Записки Санкт-Петербургского горного института.
Т. 136. СПб, 1993

УДК 622.213

Б.Б.КУДРЯШОВ, Н.Г.МЕНЬШИКОВ
(Санкт-Петербургский горный ин-т)

РАСЧЕТ СКОРОСТИ КОЛОНКОВОГО БУРЕНИЯ ПЛАВЛЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ ЖИДКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Энергоемкость процесса бурения льда плавлением многократно выше, чем при механическом разрушении. Существенным преимуществом способа бурения льда плавлением является простота конструкции и надежность термоэлектробурогых снарядов на грузонесущем кабеле, поэтому они получили широкое применение в отечественной практике изучения ледников и ледниковых покровов с помощью глубоких скважин [4] и позволили достичь рекордных результатов[x]. Поскольку энергоемкость процесса прямо пропорциональна объему льда, разрушаемого на единицу проходки, при колонковом бурении целесообразно сужение радиальной ширины кольцевого забоя. При этом необходимо стремиться к уменьшению объема кольцевого рабочего органа - нагревателя, поскольку рассредоточение его по высоте приводит к нерациональному рассеиванию тепловой энергии в окружающий массив и керн. Вместе с тем мощность источника тепловой энергии в виде элемента электросопротивления также пропорциональна его объему. По соображениям надежности и долговечности в кольцевой рабочий орган невозможно вместить электросопротивление достаточно высокой мощности. Те же соображения относятся и к СВЧ-источнику тепловой энергии.

По указанным причинам целесообразно разместить мощный источник тепловой энергии в неограниченном по высоте теплоизолированном котле выше керноприемной трубы. Промежуточный теплоноситель, в качестве которого можно использовать незамерзающую заливочную жидкость на углеводородной основе [2, 4], подается по теплоизолированным трубкам в формирующий стенки скважины и керн кольцевой рабочий орган в виде опрокинутого тонкостенного кольцевого стакана (рис.1) под влиянием разрежения, создаваемого насосом в водосборном баке. Гидродинамическое воздействие теплоносителя способствует эффективному плавлению льда. Образующаяся вода в смеси с отработавшим теплоносителем выносится в водосборный бак, где смесь разделяется по плотности. Теплоноситель через полипоточный фильтр вновь посту-

[x] Пробуренные специалистами С-ПГИ на станции „Восток" в Антарктиде самые глубокие во льдах скважины: сухая (952,5 м) и залитая низкотемпературной жидкостью (2546 м) зарегистрированы в Книге рекордов Гиннеса.

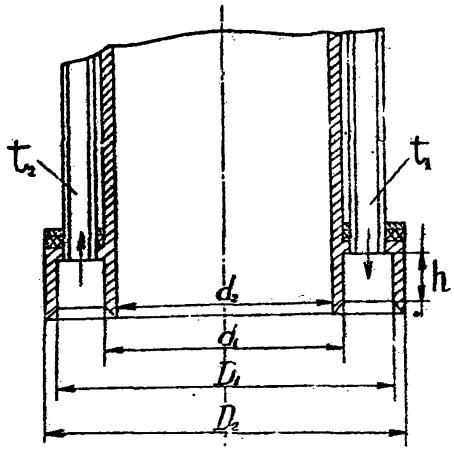


Рис.1. Схема рабочего органа – гидробуровой коронки

пает в котел. При этом происходит полезная для состояния скважины очистка заливочной жидкости – теплоносителя. Разрежение в полости кольцевого рабочего органа обеспечивает плотное прилегание его режущих кромок к забою и устраняет выход теплоносителя в ствол скважины, что необходимо для формирования гладких стенок скважины и керна. Следует учитывать, что заливочная жидкость на углеводородной основе имеет более высокую температуру кипения, тем более при высоком давлении на больших глубинах, что также способствует эффективности плавления льда.

Разработка конструкции жидкостного теплового снаряда [I] и вопросы технологии бурения требуют обоснования методики инженерных расчетов его параметров, необходимого расхода и температуры теплоносителя.

Рассмотрим взаимосвязь тепломассообменных процессов, обеспечивающих бурение льда плавлением с помощью жидкого теплоносителя, циркулирующего по открытой поверхности ледового забоя внутри формирующего стенки скважины и керн кольцевого рабочего органа – гидробуровой коронки (рис.I).

Примем следующие основные исходные допущения: процесс бурения плавлением установившийся; квазистационарное температурное поле впереди движущегося забоя одномерное; в силу кратковременности теплового воздействия поле температур в радиальных направлениях одномерное; тепловым сопротивлением пленки воды в кольцевых зазорах между рабочим органом и льдом пренебрегаем; теплофизические свойства смеси теплоносителя и воды в полости рабочего органа подчиняются правилу аддитивности и определяются при средней температуре; температура смеси в полости рабочего органа равна среднеарифметической между начальной t_1 и конечной t_2 температурами; верхний торец кольцевого рабочего органа теплоизолирован и в теплообмене не участвует.

В рамках принятых допущений для составления балансового уравнения частные тепловые потоки выразим следующим образом.

Теплота в единицу времени на перегрев талой воды от температуры плавления льда до конечной температуры смеси

$$Q_1 = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - d_2^2) c_в \rho_л (t_2 - T_{агр}) v \qquad (I)$$

где D_2, d_2 – наружный и внутренний диаметры кольцевого рабочего органа, м; $c_в$ – теплоемкость воды, Дж/(кг·°С); $\rho_л$ – плотность льда, кг/м^3; t_2, $T_{агр}$ – конечная температура смеси на выходе из рабочего органа и температура плавления льда, °С; v – скорость бурения плавлением, м/с.

Тепловой поток на плавление льда

$$Q_2 = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - d_2^2)\phi\rho_л v, \qquad (2)$$

где ϕ - удельная теплота плавления льда, Дж/кг.

Тепловой поток на прогрев льда от естественной температуры в массиве до температуры плавления в соответствии с теорией движущегося плоского теплового источника при установившемся режиме [4]

$$Q_3 = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - d_2^2)c_л\rho_л(T_{ст.р} - T_л)v, \qquad (3)$$

где $c_л$ - теплоемкость льда, Дж/(кг·°С); $T_л$ - естественная температура льда на данной глубине, °С.

Суммарный тепловой поток в радиальных направлениях (в ледовый массив и керн) с учетом времени теплового воздействия $\tau = h/v$ на основании работы [3] можно выразить как

$$Q_4 = K(t_{ср} - T_л) = K\left(\frac{t_1 + t_2}{2} - T_л\right), \qquad (4)$$

где $t_{ср}$ - средняя температура смеси, °С; K - коэффициент теплопередачи от циркулирующей смеси в ледовый массив и керн, Вт/°С,

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k\pi(D_1 + d_1)h} + \frac{1}{2(D_2 + d_2)\sqrt{\pi\lambda_л\rho_л c_л h v}}}; \qquad (5)$$

D_1, d_1 - наружный и внутренний диаметры полости кольцевого рабочего органа, м; h - высота рабочего органа, м; $\lambda_л$ - теплопроводность льда, Вт/(м·°С); k - приведенный коэффициент теплопередачи через боковые стенки кольцевого рабочего органа от циркулирующей смеси к стенкам скважины и керна, условно находящимися при температуре плавления льда, Вт/(м^2·°С),

$$k = \frac{1}{1/\alpha + \delta/\lambda}; \qquad (6)$$

α - коэффициент теплоотдачи от циркулирующей смеси к внутренним боковым стенкам кольцевого рабочего органа, Вт/(м^2·°С); δ - толщина боковых стенок рабочего органа, м; λ - коэффициент теплопроводности материала стенок, Вт/(м·°С).

Суммарное количество теплоты, затраченной в единицу времени на установившийся процесс бурения плавлением,

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \qquad (7)$$

можно выразить также через изменение энтальпии смеси теплоносителя с талой водой

$$Q = G_т c_т (t_1 - t_2) + \frac{\pi}{4}(D_2^2 - d_2^2) c_в \rho_л (t_2 - T_{агр}) v, \qquad (8)$$

где $G_т$ - массовый расход теплоносителя, кг/с; $c_т$ - теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·°С); t_1 - начальная температура теплоносителя, °С.

Приравнивая выражения (7)-(8) с учетом формул (I)-(4), принимая для льда $T_{агр} = 0$ и решая уравнение относительно конечной температуры смеси, после преобразований получим

$$t_2 = \frac{2G_т c_т t_1 - K(t_1 - 2T_л) - \frac{\pi}{2}(D_2^2 - d_2^2)\rho_л(\phi - c_л T_л) v}{2G_т c_т + K} \qquad (9)$$

с двумя неизвестными t_2 и v.

Количество теплоты, переданное конвекцией в ту же единицу времени от циркулирующей смеси к поверхности ледового забоя, можно представить выражением

$$Q_э = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - d_2^2)\alpha^*\left(\frac{t_1 + t_2}{2} - T_{агр}\right), \qquad (10)$$

где α^* - коэффициент теплоотдачи при плавлении льда потоком смеси теплоносителя и талой воды, Вт/(м^2·°С).

Приравнивая полученное выражение (10) к сумме выражений (2) и (3), принимая $T_{агр} = 0$ и решая относительно конечной температуры, получим второе уравнение с теми же неизвестными:

$$t_2 = \frac{2\rho_л(\phi - c_л T_л) v}{\alpha^*} - t_1. \qquad (11)$$

Приравнивая теперь выражения (9) и (11), после преобразований получим трансцендентное уравнение для скорости бурения льда плавлением жидкостным тепловым снарядом

$$v = \frac{\alpha^*}{2\rho_л(\phi - c_л T_л)}\left[\frac{2G_т c_т t_1 - K(t_1 - 2T_л)}{2G_т c_т + K} + t_1\right] - \frac{\alpha^* F v}{2G_т c_т + K}, \qquad (12)$$

где F - площадь кольцевого забоя, $F = \frac{\pi}{4}(D_2^2 - d_2^2)$, м^2.

Уравнение (12) приближенно учитывает совместное проявление всех основных, определяющих процесс бурения факторов: расход, начальную температуру и теплофизические свойства жидкого теплоносителя, конструктивные размеры и теплопроводность материала рабочего органа, свойства и естественную температуру льда, режим движения смеси теплоносителя с талой водой и др.

Вычислив с помощью итерации на ЭВМ значение скорости бурения v в конкретных условиях, с помощью уравнений (9) и (11) можно получить значения конечной температуры смеси на выходе из рабочего органа t_2. Их совпадение будет свидетельствовать о правильности выбранных исходных параметров и точности расчетов. Уравнение (12) позволяет расчетным путем про-

следить влияние на эффективность бурения всех определяющих факторов.

Достоверность расчетов решающим образом зависит от объективности выбора и точности определения входящих в уравнение (I2) величин. Существенную сложность представляет точное определение коэффициента теплоотдачи на внутренних боковых поверхностях кольцевого рабочего органа при движении смеси теплоносителя с талой водой и, особенно, коэффициента теплоотдачи на забое при плавлении льда.

Необходимый при расчетах характерный размер канала потока определяется в виде отношения учетверенной площади его сечения к смоченному периметру [5]:

$$d = 4f/u. \qquad (I3)$$

При прямоугольном радиальном сечении полости и условно плоском забое (рис.I)

$$f = \frac{D_1 - d_1}{2} h; \qquad u = 2h + D_1 - d_1,$$

откуда

$$d = \frac{2(D_1 - d_1)h}{2h + D_1 - d_1}. \qquad (I4)$$

Средняя по сечению скорость движения смеси определится в этом случае выражением

$$w_{см} = \frac{2G_т}{(D_1 - d_1)h\rho_т} + \frac{\pi(D_2 + d_2)\rho_л}{h\rho_в} v. \qquad (I5)$$

Коэффициент теплоотдачи при движении жидкости в нашем случае определяется зависимостью

$$\alpha = Nu_{см}\frac{\lambda_{см}}{d} \qquad (I6)$$

где $Nu_{см}$ – безразмерный параметр Нуссельта для смеси; $\lambda_{см}$ – теплопроводность смеси, Вт/(м·°С); d – характерный размер канала, м.

При турбулентном движении жидкости (единственно оправданном в случае теплового бурения льда жидкостным снарядом) конкретное значение параметра Нуссельта определяется по критериальной формуле М.А.Михеева [5], которую в данном случае представим в виде

$$Nu_{см} = 0{,}02\varepsilon Re_{см}^{0{,}8} Pr_{см}^{0{,}43}(Pr_{см}/Pr_{ст})^{0{,}25}, \qquad (I7)$$

где ε – безразмерный коэффициент, учитывающий изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине канала.

Последний член правой части формулы (I7) учитывает зависимость физических свойств теплоносителя от температуры, различающейся в ядре потока

и у стенки. Поскольку в рассматриваемом случае физические свойства смеси оцениваются приближенно, примем $(Pr_{см}/Pr_{ст}) = 1$.

В реальной конструкции кольцевого рабочего органа для увеличения расхода теплоносителя предусматривается несколько поочередно расположенных подающих и отсасывающих трубок и поэтому длина канала потока (участка кольцевой полости между соседними трубками) соизмерима с его характерным поперечным размером d. Для этих условий по данным М.А.Михеева [5] можно принять $\varepsilon_e \approx 1,5$.

С учетом высказанных соображений при расчетах в нашем случае можно пользоваться упрощенной формулой

$$Nu_{см} = 0,03 Re_{см}^{0,8} Pr_{см}^{0,43}$$

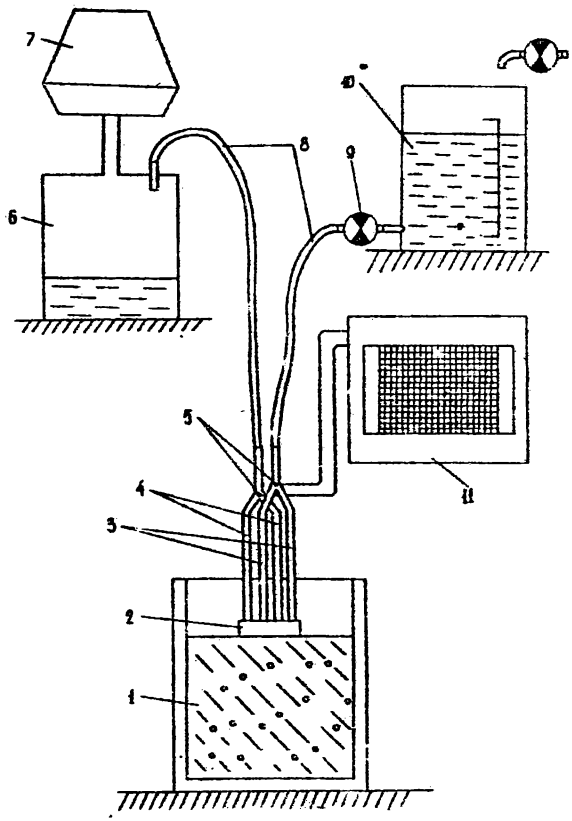


Рис.2. Схема стенда для опытного бурения льда плавлением с помощью горячей воды

1 – блок льда; 2 – модель гидробуровой коронки; 3 – подающие трубки; 4 – всасывающие трубки; 5 – термопары; 6 – водосборный бак; 7 – всасывающий турбокомпрессор; 8 – шланги; 9 – регулировочный вентиль; 10 – мерная емкость для горячей воды; 11 – самопишущий потенциометр

Следует учитывать, что определение значений коэффициента теплоотдачи по приведенным формулам, в особенности применительно к ледовому забою, является весьма условным и приближенным. На характер и интенсивность теплообмена на ледовом забое действуют такие мощные факторы, как фазовый (агрегатный) переход, массообмен за счет образующейся талой воды и процессы ее перемешивания с теплоносителем в условиях вынужденной конвекции [6]. Эти сложные явления требуют детального экспериментального исследования для оценки реальной величины коэффициента теплоотдачи α^*.

В лаборатории кафедры технологии и техники бурения скважин С-ПГИ на специально изготовленном стенде (рис.2) были проведены оценочные опыты по бурению плавлением в блоках льда с использованием в качестве теплоносителя горячей воды. Блоки льда приготавливались искусственным замораживанием водопроводной воды в холодильной

камере и имели температуру –7 °С. Испытывались две модели кольцевого рабочего органа – с прямоугольным и параболическим радиальным сечением полости с размерами d_2 = 76 мм; d_1 = 80 мм, D_1 = 110 мм; D_2 = 114 мм, h = 15 мм (см. рис.1), изготовленные из латуни. В отверстиях верхнего торца каждой модели закреплены три подающих и три отсасывающих латунных трубки с внутренним диаметром d_0 = 8 мм. В местах сопряжения трубок в коллекторах (рис.2) расположены термопары ХК-68 для измерения начальной t_1 и конечной t_2 температур жидкости, регистрировавшихся на ленте самопишущего потенциометра КСП-4. В блоках льда пробурено семь скважин глубиной по 0,2 м и получен керн. Результаты представлены в таблице.

Результаты опытов по бурению льда жидким теплоносителем

Расход воды, л/ч	Температура на входе, °С	Температура на выходе, °С	Диаметр скважины, мм	Диаметр керна, мм	Скорость бурения, м/ч
25	95	22	124	61	0,95
152,5	97	46	118–120	68	2,55
77,7	95	44	120	62	1,64
82,8	95	45	119	65	2,00
94,1	95	46	121	65	1,83
30,4	97	28	122	63	1,13
53,4	97	33	121	64	1,57

Форма забоя повторяет форму нижней части рабочего органа – гидробуровой коронки. Против отверстий для горячей воды в ледовом забое образовывались впадины тем большей глубины, чем выше расход теплоносителя.

Поскольку в условиях экспериментов всасывающий турбокомпрессор не обеспечивал полное удаление из призабойной зоны теплоносителя в смеси с талой водой, на стенках скважины и керна образовывались промоины-каверны глубиной соответственно до 11 и 15 мм. Различие в форме радиального сечения полости моделей не оказало влияния на скорость бурения плавлением.

Прикидочный расчет по упрощенному варианту приведенных выше зависимостей дал удовлетворительное качественное и количественное совпадение с опытными данными. Несмотря на относительно небольшие значения полученной скорости бурения, проведенные оценочные опыты подтверждают целесообразность дальнейших исследований в данном направлении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.с. 1500758 СССР. Устройство для колонкового бурения льда / Б.Б.Кудряшов, А.А.Земцов, А.М.Шкурко, Н.Г.Меньшиков // Бюл. изобр. 1989. № 3.

2. Исследование процессов тепломассопереноса в призабойной зоне скважины при бурении льда с использованием жидкости в качестве теплоносителя и разработка методики расчета параметров жидкостного теплового снаряда: Отчет о НИР (промежуточ.) / ЛГИ; Руководитель Б.Б.Кудряшов. № ГР 0186010297. Л., 1988.

3. Кудряшов Б.Б., Литвиненко В.С. К теории процесса бурения скважин и упрочнения горных пород плавлением // Устойчивость и крепление горных выработок: Межвуз. сб. науч. трудов / Ленинградский горный ин-т. Л., 1990.

4. Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в мерзлых породах. М.: Недра, 1983.

5. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977.

6. Ткачев А.Г. Конвективный теплообмен в процессах плавления и затвердевания гомогенной среды Конвективная передача в двухфазном и однофазном потоках . М.: Энергия, 1984.