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

УДК 622.243.94

А.М.ШКУРКО
(Санкт-Петербургский горный ин-т)

БУРЕНИЕ СКВАЖИН ПЛАВЛЕНИЕМ - ОДИН ИЗ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ

Более 30 лет назад на международных конференциях было принято решение о проведении Международного геофизического года (МГГ). В рамках этого решения начали осуществляться согласованные между странами-участницами МГГ научные исследования Антарктиды. В первые же годы изучения шестого континента перед учеными-геологами, гляциологами, геохимиками, геофизиками, климатологами возникли задачи, без решения которых невозможно успешное изучение ледникового покрова Антарктиды. Остановимся лишь на тех из них, которые включают в себя наиболее важные и сложные аспекты:

стратиграфическое расчленение ледниковых отложений с выделением маркирующих горизонтов снежной, фирновой и ледяной толщ методами петрографии и плотностного анализа;

исследование закономерностей изменения физико-механических и петроструктурных характеристик льда по всей его мощности;

изучение особенностей строения и условий формирования ледника;

исследование характера и механики течения ледников;

исследование механизма перекристаллизации и рекристаллизации льда;

изучение подледного рельефа;

исследование взаимодействия между ледниковым покровом, атмосферой и подстилающим горным массивом;

определение относительного и абсолютного возраста ледяных пород и ледника различными методами [1, 2, 7].

Антарктический ледниковый покров является идеальной естественной моделью горного массива, сложенного породами, обладающими упруго-пластичными свойствами. Изучение его динамики может послужить основой проектирования горных предприятий разработки месторождений полезных ископаемых в породах с аналогичными свойствами (например, соляные купола). Мы привели далеко не полный перечень задач, решение которых возможно только с помощью бурения скважин изучения керна, полу в процессе бурения.

На основе исследований, проведенных в скважинах, пройденных специалистами разных стран на станциях «Восток», -1", вблизи от станции Кейси (Япония) и «Дюмон-д'Юрвиль" (Франция), «Берд" (США), получены данные о температуре льда, скорости его движения и деформации, которые легли в основу численного моделирования динамики гидродинамики Восточно-Антар

тического ледникового покрова и первых реконструкций изменения этого покрова на протяжении сотен тысяч лет [3].

Как показал накопленный опыт, наиболее эффективным методом проходки скважин в ледниковых покровах является метод бурения плавлением. Этим методом специалистами С-ПГИ в Антарктиде и на Северной Земле пройдено около 20 тыс.м скважин в ледниках.

Метод бурения плавлением помимо бурения ледниковых толщ может быть эффективно использован при бурении скважин в горных породах. Он дает ряд существенных преимуществ перед традиционными способами бурения:

одновременно с бурением происходит крепление слабосвязных и трещиноватых горных пород за счет остеклования стенок скважины остывающим расплавом, что устраняет необходимость в обсадных трубах и проведении трудоемких и дорогостоящих работ по обсадке или тампонажу скважин;

остеклование стенок керна позволяет обеспечить его сохранность в естественном состоянии, что весьма важно для изучения его физико-механических свойств, особенно при проведении инженерно-геологических изысканий;

возможность применения термобуровых снарядов на грузонесущем или шлангокабеле, что устраняет необходимость в бурильных трубах, трудоемких и длительных спуско-подъемных операциях, облегчает комплексную автоматизацию процесса бурения;

более широкое и эффективное применение методов геофизических исследований скважин и скважинной геофизики благодаря отсутствию экранирующего действия обсадных труб.

Помимо перечисленных преимуществ метод бурения скважин плавлением менее энергоемок, снаряды и буровые установки имеют небольшие габариты, массу применяемого оборудования и инструментов, что позволяет использовать его в условиях сурового климата, отдаленности и бездорожья, труднодоступных участках рельефа местности, при прокладке трубопроводов и кабелей под насыпными грунтами, забивке свай, креплении неустойчивых бортов карьеров и т.п.

Разработкой теоретических основ бурения методом плавления, технических средств и технологии на кафедре технологии и техники бурения скважин С-ПГИ занимаются с 1967 г. За истекший период разработаны теоретические основы бурения-плавления „сухих" и заполненных низкотемпературной жидкостью скважин в ледниковых отложениях с отбором керна; горных пород пенетратором [4, 5, 6, 11]. При анализе закономерностей теплообменных процессов, происходящих в призабойной зоне скважины, заполненной низкотемпературной жидкостью, использовались известные закономерности теории теплопередачи и гидродинамики, положения теории теплопроводности тел с рассредоточенными тепловыми источниками и современная теория ламинарного слоя, методы математического анализа (рис.I).

Исходя из теоретических результатов С.С.Силина [10], рассматривался установившийся процесс теплообмена при бурении-плавлении. С учетом симметричности кольцевого нагревателя решалась задача о продвижении фронта плавления в безграничной среде с постоянной скоростью v. Ось Z направлена

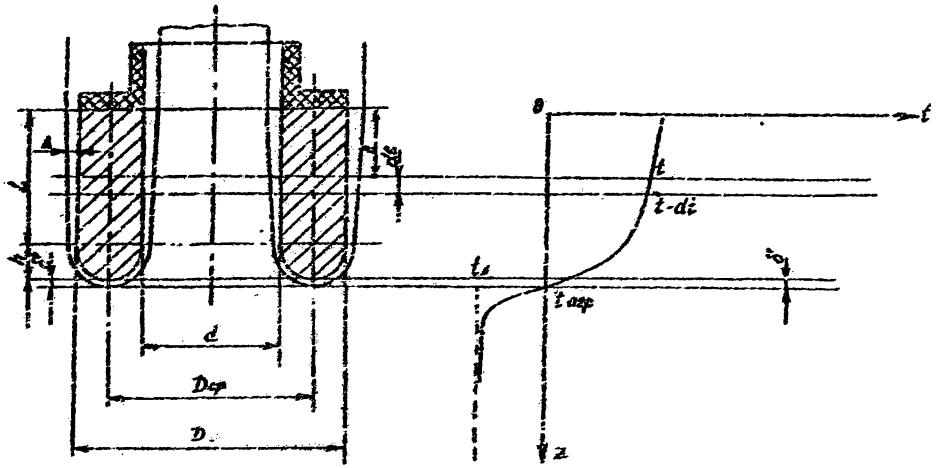


Рис.1. Схема к выводу исходных аналитических зависимостей

вдоль оси скважины в направлении к забою, начало координат совмещено с верхним торцом коронки-нагревателя (рис.1). Рабочий торец коронки-нагревателя взаимодействует с ледогны забоем через непрерывно образующуюся в процессе плавления водяную прослойку толщиной δ. Верхний торец коронки теплоизолирован и в теплообмене не участвует. Боковые поверхности взаимодействуют со стенками скважины через водяную прослойку Δ. Скважина заполнена низкотемпературной жидкостью, имеющей плотность $\rho_ж$.

Уравнение теплового баланса в призабойной зоне имеет следующий вид:

$$q_{об} = q_в + q_{пл} + q_п + q_с, \qquad (1)$$

где $q_{об}$ – суммарный тепловой поток поверхности коронки-нагревателя, Вт/м^2; $q_в$ – тепловой поток, затрачиваемый на нагрев воды в прослойке, Вт/м^2; $q_{пл}$ – тепловой поток, расходуемый на фазовый переход лед-вода, Вт/м^2; $q_п$ – тепловой поток на создание температурного поля впереди забоя, Вт/м^2; $q_с$ – тепловой поток на прогрев и плавление боковых стенок, Вт/м^2.

Тепловой поток, расходуемый непосредственно на углубку скважины,

$$q_э = q_{об} - q_с$$

или

$$q_э = \frac{N - Q_с}{F_э} = q_в + q_{пл} + q_п, \qquad (2)$$

где N – электрическая мощность, подводимая к коронке-нагревателю, Вт; $Q_с$ – количество тепла, затраченное на нагрев и плавление боковых стенок в единицу времени, Вт; $F_э$ – площадь поверхности параболической части нагревателя, м^2.

Решив интегральные уравнения теплового баланса с учетом условий гидродинамических и гидростатических процессов в призабойной зоне, получим

трансцендентное уравнение зависимости скорости бурения плавлением от теплофизических свойств льда и воды, материала коронки, конструктивных параметров коронки подводимой электрической мощности:

$$v = \frac{N - \frac{\lambda_в}{\Delta}\pi(D+d)\left[\frac{0{,}91MV^{4/3} - \frac{B}{A}}{\sqrt{A}}\,\mathrm{th}\sqrt{A}\,L + \frac{B}{A}L\right]}{F_э\rho_л\left[0{,}455MV^{4/3}c_в + \varphi - (t_0 + \sigma H)c_л\right]}, \qquad (3)$$

где

$$A = \frac{4\lambda_в}{\Delta\lambda_н(D-d)}; \quad B = \frac{4\lambda_в}{\Delta\lambda_н(D-d)}t_{агр} + \frac{q_V}{\lambda_н};$$

$$M = \frac{\rho_л}{\lambda^*_в}\left[\phi_л - (t_0 + \sigma H)c_л\right]\sqrt{\frac{2\nu\rho_в s(D-d)}{\frac{P_{сн} - \rho_ж g V_{сн}}{f_э} - \rho_в g(L+h)}}$$

$\lambda_в$ – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·°С); $F_э$ – площадь поверхности параболической части нагревателя, м^2; D – наружный диаметр нагревателя, м; d – внутренний диаметр нагревателя, м; $\lambda_н$ – коэффициент теплопроводности материала нагревателя, Вт/(м·°С); $c_в$ – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°С); $c_л$ – удельная теплоемкость льда, Дж/(кг·°С); t_0 – температура окружающей среды, °С; σ – геотермический градиент, °С/м; H – глубина скважины, м; $\rho_л$ – плотность льда, кг/м^3; $\lambda^*_в$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·°С); $\phi_л$ – скрытая теплота плавления льда, Дж/кг, ν – коэффициент кинематической вязкости, м^2/с; q_V – удельная объемная теплопроводность, Вт/м^3; L – высота цилиндрической части коронки, м; h – высота параболической части коронки, м; s – длина канала потока под торцом коронки-нагревателя, м; $\rho_в$ – плотность воды, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; $V_{сн}$ – объем термобурового снаряда, м^3; $P_{сн}$ – сила веса снаряда, Н; $f_э$ – площадь забоя скважины, м^2; $t_{агр}$ – температура агрегатного перехода, °С.

Решая уравнение теплового баланса аналогичным методом для бурения плавлением скважины сплошным забоем и принимая во внимание, что в качестве формы пенетратора принято тело вращения цепной линии вокруг ее вертикальной оси [6], получено следующее выражение для скорости бурения плавлением:

$$\frac{4Fa_ж}{\pi(R+2\delta)^2V}\left[\frac{N_a}{\pi(R+2\delta)^2(\phi + c_r\Delta T)\rho_r V + 4(R+2\delta)\Delta T\sqrt{\pi\lambda_r c_r\rho_r H_c V}} - 1\right] =$$

$$= \sqrt[3]{\frac{\lambda V^2\rho_ж b\left[(R^2+2b^2)\,\mathrm{sh}\frac{R}{b} - 2bR\,\mathrm{ch}\frac{R}{b}\right]}{2\left[2p - g\rho_ж b\left(\mathrm{ch}\frac{R}{b} - 1\right)\right]}} \qquad (4)$$

где F – общая рабочая поверхность пенетратора, м^2; $a_ж$ – коэффициент температуропроводности расплава, м^2/с; R – радиус верхнего торца пенетратора, м; N_a – активная мощность пенетратора, Вт; ϕ – удельная теп-

лота плавления порс ı, Дж/(кг·°С); ΔT – разность между температурой плавления и естественной температурой породы, °С; $\lambda_{,}$ – коэффициент теплопроводности породы, Вт/(м·°С); $\rho_{,}$ $\rho_{эк}$ – плотность породы и расплава соответственно, кг/м^3; H_c – высота эквивалентного цилиндра, м; λ – коэффициент гидравлического сопротивления при движении расплава; b – параметр цепной линии, м; p – удел ная осевая нагрузка, Па.

Уравнение (4) связывает между собой все основные определяющие процесс факторы: конструктивные параметры пенетратора, его мощность, осевую нагрузку на забой и теплофизические свойства пород и их расплавов.

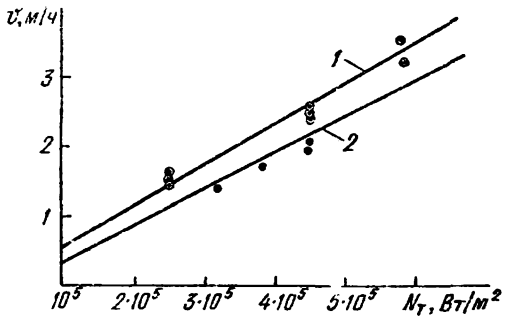


Рис.2. Расчетная зависимость и опытные точки скорости бурения плавлением от подводимой мощности при $t_л$ = -30 °С (1) и $t_л$ = -57 °С (2)

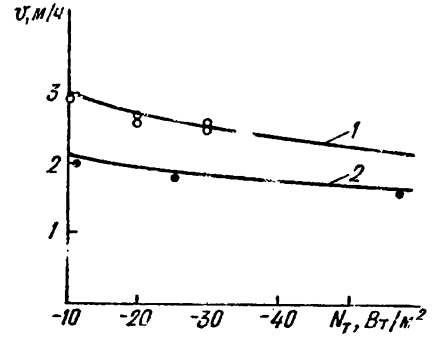


Рис.3. Расчетная зависимость и опытные точки скорости бурения плавлением от естественной температуры льда при N = 3500 Вт (1) и N = 2500 Вт (2)

Анализ полученных аналитических зависимостей показывает, что расчетные данные хорошо согласуются с данными, полученными в процессе проведения экспериментальных работ (рис.2 и 3).

На основе полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны и успешно используется целый ряд термобуровых снарядов для бурения как „сухих", так и заполненных низкотемпературной жидкостью скважин. Это термобуровые снаряды для бурения „сухих" скважин с отбором керна ТЭЛГА-I4 и ТЭЛГА-I52, снаряды для бурения залитых скважин ТБЗС-I52 и ТБС-II2ВЧ и ряд других снарядов [8, 9, II].

На станции „Восток" в I985 г. снарядами ТЭЛГА-I4, ТБЗС-I52, ТБС-II2ВЧ пробурена скважина в ледниках глубиной 2202 м. К апрелю I989 г. этими же снарядами пройдена вторая скважина в Антарктиде глубиной 2428 м. Это самая глубокая скважина, когда-либо пройденная о льдах.

В настоящее время данные типы термобуровых снарядов успешно используются для бурения скважин как в научных походах по маршруту „Мирный" – „Восток", так и в стационарных условиях станции „Восток". Очередная скважина к настоящему времени достигла глубины 2548 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Аверьянов В.Г. Применение новых методов в гляциологических исследованиях в Антарктиде // Труды ААНИИ. Т.294. Л.: Гидрометеоиздат, 1973.

2. Барков Н.И. Результаты исследования скважин и ледяного керна на станции Восток в 1970-1972 гг. // Материалы гляциологических исследований. М.: Наука, 1973. Вып.22.

3. Котляков В.М. Гляциология Антарктиды на рубеже 80-х годов XX века // Антарктика. М.: Наука, 1978. Вып.17.

4. Кудряшов Б.Б., Бобин Н.Е., Шкурко А.М. Основные направления совершенствования технологии и технических средств глубокого бурения в Антарктиде // Физические процессы горного производства: Всесоюзный межвуз.сб. / Ленинградский горный ин-т. Л., 1981. Вып.9.

5. Кудряшов Б.Б., Шкурко А.М. Закономерности процесса глубокого теплового бурения скважин во льду // Зап.ЛГИ. Т.93. Л., 1982.

6. Кудряшов Б.Б., Литвиненко В.С. Высокотемпературный пенетратор для бурения льдов и горных пород плавлением // Антарктика: Доклады комиссии АН СССР. М.: Наука, 1980. Вып.29.

7. Портнов В.Г. Строение ледникового покрова в районе станции Восток // Труды САЭ. Т.65. Л.: Гидрометеоиздат, 1975.

8. Особенности бурения-плавлением глубоких, залитых незамерзающей низкотемпературной жидкостью скважин в Центральных районах Антарктиды / Б.Б.Кудряшов, Н.Е.Бобин, В.К.Чистяков и др. // Физические процессы горного производства: Всесоюзный межвуз.сб. / Ленинградский горный ин-т. Л., 1983.

9. Опыт бурения-плавления скважин, залитых незамерзающей жидкостью в Антарктиде и в Арктике / Э.А.Загривный, А.А.Земцов, Ю.Б.Кононов и др. // Зап.ЛГИ. Т.96. Л., 1981.

10. Силин С.С. Расчет температурных полей при термическом бурении ледяных пластов // ПФТ. 1965. № 1.

11. Теория и практика бурения-плавления в Антарктиде / Б.Б.Кудряшов, Н.Г.Степанов, Н.И.Слюсарев и др. // Материалы гляциологических исследований. М.: Наука, 1973. Вып.22.