

Р.М. Скрябин, Б.В. Яковлев, Н.Г. Тимофеев, Х.Ю. Иванов

СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

О МИНИМИЗАЦИИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН ПО МЕРЗЛЫМ ПОРОДАМ

Аннотация. Процесс бурения и строительства различных скважин в условиях распространения многолетнемерзлых пород (криолитозоны) сопровождается значительным изменением физического свойства горных пород, особенно, находящихся в непосредственном контакте с буровым инструментом. Количественное изменение естественного температурного поля окружающего горного массива зависит в основном от температуры очистного агента, тепловых характеристик пород, радиуса скважины, способа бурения, а также от количества тепла, выделяющегося за счет механического разрушения (резания) горных пород.

При бурении в условиях мерзлых пород, эффективным способом минимизации температуры и охлаждения призабойной и приустевой части скважин является применение различных очистных агентов (промывка, продувка, пена) с добавлением ПАВ.

Но как показывают производственные работы, для предупреждения растепления многолетнемерзлых пород недостаточно только предварительное охлаждения циркулирующего жидкого бурового раствора, а необходимо также проектировать параметры режимов бурения скважины, частоты вращения и осевой нагрузки на забой при одновременном изменении количества и давления подаваемой в скважину промывочной жидкости.

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.

В статье рассмотрены закономерности изменения агрегатного состояния мерзлых пород при бурении скважин вращательным способом, приведен анализ эффективных способов очистных агентов для бурения в мерзлоте, выявлена аналитическая зависимость выделяемой теплоты на забое скважины от радиуса породоразрушающего инструмента.

Ключевые слова: теплоперенос, физические свойства, тепловыделение, бурение скважин, криолитозона, температура скважины, оттайка горной породы, очистной агент.

СКРЯБИН Рево Миронович – д.т.н., проф., зав. каф. ГРФ СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: titrsvfu@mail.ru

SKRIABIN Revo Mironovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department, Faculty of Geology and Survey, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

E-mail: titrsvfu@mail.ru

ЯКОВЛЕВ Борис Васильевич – д.ф.-м.н., проф., каф. теоретической физики ФТИ СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: yakutsk_09@mail.ru

IAKOVLEV Boris Vasilievich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Theoretical Physics of the PTI, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

E-mail: yakutsk_09@mail.ru

ТИМОФЕЕВ Николай Гаврильевич – к.т.н., доцент ГРФ СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: ng.timofeev@s-vfu.ru

TIMOFEEV Nikolai Gavrilievich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Geology and Survey, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

E-mail: ng.timofeev@s-vfu.ru

ИВАНОВ Христофор Юрьевич – студент ГРФ СВФУ им. М.К. Аммосова.

E-mail: yakutsk_09@mail.ru

IVANOV Khristofor Iur'evich – student, Faculty of Geology and Survey, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University.

E-mail: yakutsk_09@mail.ru

R.M. Skriabin, B.V. Iakovlev, N.G. Timofeev, H.Y. Ivanov
 M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

On the Minimization of Thermal Formation When Drilling Wells on Frozen Breeds

Abstract. The drilling and construction of various wells in permafrost conditions (cryolithozone) is accompanied by a significant change in the physical properties of rocks, especially those in direct contact with the drilling tool. The quantitative change in the natural temperature field of the surrounding rock mass depends mainly on the temperature of the cleaning agent, the thermal characteristics of the rocks, the radius of the well, the method of drilling, and also the amount of heat released by mechanical destruction (cutting) of rocks.

When drilling in conditions of frozen rocks, an effective method of minimizing the temperature and cooling the bottomhole and near-well part of the wells is the use of various cleaning agents (washing, blowing, foam) with the addition of surfactants.

However, as the production work shows, to prevent the melting of permafrost, only preliminary cooling of the circulating liquid drilling mud is not enough, and it is also necessary to design the parameters of the well drilling, rotation speed and axial load on the bottom while changing the amount and pressure of the drilling fluid supplied to the well.

The thermal phenomenon arising from the destruction of frozen rock is explained by the fact that during the drilling process, when the incisors contact the rock mass in the working surface area, the heating intensity of the cutting elements increases and because of the transition of the mechanical energy of the rock destruction into thermal energy.

The article considers the regularities of the change in the aggregate state of frozen rocks during drilling of boreholes by rotational method, gives the analysis of effective methods of cleaning agents for drilling in permafrost, and determines the analytical dependence of the heat at the bottom of the hole from the radius of the rock cutting tool.

Keywords: heat transfer, physical properties, heat, drilling, permafrost, wellbore temperature, defrost rock, cleaning agent.

Введение

Процесс бурения различных скважин в зоне распространения многолетней мерзлоты существенно отличается 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 [1]. В основе осложненных условий сооружения скважин в многолетнемерзлых породах лежит температурный фактор, определяющий эффективность процесса разрушения и транспортировки мерзлых горных пород на поверхность. В процессе разрушения мерзлой горной породы приустьевой части скважины, при контакте резцов породоразрушающего инструмента с горным массивом, в области рабочей поверхности резцов интенсифицируется тепловыделение, которое способствует таянию мерзлых пород и последующему примерзанию к буровому инструменту разрушенной горной породы, приводящее к различным осложнениям и авариям.

Основными определяющими компонентами многолетнемерзлых пород являются – лед, вода незамерзшая и (или) прочносвязанная, твердые минеральные частицы, а также пары и газы (рис. 1), которые в зависимости от формы и размеров оказывают существенное влияние на физико-механические свойства многолетнемерзлых пород [2].

Лёд – является основным компонентом мерзлых грунтов. Выделяют 1,2,3 модификации льда. В криолитозоне, содержится лёд 1-й модификации, имеющий высокую анизотропию свойств, существующий при температуре до -100°C , характеризующийся тем что, механические свойства кристаллов льда, в перпендикулярном направлении оси подчиняются законам реологической механики, в параллельном направлении, после упругих деформаций наступает хрупкое разрушение льда.

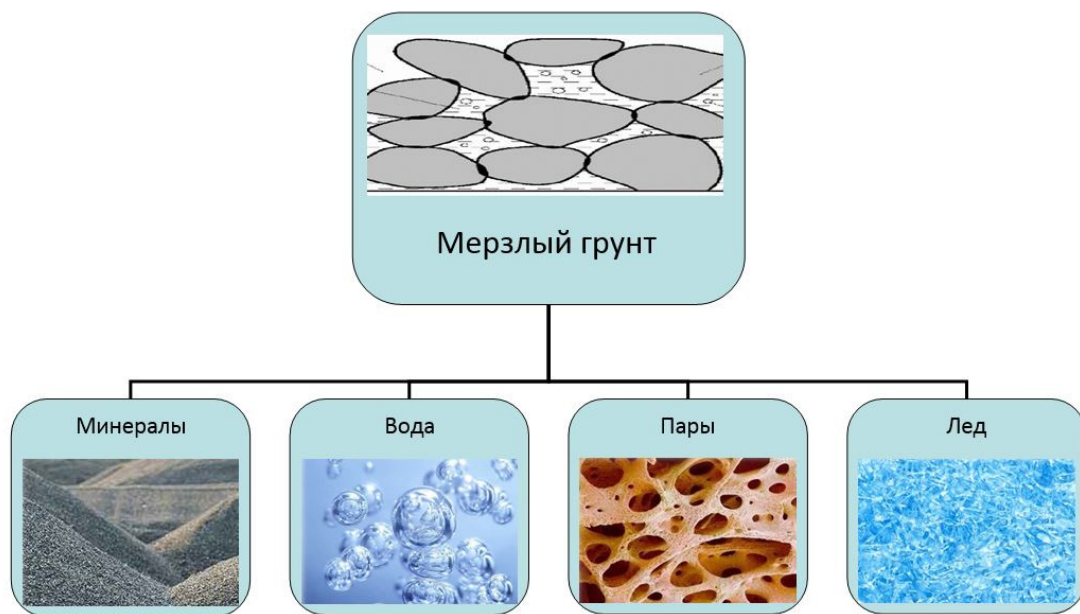


Рис. 1. Состав многолетнемерзлых пород. Источник Geo-technik

При значительной влажности, разрушение мерзлых пород происходит по прослойкам льда, которые по прочности идентичны льду. При этом, жесткий скелет горной породы с прослойками льда создает прочный монолитный мерзлый грунт с устойчивым сопротивлением к разрушению. Дальнейшее понижение температуры мерзлых пород приводит к возрастанию прочности кристаллической решетки льда и зацементированию скелета горных пород [2].

Температурный режим в скважине

Особенностью бурения скважин в мерзлых породах является их чувствительность к изменению теплового режима. Даже малые колебания температуры приустьевой части скважины значительно меняют прочностные свойства мерзлых пород. Это обусловлено возникновением в порах мерзлых пород переходных процессов, в которых, с понижением температуры часть содержащейся воды переходит из твердого состояния в жидкое. Дальнейшее изменение температуры приводит к смене состава воды в мерзлой породе и увеличению количества льда за счет воссоединения молекул чистой воды к кристаллам льда. Такое явление повышает концентрацию солей, содержащихся в незамерзшей воде мерзлого грунта и снижает температуру ее замерзания. Понижение температуры незамерзшей воды приводит к изменению физико-механических свойств горных пород: увеличивается их вязкость, а при дальнейшем повышении повышается пластичность и появляется склонность к оползанию, которые при достижении положительной температуры в скважине полностью теряют связность пород [1].

При сооружении и строительстве различных скважин в условиях распространения многолетнемерзлых пород, в связи с возникновением и развитием новых технических средств и технологий (алмазные буровые инструменты, высокопроизводительные буровые станки, снаряды со съемными керноприемниками, применение для очистки забоя газообразных агентов, незамерзающих жидкостей, полимерных и аэрированных растворов и др.), резким увеличением реализуемой на забое мощности, увеличением глубин разведочных и эксплуатационных скважин, контроль температурного фактора, приобретает все большее актуальное значение [3].

В процессе бурения и строительства скважин, подверженные к изменению агрегатное состояние мерзлых пород является главной причиной возникновения различных аварий и осложнений. Причиной тому является нарушение температурного режима в скважине в процессе бурения.

Задача надежного предупреждения осложнений, обоснования и отработки рациональной и эффективной технологии бурения и мерзлых породах исключает односторонний подход. Необходимо постоянно учитывать тепловое взаимодействие скважины и мерзлых пород [2].

Под температурным режимом бурящейся скважины понимается распределение температуры циркулирующего очистного агента по внутреннему каналу бурильной трубы и в кольцевом пространстве, которая зависит от большого числа факторов.

Нисходящий очистной агент в бурильных трубах находится в постоянном непрерывном теплообмене с восходящим потоком в кольцевом пространстве скважины, который, в свою очередь, контактируя с окружающим горным массивом, подвергается к изменению своей температуры не только по глубине, но и во времени.

Естественная температура горных пород с углублением скважины подвергается постоянному изменению, чаще возрастает. В результате теплообменного процесса очистного агента, в скважине нарушается тепловой баланс горных пород.

На забое скважины очистной агент воспринимает то тепло, которая образуется при механической работе породоразрушающего инструмента. Местный источник тепла в зоне забоя осложняет картину теплообмена в скважине, влияя не только на температуру восходящего потока, но и вследствие теплообмена через стенки бурильных труб – на температуру нисходящего потока.

Энергия, затрачиваемая потоком на преодоление сопротивлений трения в бурильных трубах и кольцевом пространстве, также рассеивается в виде тепла, оказывающего влияние на температуру среды.

При бурении с продувкой воздухом или газом наряду с процессами теплообмена происходят процессы массообмена, выражающиеся в изменении влажности воздуха или газа, что существенно влияет на их температуру.

При бурении по многолетнемерзлым породам теплообменные процессы осложняются изменениями фазового состояния воды в породах, очень сильно влияющими на интенсивность и направление тепловых потоков [4].

Температура промывочной среды в любой точке циркуляционной системы скважины в любой момент времени является результатом совместного проявления таких факторов, как расход и начальная температура промывочной среды, скорость движения и турбулентность потока, физические и теплофизические свойства промывочной среды и проходимых скважиной горных пород, естественная температура последних и характер ее изменения по глубине, конструктивные особенности, свойства материала бурильной колонны и обсадных труб, скорость бурения и продолжительность рейса, мощность, развиваемая на забое породоразрушающим инструментом и др. [5].

Действие большинства этих факторов различно на разных участках скважины, часто противоположно по знаку и изменяется со временем.

Задача определения температурного режима бурящейся скважины весьма сложна, практически невозможно определить эмпирическим путем, поэтому большинство исследователей при расчете данного параметра руководствуются аналитическими методами.

К настоящему времени многими исследователями предложен ряд решений задачи о температурном режиме в целях его прогнозирования [2, 3, 4, 6].

Тепловые явления в процессе резания играют исключительно важную роль. Именно они определяют температуру в зоне резания, которая оказывает прямое влияние на характер образования стружки, нарост, усадку стружки, величину сил резания и микроструктуру поверхностного слоя. Еще более существенное влияние оказывает температура резания на интенсивность затупления инструмента в его стойкость.

Тепловыделение при резании горной породы объясняется тем, что в тепло переходит механическая работа [6]:

$$A = A_o + A_m \quad (1)$$

где: A_o – работа, затрачиваемая на упругую и пластическую деформации срезаемого слоя; A_m – работа, затрачиваемая на преодоление сил трения по передней и задней поверхностям.

Физико-механические свойства горных пород (прочность, твердость, пластичность и др.) оказывают прямое воздействие на температурный режим. Основное влияние на тепловыделение оказывает теплопроводность горных пород [2].

Одним из основных способов и методов минимизации тепловыделения в процессе резания горной породы на забое скважины являются геометрические параметры бура (расположение резцов). С изменением переднего угла изменяется температура резания, так как при различных

значениях угла будут различными условия подвода и отвода тепла. С увеличением угла уменьшается сила, а, следовательно, и работа резания, а также и количество выделившегося тепла.

В результате повышения температуры в скважине происходит растепление и в результате разрушение стенок очистным агентом с положительной температурой, которое способствует возникновению различных осложнений (оползни и обвалы рыхлых пород, снижение выхода керна) и аварий (смятие колонн обсадных труб, прорыв газа за пределы скважины в процессе газопроявлений и др.).

Главной причиной перечисленных осложнений и аварий является нарушение температурно-го баланса скважины в процессе бурения вследствие применения технологии буровых работ, не учитывая теплообменного процесса между мерзлыми породами и очистным агентом.

В практике проведения горных выработок (бурение и строительство скважин и др.) в условиях мерзлых пород, эффективным способом минимизации температуры и охлаждения призабойной и приустьевой части скважин является применение различных очистных агентов (промывка, продувка, пена) с добавлением ПАВ.

Но, как показывают производственные работы, для предупреждения растепления многолетнемерзлых пород недостаточно только предварительное охлаждения циркулирующего жидкого бурового раствора, а необходимо также проектировать режимы бурения скважины, частоты вращения и осевой нагрузки на забой при одновременном изменении количества и давления подаваемой в скважину промывочной жидкости [6].

Современные способы бурения скважин

Практика введения буровых работ в условиях мерзлых пород показывает, что применение сжатого воздуха (продувка), при этом, одновременно охладив и остудив его перед подачей в скважину, является более эффективным.

Наиболее перспективными современными буровыми техниками промышленной индустрии являются следующие виды:

Предлагаемые компанией ООО «ДрилТулс» (DrillTools) специализирующей на поставке бурового инструмента для строительных и горнодобывающих компаний нашей страны пневмоударники большого диаметра и кластеры, предназначенные для бурения скважин под сваи, скважин под опоры электропередач, скважин технического назначения диаметром 250-1500 мм по породам высокой крепости, которые трудно бурить традиционным вращательным способом. По крепким породам скорость бурения пневмоударника значительно превышает скорость бурения вращательным способом, что позволяет увеличивать норму выработки бурового станка и уменьшать общие затраты на бурение.

Кластерные пневмоударники (рис. 2), представляют собой стальной цилиндрический корпус с несколькими, установленными внутри погружными пневмоударниками с долотом 251 мм. Пневмоударники установлены в барабане таким образом, чтобы каждый из них описывал свою траекторию, обеспечивающую бурение полным забоем. Кластерные пневмоударники (или низкопрофильные буры) используются для бурения скважин диаметром от 380 до 2500 мм по крепким породам и применяются в строительстве и в горном деле для бурения кессонов, разведочных скважин, стен в грунте, колодцев под сваи и т.д.



Рис. 2. Кластерные пневмоударные системы

Кластерные пневмоударники с корзиной для сбора шлама (рис. 3) предназначены специально для высокотехнологичных строительных буровых установок с Келли технологиями.

Такая технология является экономически выгодным с точки зрения капитальных затрат и обслуживания по следующим причинам:

- ускоряются спуско-подъемные операции;
- нет необходимости замены штанги Келли на полую буровую штангу. Кластерный пневмоударник устанавливается на штангу Келли, а воздух подается через РВД пущенный параллельно;

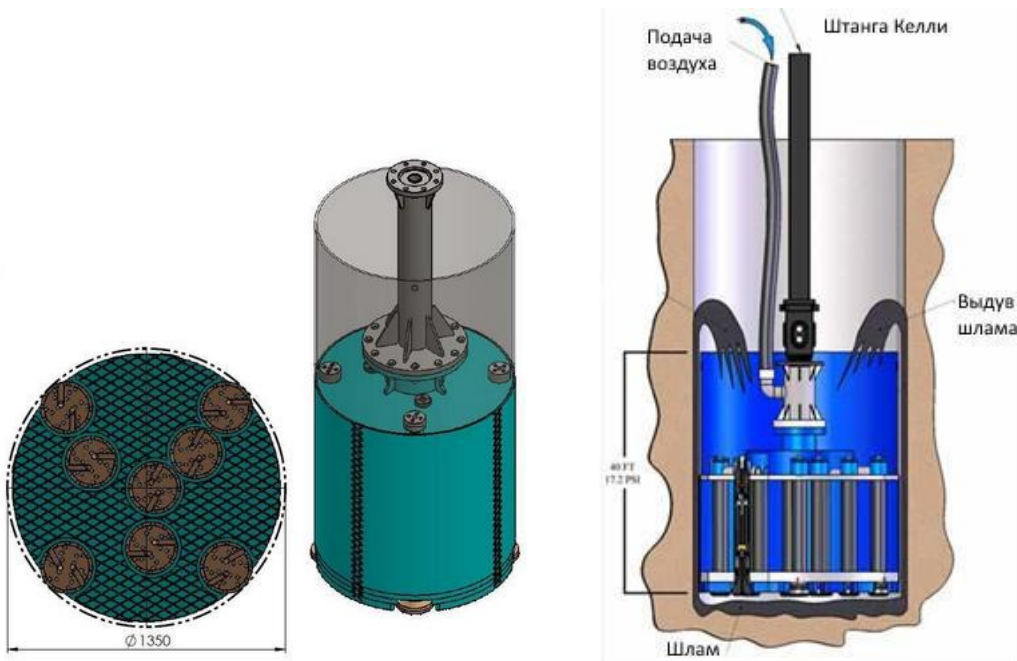


Рис. 3. Кластерные пневмоударники с корзиной для сбора шлама

- не требуется вертлюг т.к. нет непрерывного вращения бурового става.
- не требуется демпферный переходник благодаря низкой вибрации кластера.

Наиболее эффективным способом при геологоразведочных работах является комбинированный способ бурения с шнековым транспортированием разрушенной породы.

В этом плане предлагается шнековый пневмоударник (рис.4), который позволяет значительно повысить производительность на бурение пород средней крепости и одновременно обеспечивает аккумуляцию разрушенной породы. В качестве рабочего агента используется сжатый воздух.



Рис. 4. Шнековые пневмоударники большого диаметра

Но, продувка сжатым воздухом не всегда препятствует возникновению осложнений, связанных с протаиванием мерзлых горных пород в скважине. Этому способствуют физические свойства циркулирующего воздуха по колонне бурильных труб, которые находятся в постоянном контакте со стенками труб и в результате трения нагреваются до положительных температур.

В этом плане, наиболее эффективным очистным агентом при бурении скважин в районах распространения многолетнемерзлых пород, по значительным объемам проведенных исследований является использование пены.

Пена находит быстрорастущее применение как новая и весьма перспективная разновидность промывочных агентов при бурении скважин различного назначения. Важнейшими достоинствами пены является малый расход воды, высокая транспортирующая и удерживающая способность, отсутствие потерь циркуляции в поглощающих горизонтах за счет прочности структуры, смазывающее действие, высокая охлаждающая способность в силу эффекта испарительного охлаждения, высокие механические скорости за счет снижения гидростатического давления на забой и эффективной очистки его от шлама, возможность регулирования в широких пределах плотности, что значительно снижает вероятность кальматации при вскрытии продуктивных горизонтов с низким пластовым давлением. Все эти достоинства обусловили применение пены в различных областях, часто отличающихся особыми горно-геологическими или климатическими условиями [7].

Заключение

Для полноты процесса теплообразования на рабочей поверхности бурового инструмента, как пример рассмотрим вращательное резание породы буром (рис. 5) [1]:

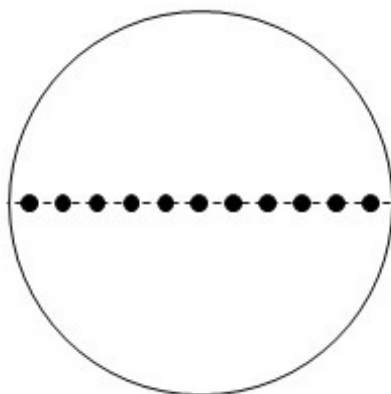


Рис. 5. Распределение резов на буре

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

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 идет на резание породы A_a . 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

$$a = \Delta V / \Delta A. \quad (2)$$

Таким образом, для элементарной работы силы трения имеем выражения:

$$dA = F_{tr} dl = dQ + A_a = dQ + \frac{1}{a} dV, \quad (3)$$

где dl – перемещение резца за время dt , dQ – теплота, выделяемая при трении, $\frac{dV}{a}$ – работа, затрачиваемая на дробление (истирание) породы пропорциональна объему

истираемой породы, a – коэффициент пропорциональности.

Для решения задачи делаем 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 (3) делим на dt и получаем:

$$mC \frac{dT}{dt} = \mu N \frac{dl}{dt} - \frac{h_e r^2}{a} \frac{d\varphi}{dt}, \quad (4)$$

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

$$v = \frac{dl}{dt} - \text{линейная скорость резца, которая равна } v = \omega r,$$

где $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ – угловая скорость бура. (5)

Поставляя значение линейной скорости и угловой скорости в (3) получаем:

$$mC \frac{dT}{dr} \omega r = \mu N \omega r - \frac{h_e}{a} r^2 \omega, \quad (6)$$

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

Интегрируя уравнение (4),

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

получаем распределение температуры на рабочей поверхности

$$T(r) = \frac{\mu N}{mC} r - \frac{h_e}{2mCa} r^2 + const. \quad (7)$$

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

На рис. 6. 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.

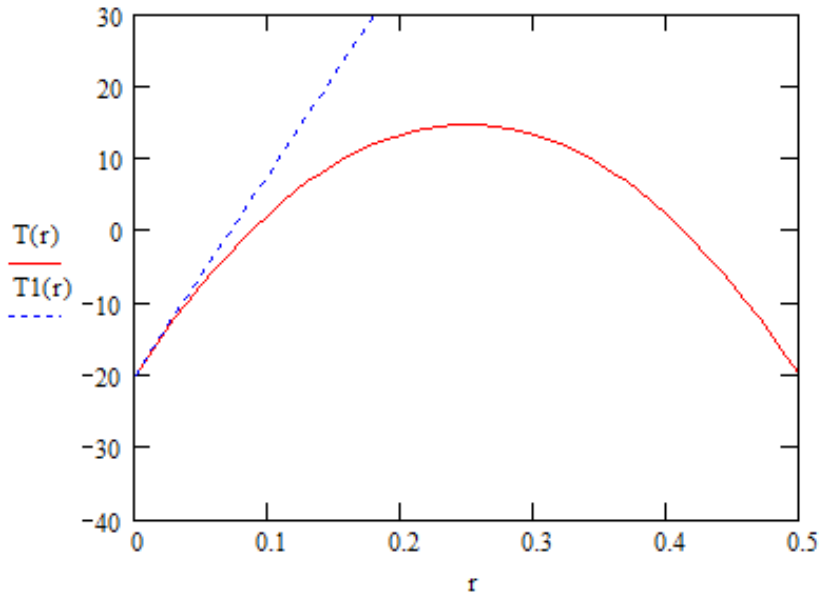


Рис. 6. Зависимость выделяемой теплоты от радиуса расположения резцов $T=f(r)$

Как видно из рис. 6 максимальная температура приходится в области между центром и периферией породоразрушающего инструмента (рис. 7).

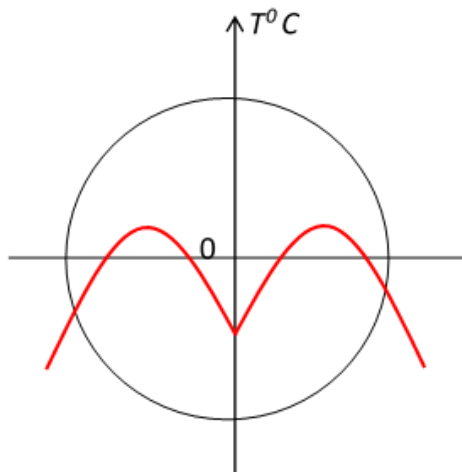


Рис. 7. Образование максимальной температуры в буре

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 породоразрушающего инструмента, в котором резцы на лопастях расположены по одному ряду с разными высотами, 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 [1].

Литература

1. Тимофеев Н.Г. Исследование и совершенствование технологии бурения шурфо-скважин в условиях криолитозоны: дис... к.т.н. 25.00.14. – М., 2015. – 150 с.
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. Ермилов О.М., Дегтярев Б.В., Курчиков А.Р. Сооружение и эксплуатация газовых скважин в районах крайнего севера. Теплофизические и геохимические акценты. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. – 218 с.
4. Кудрявцев С.А. Численные исследования теплофизических процессов в сезонно-мерзлых грунтах // Криосфера земли. – 2003. – № 4. – С. 102-104.
5. Салихов З.С., Зинченко И.А., Полозков А.В., Орлов А.В. и др. Исследование и учет глубинных геокриологических условий на техническое состояние добывающих скважин в многолетнемерзлых породах при оттаивании // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2006. – № 8. – С. 8-22.
6. Проселков Ю.М. Теплопередача в скважинах. – М.: Недра, 1975. – 209 с.
7. Кирсанов А.И., Крылов Г.А., Нefeldов В.П. Пены и их использование в бурении. – М.: ВИЭМС, 1980. – 60 с.

References

1. Timofeev N.G. Issledovanie i sovershenstvovanie tekhnologii bureniia shurfo-skvazhin v usloviiax kriolitozony: dis... k.t.n. 25.00.14. – M., 2015. – 150 s.
2. Kudriashov B.B., Chistiakov V.K., Litvinenko V.S. Burenie skvazhin v usloviiax izmeneniia agregatnogo sostoianiiia gornykh porod. – L.: Nedra, 1991. – 295 s.
3. Ermilov O.M., Degtiarev B.V., Kurchikov A.R.. Sooruzhenie i ekspluatatsiia gazovykh skvazhin v raionakh krainego severa. Teplofizicheskie i geokhimicheskie aktsenty. – Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 2003. – 218 s.
4. Kudriavtsev S.A. Chislennye issledovaniia teplofizicheskikh protsessov v sezonno-merzlykh gruntakh // Kriosfera zemli. – 2003. – № 4. – S. 102-104.
5. Salikhov Z.S., Zinchenko I.A., Polozkov A.B., Orlov A.B. i dr. Issledovanie i uchet glubinykh geokriologicheskikh uslovii na tekhnicheskoe sostoianie dobyvaiushchikh skvazhin v mnogoletnemerzlykh porodakh pri ottaivanii // Stroitel'stvo neftiannykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more. – 2006. – № 8. – S. 8-22.
6. Proselkov Iu.M. Teploperedacha v skvazhinakh. – M.: Nedra, 1975. – 209 s.
7. Kirsanov A.I., Krylov G.A., Nefeldov V.P. Peny i ikh ispol'zovanie v burenii. – M.: VIEMS, 1980. – 60 s.