

дований фазового состава засоленных грунтов в каждом конкретном случае. Использование простых грубых приближений при описании фазового состояния поровых растворов может приводить к ощутимым непрогнозируемым ошибкам.

Под результирующим воздействием твердого скелета горных пород и растворенных веществ происходит сдвиг эвтектических температур, который зависит от дисперсности твердого скелета и концентрации порового раствора. Поэтому только в результате построения диаграмм состояния, которые учитывают данную зависимость, можно подробно описать фазовый состав порового раствора в высокодисперсных грунтах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-05-00328).

Литература

1. Еришов Э.Д., Акимов Ю.П., Чеверев В.Г. и др. Фазовый состав влаги в мерзлых породах. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 190 с.
2. Старостин Е.Г., Лебедев М.П. Свойства свя-

занной воды в дисперсных породах. Часть I. Вязкость, диэлектрическая проницаемость, плотность, поверхностное натяжение // Криосфера Земли. – 2014. – № 3. – С. 46–54.

3. Старостин Е.Г., Лебедев М.П. Свойства связанной воды в дисперсных породах. Часть II. Теплота кристаллизации // Криосфера Земли. – 2014. – № 4. – С. 39–46.

4. A DSC study of thermal transitions of apple systems at several water contents // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2000. – Vol. 61. – P. 351–362.

5. Lee K.Y., Ha W.S. DSC studies on bound water in silk fibroin/S-carboxymethyl keratine blend films // Polymer. – 1999. – Vol. 40. – P. 4131–4134.

6. Liesebach J., Lim M., Rades T. Determination of unfrozen matrix concentrations at low temperatures using stepwise DSC // Thermochimica Acta. – 2004. – Vol. 411. – P. 43–51.

7. Степанов А.В. Влияние растворенных солей на теплофизические свойства глинистого грунта // Разработка методов тепловой защиты для инженерных сооружений на Крайнем Севере. – Якутск: изд. ЯГУ, 1983. – С. 68–78.

8. Аносов В.Я., Озерова М.И., Филалов Ю.Я. Основы физико-химического анализа. – М.: Наука, 1976. – 504 с.

Поступила в редакцию 15.08.2015

УДК 622.24.051.624

Оптимизация процесса оттайки мерзлого грунта при бурении скважин

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

Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск

Рассматриваются предложения по совершенствованию конструкции породоразрушающего инструмента (долота) при бурении скважин в условиях многолетнемерзлых пород в районах Северо-Востока и арктической зоны страны с экстремальными природно-климатическими условиями и с мощной толщей многолетнемерзлых горных пород, где к выбору оптимальных способов и технологий разведки месторождений предъявляются особые требования. Месторождения зоны многолетней мерзлоты имеют существенные отличия от аналогов, расположенных в районах с умеренным климатом и положительной температурой пород. Специфика их обусловлена комплексным взаимодействием и влиянием горно-геологических, горнотехнических, мерзлотных и климатических факторов. В основе осложненных условий бурения скважин в многолетнемерзлых породах лежит температурный фактор, определяющий эффективность процесса разрушения и транспортировки мерзлых горных пород. В процессе разрушения мерзлой горной породы при контакте резцов с горным массивом в области рабочей поверхности резцов интенсифицируется тепловыделение. С целью минимизации выделяемого тепла путем аналитических исследований выявлены закономерность теплообразования на поверхности резцов и зависимость выделяемой теплоты на забое скважины от радиуса расположения резцов $T=f(r)$ породоразрушающего инструмента (долота) при резании мерзлой породы. На основании полученных данных предлагается усовершенствованный вариант породоразрушающего инструмента (долота), который обеспечивает эффективное разрушение забоя скважины и минимизирует выделения тепла.

ТИМОФЕЕВ Николай Гаврильевич – ст. преподаватель, yakutsk_09@mail.ru; СКРЯБИН Рево Миронович – к.т.н., проф., зав. каф., yakutsk_09@mail.ru; ЯКОВЛЕВ Борис Васильевич – д.ф.-м.н., проф., b-yakovlev@mail.ru

Ключевые слова: бурение скважин, мерзлые породы, температура в скважине, породоразрушающий инструмент, долото, забурник, оптимальный угол резания, конструктивные углы резцов, разведка месторождений, теплообмен в скважине, оттайка породы.

Optimization of the Process for Thawing Frozen Ground During Drilling

N.G. Timofeev, R.M. Skryabin, B.V. Yakovlev

North-Eastern Federal University, Yakutsk

Proposals for improving the design of rock cutting tool (bit) during drilling in permafrost conditions in areas of the North-East and Arctic regions are considered. The extreme climatic conditions of the regions and thick layers of permafrost rocks bring about special requirements for methods and technology of exploration. Deposits of the permafrost zone have significant differences from deposits located in areas with a temperate climate and positive temperature rocks due to a complex interaction and the influence of geological, mining, permafrost and climatic factors. The basis of the complicated conditions of drilling in permafrost temperature is the temperature factor that determines the efficiency of the process of destruction and transportation of frozen rocks. In the process of destruction of frozen rocks, upon contact of the cutters with rocks in the area of the working surface of incisors the heat dissipation is enhanced. Analytical studies of the regularities of heat formation on the surface of the incisors are carried out and the dependence of heat generated on the wellbore from the radius of the rock cutting tool (bit) cutters location $T=f(r)$ when cutting frozen rocks is revealed. On the basis of the obtained data, we propose an improved version of rock cutting tool (bit), which provides effective destruction of the borehole bottom and minimizes the heating.

Key words: drilling, permafrost, temperature in a borehole, rock cutting tool, chisel, jumper, optimum cutting angle, constructive corners of cutters, exploration, heat transfer in a borehole, rock defrosting.

При бурении скважин шнековым способом наивысшие скорости возможны только при достижении соответствия между интенсивностью разрушения (резания) горных пород на забое и транспортирования выбуренной породы на поверхность. Эффективность разрушения мерзлых пород на забое скважины и очистка забоя скважины от бурового шлама прямо зависят от типа и конструкции породоразрушающего инструмента [1–6].

На выбор параметров породоразрушающего инструмента решающее влияние оказывают физико-механические свойства многолетнемерзлых пород.

Под параметрами породоразрушающего инструмента понимаются такие конструктивные элементы, как геометрия режущих элементов (размеры, форма резцов и корпуса), схема расположения резцов на буре, а также транспортирующие лопасти бура [3, 7, 8].

Исследования по совершенствованию конструкции породоразрушающего инструмента

Бугаев В.Г. в работе [3] отмечает, что особое влияние на скорость и энергоёмкость процесса бурения, а также на стойкость и прочность породоразрушающих инструментов оказывают углы режущих элементов, характеризующиеся углами задними α , передними β , заострения δ и

резания γ , связанных между собой следующим образом:

$$\begin{cases} \alpha + \delta + \beta = 90^\circ \\ \gamma = \alpha + \delta \end{cases}$$

– угол заострения δ устанавливается исходя из технико-технологических требований сооружения скважин. В практике принято его считать равным $70\text{--}90^\circ$;

– на износостойкость и прочность режущих элементов резцов особое влияние оказывает передний угол β . Передние углы бывают нулевые $\beta = 0$, положительные $\beta > 0$ и отрицательные $\beta < 0$. При бурении пород средней крепости (IV–VII) рекомендуется применять передний угол, равным $\beta = -15^\circ$, а по мягким породам – $\beta = 0$ и даже положительных до 15° ;

– задний угол α , угол между главной задней поверхностью резца и плоскостью резания. Служит для уменьшения трения между задней поверхностью резца и забоем скважины. При конструировании резцов породоразрушающего инструмента обычно принимается равным $20\div 30^\circ$, 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 полкам;

– основным углом режущего элемента является угол резания γ , который в зависимости от

категорий разрушаемых пород устанавливается в пределах от 60 до 115°. При бурении талых грунтов и мягких пород более оптимальными считаются углы резания, равные 50–70°. При бурении прочных мерзлых пород с твердыми включениями рекомендуется угол резания от 70 до 115°. Увеличение угла резания от заданных значений приводит к возрастанию сопротивления мерзлых пород резанию.

Также важную роль при конструировании режущего элемента породоразрушающего инструмента оказывает форма передней грани [3, 6, 8]. В настоящее время известны следующие виды передних граней резцов: плоские, овальные, в виде клина, трапеции, призмы и др. В работах ряда авторов проведены исследования и даны четкие рекомендации по влиянию форм передних граней резцов на процесс разрушения горных пород в различных горно-геологических условиях.

На основании анализа литературных данных и практики бурения скважин, обзора проведенных научно-исследовательских работ, лучших отечественных и зарубежных конструкций буров с учетом физико-механических свойств многолетнемерзлых пород рекомендуются следующие технико-технологические основы конструирования породоразрушающего инструмента для бурения скважин большого диаметра в условиях криолитозоны:

1. Центральный опережающий резец (забурник) в процессе бурения обеспечивает центрирование породоразрушающего инструмента в скважине. Но как показывает практика бурения скважин по мерзлым песчано-галечниковым отложениям, чем больше диаметр породоразрушающего инструмента, тем малоэффективна функция забурника. Это связано с тем, что при резании резцами, расположенными по концентрическим кругам с разной окружной скоростью v , понижающейся от периферии к центру забоя скважины, достигая по оси центрального опережающего резца (забурника) $v=0$, разрушение породы забурником происходит только за счет раздавливания под осевой нагрузкой C_0 без резания. Таким образом, центральная опережающая часть (забурник) превращается в своего рода опорный элемент вращающегося породоразрушающего инструмента и замедляет механическую скорость бурения $V_{мех}$. Исходя из этого необходимо видоизменить конструкцию породоразрушающего инструмента, устранив опережающий центральный резец (забурник).

2. Резцы в породоразрушающем инструменте должны быть сменными и удобными для быстрой замены при износе или поломках.

3. 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 [8].

4. Основные показатели бурения во многом зависят от правильного выбора оптимального угла резания γ резцов.

Вопросами влияния оптимального угла резания γ при бурении скважин в мерзлых породах занимались многие исследователи [1, 3, 4, 6, 8]. В настоящее время не даны четкие рекомендации по выбору оптимального угла резания и с учетом заключений авторов оптимальным считается угол от 30 до 40°. Однако, учитывая существенное повышение прочностных свойств мерзлых песчано-глинистых пород, считаем возможным увеличение угла резания γ до 50–60°.

5. Для бурения скважин в сложных горно-геологических условиях должен применяться породоразрушающий инструмент со специальными резцами. Расположение резцов по высоте должно обеспечивать эффективное разрушение горной породы на забое. При этом резцы должны иметь минимальную и достаточную площадь контакта с горным массивом: минимальную – для уменьшения выделяемой теплоты и достаточную – для обеспечения объемного разрушения мерзлых пород на забое скважины [8].

Главным осложняющим фактором сооружения скважин в условиях многолетнемерзлых пород является процесс теплообразования на забое в процессе резания мерзлой горной породы.

Тепловое явление, возникающее при разрушении мерзлой горной породы, объясняется тем, что в процессе бурения при контакте резцов с горным массивом в области рабочей поверхности повышается интенсивность нагрева режущих элементов и из-за перехода механической энергии разрушения горных пород в тепловую энергию [9].

Для полноты процесса распределения температуры на режущей поверхности породоразрушающего инструмента рассмотрим резание породы вращательным движением бура. При этом резцы бура распределены равномерно в один ряд вдоль его диаметра.

При резании горной породы породоразрушающим инструментом с некоторой угловой скоростью на его режущей поверхности происходит нагревание. При этом часть работы трения идет на нагревание поверхности бура Q , а некоторая часть – на резание породы A_d . Если бы работа сил трения полностью преобразовывалась только в тепло, тогда была бы линейная

зависимость распределения температуры на поверхности бура. То есть температура рабочей поверхности, начиная с некоторого значения в центральной области бура, монотонно увеличивалась бы с расстоянием при перемещении к периферийной области. Учет той части работы силы трения, которая идет на резание породы, приводит к немонотонной зависимости распределения температуры вдоль радиуса рабочей поверхности, а именно, распределение температуры имеет максимум в области между центром и периферией бура. Это связано с тем, что на периферийной части бура работа на резание породы увеличивается пропорционально площади.

При резании работа прямо пропорциональна объему истираемой породы. Коэффициент истираемости определяется как отношение объема истираемой породы на затраченную работу $a = \Delta V / \Delta A$ [9].

Таким образом, для элементарной работы силы трения имеем выражение:

$$dA = F_t dl = dQ + A_a = dQ + dV/a, \quad (1)$$

где dl – перемещение резца за время dt , dQ – теплота, выделяемая при трении; dV/a – работа, затрачиваемая на дробление (истирание) породы пропорциональна объему истираемой породы; a – коэффициент пропорциональности.

Для решения задачи сделаем следующие приближения: так как основной рабочей поверхностью является поверхность резца, 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:

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

где μ – коэффициент трения; N – сила нормального давления приблизительно равна F_0 ; h_e – эффективная глубина резания; r – расстояние от центра рабочей поверхности бура до резца; m – масса резца; c – его удельная теплоемкость.

$v = dl/dt$ – линейная скорость резца, которая равна $v = \omega r$, где $d\varphi/dt$ – угловая скорость бура.

Поставляя значение линейной скорости и угловой скорости в (2), получаем:

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

то есть обыкновенное линейное дифференциальное уравнение первого порядка относительно $T(r)$.

Интегрируя уравнение (3)

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

получаем распределение температуры на рабочей поверхности

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

Константу интегрирования определяем из граничного условия. Например, в средней части бура температура имеет некоторую отрицательную величину и т.д.

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 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). Пунктирной линией изображено линейное распределение, при котором не учитывается работа, затрачиваемая на разрушение породы.

Как видно из рис. 1, максимальная температура приходится в области между центром и периферией породоразрушающего инструмента (рис.2).

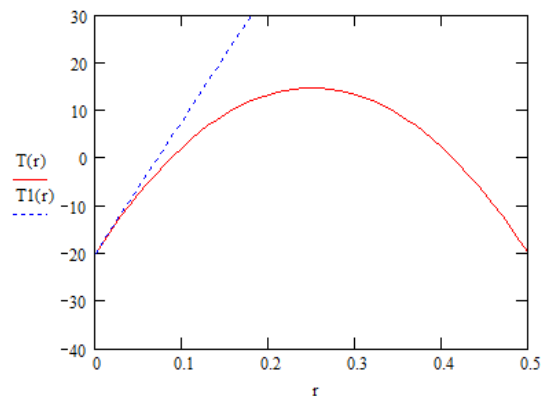


Рис.1. Зависимость выделяемой теплоты от радиуса расположения резцов $T=f(r)$

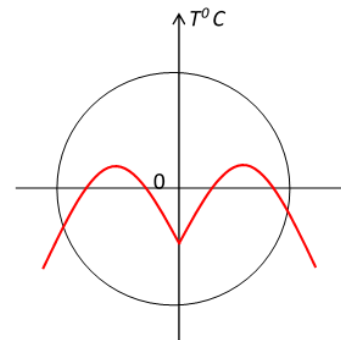


Рис. 2. Образование максимальной температуры в буре

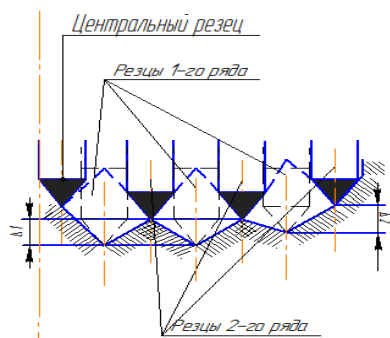


Рис. 3. Разная высота резцов породоразрушающего инструмента

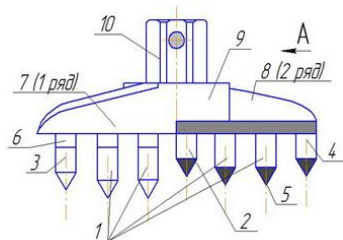


Рис. 4. Ступенчатое расположение резцов.

Условные обозначения: 1, 3 и 4 – рабочие резцы; 2 – центральный резец; 5 – твердосплавные режущие пластины; 6 – дополнительная вставка; 7 – первый ряд; 8 – второй ряд; 9 – корпус долота; 10 – хвостовик.

Заявка на изобретение №2014130654 от 24.07.2014 г.

В этой области образовавшаяся положительная температура при резании интенсифицирует растепление мерзлых пород, которые с последующим примерзанием и смерзанием к поверхности бура и стенкам скважины приводят к снижению эффективности работы породоразрушающего инструмента и шнекового транспортера. В области рабочей поверхности породоразрушающего инструмента с максимальной положительной температурой уменьшение выделяемой теплоты можно достичь путем конструирования специального двухлопастного породоразрушающего инструмента, в котором резцы на лопастях расположены по одному ряду с разными высотами (рис.3), при этом резцы одного ряда по концентрическим кругам при вращении проходят между резцами второго ряда, в этом случае обеспечивается объемное разрушение мерзлой породы на забое с минимизацией выделяемой температуры.

Ступенчатое расположение и разные рабочие углы резцов усовершенствованной конструкции двухлопастного долота (рис.4) при бурении скважин обеспечат эффективное объемное разрушение мерзлых пород с наименьшим процессом теплообразования. Устранение центрального опережающего резца позволяет повысить механическую скорость $V_{мех}$ за счет ликвидации эффекта центральной опорной точки по оси долота с нулевой окружной скоростью $v=0$.

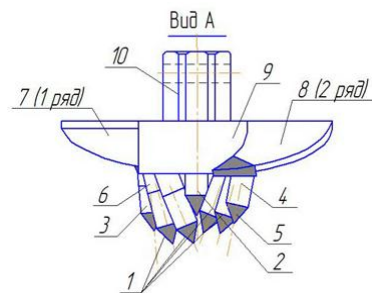


Рис. 5. Усовершенствованный вид породоразрушающего инструмента (долота).

Условные обозначения см. на рис. 4

По результатам проведенного исследования разработана усовершенствованная конструкция породоразрушающего инструмента (долота) для бурения скважин в условиях многолетнемерзлых пород (рис.5) путем устранения опережающего центрального резца с нулевой окружной скоростью вращения и ступенчатого расположения на двухлопастном буре резцов разной высоты, обеспечивающего эффективное объемное разрушение мерзлых пород с наименьшим процессом теплообразования в скважине.

Литература

1. Басов И.Г. Исследование влияния формы режущей части инструмента на износостойкость при разрушении мерзлых грунтов // Исследование землеройных машин. – Томск: Изд-во ТПУ, 1977. – С. 39–44.
2. Бейсебаев А.М. Бурение скважин и горно-разведочные работы. – М.: Недра, 1990. – 303 с.
3. Бугаев В.Г. Исследование процесса, разработка конструкции режущего инструмента и обоснование режимов вращательного бурения скважин: Дис. ... к.т.н. – Красноярск, 2004. – 307 с.
4. Грабчак Л.Г. Горно-разведочные работы. – М.: Высшая школа, 2003. – 661 с.
5. Минаков В.М. Влияние температурного режима в скважинах большого диаметра на бурение и качество опробования при разведке мерзлых россыпей // Геология и разведка. – 1991. – № 3. – С. 73–85.
6. Шевченко А.Н. Выбор рационального типа бурового инструмента и системы очистки скважин при бурении мерзлых пород: Дис. ... к.т.н. – Иркутск, 2007. – 128 с.
7. Карпиков А.П. Бурение горно-разведочных и технических выработок: Учеб.-справочное пособие. – М.: МГИУ, 2003. – 102 с.
8. Линьков С.А. Разработка конструкции и обоснование параметров рабочего органа для бурения скважин в мерзлых грунтах: Дис. ... к.т.н. – Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, 2007. – 185 с.
9. Каркашадзе Г.Г. Механическое разрушение горных пород: Учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 222 с.

Поступила в редакцию 15.03.2015