Б.Б.КУДРЯШОВ, А.Н.ДМИТРИЕВ, Н.И.ВАСИЛЬЕВ
Санкт-Петербургский горный институт, Россия

ОСНОВЫ ТЕОРИИ АСЕПТИЧЕСКОГО ВСКРЫТИЯ ПОДЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА ВОСТОК

Для экологически безопасного проникновения в подледниковое озеро Восток, обнаруженное в толще Восточной Антарктиды на глубине 3700 м (площадь более 10 тыс. км^2, гипотетически пресноводное и содержащее реликтовые формы жизни), требуется разработка новых методов, технологий и технических средств бурения.

В СПГГИ спроектирован специальный тепловой буровой снаряд ТБПО, позволяющий на первом этапе исследований получить пробы воды из этого уникального природного образования практически без непосредственного в него проникновения. Для этого наша скважина 5Г-1 на станции Восток, достигшая рекордной для льдов глубины 3623 м, углубляется еще на 100 м. Когда до контакта с водой озера останется приблизительно 30 м, гидростатическое давление в скважине сознательно снижается на 0,3 МПа, призабойная зона заполняется биологически стерильной кремнийорганической буферной жидкостью и бурение продолжается тепловым снарядом ТБПО. По существующим расчетам, после вскрытия контакта пилотным термодоло-

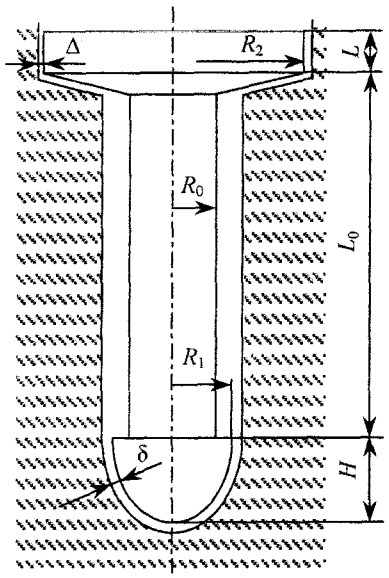


Рис.1. Схема ступенчатого забоя

том вода из озера быстро поднимется в скважине приблизительно на 30 м и снаряд будет немедленно извлечен. Если же, вопреки расчетам, гидростатическое давление в стволе скважины окажется выше горного (которому равно давление озерной воды), опорная термокоронка сыграет роль клапана и перекроет путь кремнийорганической жидкости в озеро. При этом потребуется дополнительное тартание заливочной жидкости из скважины с целью подъема озерной воды на 30 м. В обоих случаях озерная вода замерзнет в скважине, после чего часть образовавшейся ледяной пробки будет пробурена электромеханическим снарядом КЭМС-112 с отбором керна. Исследования полученного керна дадут первые сведения о составе озерной воды и наличии в ней микрофлоры.

В отличие от нестационарного теплообмена, характерного лишь для первых секунд (максимально 10 с) [1, 10] плавления льда, случай установившегося режима не только существенно облегчает постановку и решение задачи, но и позволяет наиболее просто и достоверно учесть конструктивные особенности рабочего органа и влияние основных определяющих процесс технологических факторов. Последнее с точки зрения задачи экологически безопасного вскрытия подледникового озера имеет первостепенное значение, поскольку сам смысл анализа сводится к обеспечению оптимальной конструкции рабочего органа и отысканию наиболее эффективного сочетания режимных параметров бурения плавлением.

Ранее полученные нами и другими авторами решения задачи бурения льда (фирна, снега) плавлением [2, 3, 5, 6, 8, 11, 12] не пригодны для анализа механизма вскрытия подледникового озера скважиной с двухъярусным забоем, а, кроме того, одни из них не учитывают рассеивание теплоты в окружающий массив, другие – экранирующее действие непрерывно образующейся пленки талой воды и гидравлических сопротивлений при ее вытеснении из-под рабочего органа или этот учет крайне сложен и не доведен до уровня инженерных расчетов.

Рассмотрим раздельно установившийся процесс теплообмена с ледяным забоем и окружающей средой пилотного термодолота в форме тела вращения цепной линии вокруг вертикальной оси и кольцевой опорной термокоронки цилиндрической формы со слабоконическим рабочим торцом (рис.1), имея в виду, что та же методика может быть использована при любой другой форме составных элементов рабочего органа. Принимаем пилотный и опорный элементы рабочего органа в качестве тел с равномерно распределенными тепловыми источниками, верхние торцы обоих элементов теплоизолированы и в теплообмене не участвуют. Теплофизические свойства льда и талой воды характеризуются значениями соответствующих параметров при средней температуре, что соответствует общепринятым в горной теплофизике допущениям, аналитически рассматривается двухмерная тепловая задача, упрощенная с помощью принципа суперпозиции [9]. В рамках принятых допущений для теплового баланса применительно к пилотному термодолоту (рис.2) при установившемся режиме справедливо уравнение

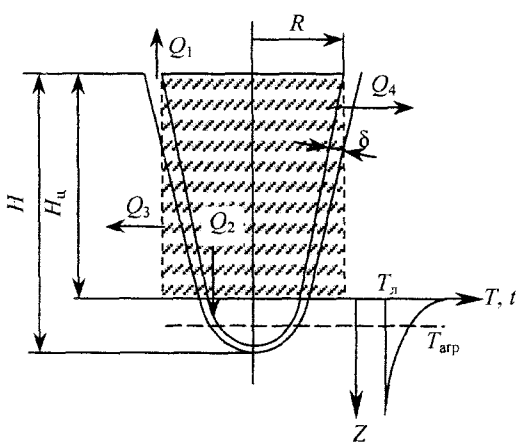


Рис.2. Схема взаимодействия пилот-долота с забоем

$$N_1 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \qquad (1)$$

где N_1 – тепловая (электрическая) мощность термодолота, Вт; Q_i – тепловой поток, Вт: Q_1 – на перегрев вытесняемой с забоя талой воды; Q_2 – на плавление льда; Q_3 – на прогрев льда впереди забоя от естественной температуры на данной глубине

скважины до температуры плавления; Q_4 – на радиальное рассеивание в окружающем ледяном массиве.

Предполагая малую толщину прослойки талой воды и в силу этого практически прямолинейное поперечное распределение температуры в ней, будем считать температуру вытесняемой с забоя воды средней арифметической между температурами рабочей поверхности термодолота и температурой агрегатного перехода. Массовый расход талой воды в единицу времени определяется площадью сечения пилотной скважины с учетом оплавления стенок, скоростью бурения и плотностью льда. Предположим, что толщина прослойки талой воды изменяется от нуля в нижней точке термодолота до 2δ у его верхнего нерабочего торца.

С учетом приведенных соображений для теплового потока на перегрев вытесняемой воды при установившемся режиме справедливо выражение

$$Q_1 = \frac{1}{2}\pi\left(R_1 + 2\delta\right)^2 c_в \rho_л \left(t - T_{агр}\right) v, \qquad (2)$$

где R_1 – максимальный радиус термодолота, м; δ – средняя толщина водяной прослойки, м; $c_в$ – удельная массовая теплоемкость воды при средней температуре, Дж/(кг·°С); $\rho_л$ – плотность льда, кг/м^3; t – средняя температура рабочей поверхности термодолота, °С; $T_{агр}$ – температура агрегатного перехода льда, °С; v – установившаяся скорость бурения, м/с.

Из тех же соображений тепловой поток на плавление льда можно выразить соотношением

$$Q_2 = \pi\left(R_1 + 2\delta\right)^2 \Psi \rho_л v, \qquad (3)$$

где Ψ – удельная теплота плавления (кристаллизации) льда, Дж/кг.

Тепловой поток, рассеивающийся в окружающем пилотное термодолото ледяном массиве, рассмотрим в соответствии с принципом элементарной суперпозиции раздельно для осевого и радиального направлений [7, 9], предварительно представив реальное термодолото в виде эквивалентного ему по объему цилиндра радиусом R_1 (рис.2). При этом примем, что в осевом направлении полезный тепловой поток на прогрев льда до температуры плавления распространяется по площади поперечного сечения пилотной скважины с учетом оплавления ее стенок $\pi(R + 2\delta)^2$, а бесполезный поток на рассеивание в радиальном направлении — по ее боковой поверхности площадью $2\pi(R + \delta)H_ц$, где $H_ц$ – высота эквивалентного цилиндра.

В работе [12] на основе теории движущегося теплового источника [13] показано, что тепловой поток на прогрев льда впереди забоя от его естественной на данной глубине температуры до температуры плавления может быть выражен зависимостью

$$Q_3 = \pi\left(R + 2\delta\right)^2 c_л \rho_л \left(T_{агр} - T_л\right) v, \qquad (4)$$

где $c_л$ – удельная массовая теплоемкость льда, Дж/(кг·°С); $T_л$ – естественная температура льда в массиве, °С.

В работе [7] подробно показано, что тепловой поток на рассеивание в ледяном массиве в радиальном направлении в соответствии с принципом элементарной суперпозиции может быть представлен выражением

$$Q_4 = 4\left(R + \delta\right)\sqrt{\pi \lambda_л c_л \rho_л H_ц v}\left(T_{агр} - T_л\right), \qquad (5)$$

где $\lambda_л$ – коэффициент теплопроводности льда, Вт/(м·°С).

Подставив в уравнение теплового баланса (1) выражение (2) для теплового потока на перегрев талой воды и решая его относительно средней температуры поверхности термодолота, получим уравнение

$$t = T_{агр} + \frac{2\left(N_1 - Q_2 - Q_3 - Q_4\right)}{\pi\left(R_1 + 2\delta\right)^2 c_в \rho_л v}, \qquad (6)$$

в правую часть которого входят неизвестные v и δ.

Для теплового потока от общей рабочей поверхности пилотного термодолота F_1, выделяемого в окружающий ледяной массив через прослойку талой воды средней толщиной δ, справедливо также выражение

$$Q = F_1 \frac{\lambda_в}{\delta}\left(t - T_{агр}\right), \tag{7}$$

где $\lambda_в$ – коэффициент теплопроводности воды при средней температуре, Вт/(м·°С); F_1 – общая площадь рабочей поверхности термодолота, м^2.

Выразив значение Q в виде суммы Q_2, Q_3, Q_4, подставив в (7) и решив относительно t, получим второе уравнение для средней температуры поверхности термодолота

$$t = T_{агр} + \frac{\delta\left(Q_2 + Q_3 + Q_4\right)}{\lambda_в F_1}. \tag{8}$$

Толщина прослойки воды между рабочей поверхностью термодолота и окружающим льдом определяется суммой гидродинамического и гидростатического давлений, испытываемых талой водой при вытеснении с забоя, и зависит от ее плотности и вязкости при средней температуре, от осевой нагрузки и скорости бурения плавлением.

Гидродинамическое и гидростатическое давления в прослойке воды в направлении от нижней точки термодолота к его верхнему торцу снижается, что в дифференциальной форме с учетом закона Дарси – Вейсбаха можно записать в виде

$$dp = -\lambda \frac{w^2 \rho_в}{2d_э} ds - g\rho_в dh, \tag{9}$$

где p – гидравлическое давление, Па; λ – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления; w – скорость движения вытесняемой воды, м/с; s – длина дуги профиля термодолота, м; $d_э$ – эквивалентный диаметр кольцевого канала, по которому движется талая вода, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2; $\rho_в$ – плотность воды, кг/м^3.

Переменная по высоте термодолота скорость движения воды определяется отношением ее объема W_1, образующегося в единицу времени, к площади сечения кольцевого канала на данной высоте f_1.

Поскольку объем воды, вытесняемой в единицу времени при погружении термодолота на определенную глубину, зависит от соотношения плотностей льда и воды, его приближенно можно выразить следующим образом:

$$W_1 = \pi r^2 \frac{\rho_л}{\rho_в} v. \tag{10}$$

Площадь кольцевого канала, через которую весь этот объем воды должен быть вытеснен в единицу времени при данном погружении термодолота, представим выражением

$$f_1 = 2\pi r\delta. \tag{11}$$

Оценка переменной скорости движения воды определяется из отношения выражения (10) к выражению (11):

$$w = \frac{v\rho_л}{2\delta\rho_в} r. \tag{12}$$

При условно принятой постоянной средней толщине водяной прослойки и установившемся режиме плавления эквивалентный диаметр кольцевого канала определяется как отношение его учетверенной площади к смоченному периметру [7] на любой высоте термодолота:

$$d_э = 2\delta . \qquad (13)$$

С помощью параметров цепной линии (7) и выражений (9), (10), (12), (13) преобразуем дифференциальное уравнение (9) к виду

$$dp = -\frac{\lambda v^2 \rho_л^2}{16\delta^3 \rho_в} r^2 \operatorname{ch}\frac{r}{b} dr - g\rho_в \operatorname{sh}\frac{r}{b} dr . \qquad (14)$$

Интегрируя левую часть уравнения (14) в пределах от p до нуля и правую – от $r = 0$ до R_1 (верхний торец), находим

$$p = \frac{\lambda v^2 \rho_л^2}{16\delta^3 \rho_в} b\left[\left(R_1^2 + 2b^2\right)\operatorname{sh}\frac{R_1}{b} - 2bR_1 \operatorname{ch}\frac{R_1}{b}\right] + gb\rho_в\left(\operatorname{ch}\frac{R_1}{b} - 1\right). \qquad (15)$$

Принимая в порядке первого приближения половинное значение p для некоторой средней толщины водяной прослойки δ, на основании выражения (15) получим

$$\delta = \frac{1}{2}\sqrt[3]{\frac{\lambda v^2 \rho_л^2 b\left[\left(R_1^2 + 2b^2\right)\operatorname{sh}\frac{R_1}{b} - 2bR_1 \operatorname{ch}\frac{R_1}{b}\right]}{2\rho_в\left[2p - g\rho_в b\left(\operatorname{ch}\frac{R_1}{b} - 1\right)\right]}}, \qquad (16)$$

где в правую часть входит неизвестная величина – скорость бурения плавлением v.

Имеем теперь три уравнения – (6), (8) и (16) с тремя неизвестными – v, t и δ. Приравняв выражения (6) и (8), раскроем входящие в них тепловые потоки с учетом (для пресного льда) $T_{агр} = 0$ °С и, решая относительно v, получим приближенное аналитическое выражение для скорости бурения льда пилотным термодолотом в виде трансцендентного уравнения, где δ выражается, в свою очередь, зависимостью (16)

$$v = \frac{2F_1\lambda_в}{\pi\left(R_1+2\delta\right)^2 c_в \rho_л \delta}\left[\frac{N_1}{\pi\left(R_1+2\delta\right)^2\left(\Psi - c_л T_л\right)\rho_л v - 4\left(R_1+\delta\right)T_л\sqrt{\pi\lambda_л c_л \rho_л H_ц v}} - 1\right]. \qquad (17)$$

Действуя аналогичным образом с применением тех же исходных допущений, рассмотрим теперь тепломассообменные процессы, определяющие работу опорной термокоронки в форме полого цилиндра высотой L, внешним радиусом R_2 и внутренним R_0 (см. рис.1). Цилиндр изготовлен из высокотеплопроводного материала. Верхний нерабочий торец и внутренняя поверхность теплоизолированы и в теплообмене не участвуют. Нижний рабочий торец опорной термокоронки имеет слабоконическую форму (конус с углом при вершине ~175°), а грань между рабочим торцом и внешней рабочей цилиндрической поверхностью закруглена, чем при математических построениях пренебрегаем.

Тепловой поток на перегрев талой воды в данном случае рассматривается с учетом полного ее расхода, т.е. включая воду, образовавшуюся за счет пилотной скважины, при этом пренебрегаем незначительным приростом температуры части талой воды, вытесненной из-под пилотного термодолота. Тепловой поток на плавление льда и его прогрев до температуры плавления распространяется только на опорную площадь термокоронки с учетом проплавления, т.е. на общую площадь сечения скважины за вычетом площади сечения пилотной скважины

При этом пренебрегаем также незначительным прогревом льда в стенках пилотной скважины в связи с кратковременностью процесса. Поскольку опорная термокоронка имеет цилиндрическую форму, в данном случае нет нужды применять суперпозицию. Для оценки средней толщины водяной прослойки между льдом и рабочими поверхностями опорной термокоронки учитываем только гидродинамические потери давления в горизонтальной щели под ее

рабочим торцом и гидродинамические потери в сочетании с гидростатическими в вертикальной кольцевой щели между боковой поверхностью термокоронки и стенками скважины.

В результате близких рассмотренным элементарных математических построений получаем два аналитических выражения: для средней толщины водяной прослойки, омывающей рабочие поверхности опорной термокоронки,

$$\Delta = \frac{1}{2}\sqrt[3]{\frac{\lambda v^2 \rho_л^2 \left(R_2^3 - R_1^3 + R_2^2 L\right)}{6\rho_в \left(2p_1 - g\rho_в L\right)}}, \qquad (18)$$

и для скорости бурения льда опорной термокоронкой в виде упрощенного трансцендентного уравнения

$$v = \frac{2F_2\lambda_в}{\pi\left(R_2 + 2\Delta\right)^2 c_в \rho_л \Delta}\left[\frac{N_2}{\pi\left(R_2^2 - R_1^2\right)\left(\Psi - c_л T_л\right)\rho_л v - 4\left(R_2 + \Delta\right)T_л\sqrt{\pi\lambda_л c_л \rho_л L v}} - 1\right]. \qquad (19)$$

В этих выражениях N_2, R_2, F_2 и L – соответственно мощность (Вт), внешний радиус (м), рабочая поверхность ($м^2$) и высота (м) опорной термокоронки; Δ – толщина водяной прослойки (м), омывающей термокоронку.

Полученные приближенные аналитические выражения (17) в сочетании с (16) и (19) в сочетании с (18) пригодны для расчетов, относящихся соответственно к пилотному термодолоту и опорной термокоронке в случае как их жесткого, так и скользящего соединения. В последнем случае скорость бурения пилотным долотом может быть выше, чем опорной термокоронкой, за счет как большей удельной тепловой мощности, так и большего удельного осевого давления, например, при подпружиненном скользящем соединении термодолота с опорной термокоронкой.

При жестком их соединении удельная осевая нагрузка будет в любом случае одинаковой, но при различии в удельной объемной мощности термодолота и термокоронки будут различны средние значения температуры их рабочих поверхностей и средние значения толщины окружающих водяных прослоек.

С помощью полученных приближенных аналитических выражений методом итераций (последовательных приближений) можно рассчитывать не только значения скорости бурения плавлением, средние значения температуры рабочей поверхности термодолота и термокоронки, толщины окружающих прослоек талой воды при установившемся процессе, но также конструктивные и режимные параметры. Для выполнения массовых расчетов и расчетного анализа необходима разработка программы для ЭВМ.

Приближенность полученных расчетных аналитических формул состоит в использовании при их выводе общепринятых в горной теплофизике допущений и упрощений, заключающихся, главным образом, в осреднении ряда исходных и аналитически определяемых параметров и показателей, а также в применении принципа элементарной суперпозиции. Поставленные и приближенно решенные здесь задачи могут быть аналитически рассмотрены более детально. Например, вместо сравнительно простых расчетных формул для средней температуры или средней толщины водяной прослойки могут быть получены существенно более сложные аналитические выражения для их распределения по рабочей поверхности. Однако многолетний опыт СПГГИ (ТУ) в области анализа, расчетов и разработок термобуровой техники, как и решения целого ряда других задач горной теплофизики [4], показывает отсутствие нужды в излишней детализации и сложных математических построениях, которые не только усложняют расчеты, но в большинстве случаев не дают преимуществ в смысле их точности, например, при оценке определяющих факторов процесса бурения плавлением. Кроме того, точная математическая постановка тепломассообменных задач, как правило, не дает возможности учесть одновременное влияние определяющих конструктивных и технологических параметров. Опыт показывает более важное влияние на точность расчетов достоверного определения параметров, входящих в приближенные расчетные формулы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Галяс А.А.* Основы термомеханического разрушения горных пород / А.А.Галяс, С.А.Полуянский. Киев: Наукова Думка, 1972. 270 с.

2. *Зотиков И.А.* Термическое бурение ледниковых покровов / И.А.Зотиков, А.П.Капица, Е.В.Кудрявцев, А.А.Суханов // Антарктика: Докл. комиссии АН СССР. М.: Наука, 1972. Вып.11. С. 141-156.

3. *Кудряшов Б.Б.* Анализ тепломассообмена при колонковом бурении скважин плавлением / Б.Б.Кудряшов, А.Н.Саламатин, В.К.Чистяков // Антарктика: Докл. комиссии АН СССР. М.: Наука, 1979. Вып.18. С. 106-112.

4. *Кудряшов Б.Б.* К методике приближенного решения некоторых задач горной теплофизики / Б.Б.Кудряшов, А.Н.Саламатин, В.А.Чугунов // Зап. ЛГИ, 1973. Том 66. Вып.1. С. 38-46.

5. *Кудряшов Б.Б.* Анализ и пути совершенствования процесса бурения-протаивания во льдах Антарктиды / Б.Б.Кудряшов, В.Ф.Фисенко // Труды Советской антарктической экспедиции. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. Том 60. С. 129-143.

6. *Кудряшов Б.Б.* К теории бурения-протаивания снежно-фирновых отложений и льдов Антарктиды / Б.Б.Кудряшов, В.Ф.Фисенко // Антарктика: Докл. комиссии АН СССР. М.: Наука, 1973. Вып.12. С. 153-158.

7. *Кудряшов Б.Б.* Бурение скважин в условиях изменения агрегатного состояния горных пород / Б.Б.Кудряшов, В.А.Чугунов, В.С.Литвиненко. Л.: Недра, 1991. 295 с.

8. *Кудряшов Б.Б.* Закономерности процесса глубокого теплового бурения скважин во льду / Б.Б.Кудряшов, А.М.Шкурко // Зап. ЛГИ. 1982. Том 93. С. 13-24.

9. *Пехович А.И.* Расчеты теплового режима твердых тел / А.И.Пехович, В.М.Жидких. Л.: Энергия, 1968. 304 с.

10. *Силин С.С.* Расчет температурных полей при термическом бурении ледяных пластов // ИФЖ. 1963. № 12. С. 8-12.

11. *Чистяков В.К.* Тепломассоперенос при контактном плавлении / В.К.Чистяков, А.Н.Саламатин, С.А.Фомин, В.А.Чугунов. Казан. ун-т. Казань, 1984. 176 с.

12. *Kudryashov B.B.* Drilling in the Permafrost / B.B.Kudryashov, A.M.Yakovlev. Oxonion Press, New-Delhi, India, 1990. 282 p.

13. *Rosenthal D.E.* The theory of moving sources of heat and application to metal treatments // Trans. ASME. 1946. № 68.