Увеличение угла резания сверх заданных значений приводит к возрастанию сопротивления мерзлых пород.

По результатам экспериментальных испытаний опытного образца бурового снаряда и стандартного шнека с $\varnothing 170$ мм построены графики, характеризующие изменение механической скорости бурения $V_{\text{мех}}$ от технологических параметров: осевой нагрузки $V_{\text{мех}} = f(C_{\text{ос}})$ (рис. 4а) и частоты вращения $V_{\text{мех}} = f(n)$ (рис. 4б). Сравнительные испытания опытного образца шнеко-колонкового снаряда и стандартного шнека с 2-х и 3-х лопастными долотами проводились в мерзлых песчано-глинистых, галечниковых породах III–VI категорий по буримости.

Установлено, что:

- при постоянной частоте вращения n снаряда с увеличением осевой нагрузки до $C_{oc} = 8$ кН механическая скорость обоих буровых снарядов возрастает линейно (рис. 4а). При нагрузке до 16 кН скорость бурения опытным образцом увеличивается на 15 % по сравнению со стандартным: для опытного образца $V_{\text{мех max}} = 0.173$ м/мин, для стандартного бурового снаряда $V_{\text{мех max}} = 0.15$ м/мин. Это объясняется повышением эффективности передачи осевой нагрузки на забой скважины вследствие расположения укороченного шнека внутри трубы;

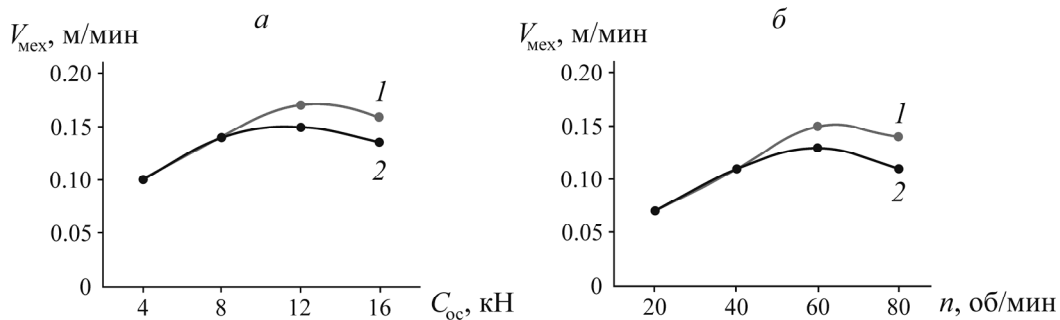


Рис. 4. Динамика механической скорости при бурении в зависимости: *а* — от осевой нагрузки $V_{\text{мех}} = f(C_{oc})$; *б* — от частоты вращения $V_{\text{мех}} = f(n)$; 1 — опытный образец бурового снаряда; 2 — стандартный шнек

- при постоянной осевой нагрузке C_{oc} с увеличением частоты вращения n механическая скорость бурения линейно возрастает (рис. 4б) и достигает максимального значения у опытного образца 0.15 м/мин при частоте вращения 60–70 об/мин, у стандартного шнека — 0.13 м/мин при частоте вращения 50–60 об/мин. Дальнейшее повышение частоты вращения n у обоих снарядов приводит к плавному снижению механической скорости, что обусловлено меньшим сопротивлением транспортированию разрушенной породы и лучшей передачей нагрузки на долото укороченным шнеком (3–4 витка) в трубе, чем шнеком в открытом стволе скважины.

ВЫВОДЫ

Обоснованы технические и технологические решения по определению конструктивных и режимных параметров шнеко-аккумулирующего бурового снаряда и долота для бурения скважин в условиях многолетнемерзлых пород (криолитозоны). Даны рекомендации по совершенствованию конструкции долота, обеспечивающие эффективное объемное разрушение мерзлых пород с наименьшим процессом теплообразования в скважине.

Установлена зависимость выделяемой теплоты на забое скважины от радиуса размещения резцов долота, положенная в основу разработки новой конструкции со ступенчатым расположением и разными высотами режущих элементов породоразрушающего инструмента, обеспечивающими эффективное объемное разрушение мерзлых пород с наименьшим теплообразованием. Устранен опережающий центральный резец (забурник) породоразрушающего инструмента, что позволяет повысить механическую скорость вращательного бурения долотом большого диаметра за счет ликвидации эффекта опоры.

Динамика механической скорости разработанного бурового снаряда свидетельствует о меньшем сопротивлении транспортируемой породы в трубе и лучшей передаче осевой нагрузки на долото по укороченному шнеку (3–4 витка), чем стандартным шнеком в открытом стволе скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Грабчак В. Л.** Обоснование оптимальных параметров процесса бурения геологоразведочных шурфов в моренных отложениях: дис. ... канд. техн. наук. — М., 2009. — 137 с.
2. **Скрябин Р. М., Тимофеев Н. Г.** Разработка бурового снаряда для бурения скважин большого диаметра (\varnothing 500 мм и более) на разведке россыпных месторождений Севера // Вестн. СВФУ. — 2012. — Т. 9. — № 1. — С. 85–90.
3. **Андреев О. Ф., Врачев В. В., Истомин В. А., Колушев Н. Р., Миклин С. Р. и др.** Методическое руководство по прогнозированию теплового и механического взаимодействия скважин с мерзлыми породами. — М.: ВНИИГАЗ, 1987. — 96 с.
4. **Атласов Р. А., Скрябин Р. М., Туги Э. Р., Иванов А. Г., Николаева М. В., Бердыев С. С.** Пути совершенствования строительства скважин в многолетнемерзлых породах // Наука и образование. — 2015. — № 3 (79). — С. 54–58.
5. **Карху А. В., Скрябин Р. М., Тимофеев Н. Г.** Совершенствование техники и технологии бурения скважин большого диаметра в условиях многолетнемерзлых пород // Горн. пром-сть. — 2013. — № 2 (108). — С. 142–146.
6. **Коврижных А. М.** Послойное разрушение горных пород резанием // ФТПРПИ. — 2006. — № 2. — С. 36–46.
7. **Линьков С. А.** Разработка конструкции и обоснование параметров рабочего органа для бурения скважин в мерзлых грунтах: дис. ... канд. техн. наук. — Омск: СибАДИ, 2007. — 185 с.
8. **Ягодкин Ф. И., Прокопьев А. Ю.** Опытнo-промышленная проверка технологии добычи кимберлитовой руды методом выбуривания скважинами большого диаметра // Науч. обозрение. — 2014. — № 9–3. — С. 884–887.
9. **Mitchell R. F., Miska S. Z.** Fundamentals of drilling engineering, Society of Petroleum Engineers, 2011. — 710 p. (SPE Textbook Series, Vol. 12).
10. **Kondepudi D., Prigogine I.** Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures, John Wiley & Sons, 2015, XXVI. — 524 p.
11. **Матвеев А. В., Нескоромных В. В.** Бурение инженерно-геологических скважин большого диаметра в условиях вечной мерзлоты с использованием воздуха и газожидкостных смесей // Инж. изыскания. — 2012. — № 12. — С. 30–32.
12. **Проселков Ю. М.** Теплопередача в скважинах. — М.: Недра, 1975. — 209 с.
13. **Devereux S.** Drilling technology in nontechnical language, PennWell Corporation, 2012, XI. — 370 p.
14. **Lecture notes in earth system sciences, Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences, Springer, 2014. — 847 p.**
15. **Седов В. Т.** Теплообмен при бурении мерзлых пород. — Л.: Недра, 1990. — 127 с.
16. **Бабец М. А.** Буровые работы. — Минск: БНТУ, 2015. — 64 с.
17. **Нескоромных В. В.** Бурение скважин. — Красноярск: СФУ, 2014. — 400 с.
18. **Papke Keith G., Davis David A.** Mining claim procedures for Nevada prospectors and miners, Special Publication 6, Nevada Bureau of Mines and Geology, 2002.
19. **Сулакшин С. С.** Способы, средства и технология получения представительных образцов пород и полезных ископаемых при бурении геологоразведочных скважин. — Томск: Изд-во НТЛ, 2006. — 230 с.

Поступила в редакцию 27/VI 2017