Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
т. XCIII, 1982 г.

УДК 622.245.3

БУРЕНИЕ-ПЛАВЛЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

В.К.ЧИСТЯКОВ

Новым перспективным направлением повышения эффективности проходки скважин в сложных геологических и горнотехнических условиях является разработка и совершенствование физических методов разрушения горных пород, одним из которых является плавление.

В основе технологии бурения скважин методом плавления лежат чисто физические процессы разрушения горных пород, связанные с изменением агрегатного состояния последних в результате интенсивного теплового воздействия в зоне забоя скважины. Эффективность процесса бурения-плавления определяется в основном температурой и теплофизическими свойствами проходимых пород, мало зависит от их механических свойств и целого ряда внешних факторов. Последнее обстоятельство определяет известную универсальность рассматриваемого метода бурения для большинства горных пород, представляющих собой, в общем случае, полиминеральные многокомпонентные системы, температурный интервал плавления которых находится в пределах 1200-1500 К при атмосферном давлении.

В отличие от механического способа бурения рассматриваемый метод с увеличением глубины скважин и, соответственно, с ростом температур проходимых пород повышает свою эффективность. Этот метод проходки скважин позволяет успешно решать задачу поддержания устойчивости и закрепления стенок скважины (также и керна) непосредственно в процессе бурения путем создания за счет застывающего расплава прочного водонепроницаемого стекловидного слоя. Так как для процесса бурения-плавления отпадает необходимость во вращательном или колебательном движениях бурового инструмента, существенно снижаются потери энергии при передаче ее к забою, появляется возможность намного точнее выдерживать заданное направление скважины.

Отличительными особенностями технологии бурения плавлением является высокая концентрация в зоне забоя скважины тепловой энергии, эффективная передача ее породам с целью обеспечения заданной скорости рас-

плавления, выдавливание расплава из зоны плавления, формирование на стенках скважины монолитного и прочного остеклованного слоя, удаление оставшегося расплава из скважины на поверхность или в специальный шламосборник циркуляционной средой.

В качестве рабочего органа буровых снарядов для плавления скважин в горных породах могут быть использованы различные нагревательные устройства, работающие при температурах, на 100–300 градусов превышающих температуру плавления пород и позволяющие реализовать в зоне забоя скважины мощность до нескольких десятков киловатт. Это, прежде всего, разнообразные электрические нагреватели из тугоплавких металлов или керамических материалов. Возможно применение нагревателей с химическими или ядерными источниками энергии, а также использование тепловых труб с высокотемпературными металлическими теплоносителями.

По буримости методом плавления все горные породы можно разбить на низкотемпературные (лед, сера, каменная соль) и высокотемпературные (гранит); плотные (диабаз) и пористые (туф); скальные и рыхлые (мерзлые и талые). Отдельно могут быть выделены малоэффективные для бурения-плавления породы, при нагреве которых выделяются газообразные и тугоплавкие элементы (известняк, доломит).

В зависимости от способа удаления расплава из зоны забоя разнообразные конструкции буровых устройств для плавления скважин могут быть разделены на два основных типа: уплотняющие, для плавления в пористых породах; экструзионные (выдавливающие) для плавления в плотных породах.

Уплотняющие буровые устройства, расплавляя пористые породы или грунты, обеспечивают затвердевание всего расплава в остеклованном слое на стенках скважины (керна). При этом возникает необходимость проплавления скважины до диаметра $D_{скв}$, превышающего на определенную величину наружный диаметр рабочего органа бурового устройства – нагревателя $D_{наг}$. Относительная величина этого превышения может быть определена из следующего соотношения:

$$K = \frac{D_{скв}}{D_{наг}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \rho_п / \rho_{сл}}}, \qquad (I)$$

где $\rho_п$ – плотность пористой породы; $\rho_{сл}$ – плотность остеклованного слоя.

Нагреватель обеспечивает эффективную передачу тепла породам забоя с минимальными температурными градиентами вдоль вертикальной оси. Корпус нагревателя изготовляется из тугоплавкого и теплопроводного материала, способного при высоких температурах выдерживать возникающие напряжения от механических и тепловых нагрузок. Верхняя часть нагревателя должна иметь цилиндрическую форму и работать в температурном режиме, обеспечивающем эффективное охлаждение расплава и формирование из него остеклованного слоя на стенках скважины.

Превращая часть образующегося расплава в затвердевший остеклованный слой на стенках скважины, экструзионные, или выдавливающие, буровые

устройства предусматривают выдавливание оставшейся части расплава через кольцевой зазор или специальные отверстия в рабочей поверхности нагревателя с последующим его охлаждением и застыванием в потоке циркуляционной охлаждающей среды в виде стекловидных шариков, хлопьев или волокон, которые выносятся на поверхность или собираются в специальном скважинном шламосборнике.

Для бурения-плавления с отбором керна могут применяться специальные колонковые буровые снаряды как уплотняющего, так и выдавливающего типов, конструкция которых характеризуется наличием кольцевого нагревателя, керноприемной трубы и системы охлаждения, обеспечивающей затвердевание расплава как на стенках скважины, так и на поверхности керна.

В настоящее время метод бурения плавлением широко применяется при проходке скважин в снего-фирновых и ледовых отложениях, тысячеметровые толщи которых слагают такие гигантские материковые покровы, как Антарктический и Гренландский [2]. В последние годы в научно-исследовательской лаборатории Лос-Аламоса (США) [7] этот метод интенсивно разрабатывается для проходки вертикальных и горизонтальных скважин в твердых скальных породах и в слабосвязанных неустойчивых влагонасыщенных рыхлых отложениях.

В результате уже выполненных исследований сконструированы, изготовлены и испытаны буровые снаряды для плавления трех основных модификаций: уплотняющие, выдавливающие и колонковые с использованием в качестве нагревательного устройства излучателя из пиролитического графита, работающего в среде инертного газа.

Проведение эффективных исследований в направлении разработки и совершенствования технологии и технических средств бурения скважин методом плавления, определения области его рационального применения требует, прежде всего, рассмотрения в качестве первоочередной задачи теоретических вопросов, связанных с изучением тепломассопереноса в зоне забоя и динамики фазовых переходов в породах, с целью определения основных параметров процесса и их взаимосвязи между собой. То обстоятельство, что температурные поля в нагревательном буровом устройстве и окружающем его горном массиве связаны друг с другом посредством конвективного теплообмена в слое расплава, движущегося между рабочей поверхностью нагревателя и поверхностью плавления забоя, в значительной мере осложняет исследование происходящих явлений, затрудняет выбор оптимальных режимов бурения и обоснование эффективных конструктивных решений нагревательных буровых устройств.

Вопросы математического описания и численного исследования процессов тепломассопереноса, происходящих при контактном плавлении твердых тел, уже рассматривались [3-6]. В качестве математической модели процесса бурения плавлением исследовалась задача о распределении температуры в горном массиве, ограниченном поверхностью плавления забоя скважины при установившемся режиме, характеризующемся постоянной скоростью перемещения V бурового устройства с нагревателем мощностью N под действием собственного веса G. При этом предполагалось, что поверхность нагрева-

теля непроницаема, а толщина слоя расплава на забое мала по сравнению с характерным размером нагревателя l (толщина кольца или диаметр). Основу математической модели составила система двух дифференциальных уравнений первого порядка: уравнения теплового баланса на поверхности плавления забоя и уравнения, описывающего распределение температуры в горном массиве, окружающем нагреватель в процессе бурения-плавления.

Если рабочая поверхность нагревателя имеет форму поверхности вращения с образующей S, то основные параметры процесса бурения-плавления будут связаны с температурным полем пород в зоне забоя следующими соотношениями:

$$\bar{G} = 6\pi \mathrm{Pr} \int_S \left\{ \bar{R} \left[\mathrm{Kr} \frac{d\bar{R}}{dS} + \frac{1}{8} \frac{d(\bar{R},\theta)}{dS} + K_\lambda \bar{q} \right] \theta^{-1} \right\}^3 dS, \qquad (2)$$

$$\bar{N} = \mathrm{Kr} + 0{,}5\theta(S_0) + 2 \int_S \bar{R}\bar{q}\, dS. \qquad (3)$$

Уравнения (2) и (3) записаны в безразмерной форме. В них

$$\bar{G} = \frac{G a_ж^2 \rho_ж}{V^4 l^4 \rho_т^2}, \quad \bar{N} = \frac{N a_ж \rho_ж}{V l^2 \rho_т \lambda_т (t_{пл} - t_0)}, \quad \theta = \frac{t_п - t_{пл}}{t_{пл} - t_0}, \quad \bar{R} = \frac{R}{l},$$

$$\bar{q} = \frac{q a_ж \rho_ж}{V \rho_т \lambda_т (t_{пл} - t_0)}, \quad \mathrm{Pr} = \frac{\mu_ж C_ж}{\lambda_ж}, \quad \mathrm{Kr} = \frac{r}{C_ж (t_{пл} - t_0)}, \quad K_\lambda = \frac{\lambda_т}{\lambda_ж};$$

r – скрытая теплота плавления; $t_{пл}$ и t_0 – соответственно температура плавления и невозмущенная температура горного массива; q – плотность теплового потока, поступающего в горный массив; ρ – плотность; μ – вязкость; C – удельная теплоемкость; λ и a – коэффициенты тепло- и температуропроводности; S_0 – верхняя, конечная точка образующей S; R – расстояние от оси симметрии нагревателя; индексы „т" и „ж" соответствуют твердой и жидкой фазам.

Распределение приведенной плотности теплового потока q на поверхности плавления при фиксированных V и S однозначно определяется из решения вспомогательной задачи [6]. В результате при заданной массе бурового устройства G может быть сформулирована оптимизационная задача нахождения такого распределения θ, при котором потребляемая мощность N была бы минимальной.

Непосредственно из физического смысла этой задачи следует, что при прочих равных условиях оптимальное значение N будет тем меньше, чем больше G. Последнее позволяет доказать эквивалентность сформулированной выше оптимизационной задачи задаче минимизации интеграла веса (2) при заданном значении N, что в силу равенства (3) равносильно заданию значения θ в точке S_0. В общей постановке такая задача может быть решена методами классического вариационного исчисления [1] и сведена к интегрированию дифференциального уравнения Эйлера второго порядка, соответствующего функционалу (2).

Однако некоторые качественные выводы следуют непосредственно из вида подынтегрального выражения в (2). Действительно, если в силу конструктивных особенностей нагревателя бурового устройства температура его рабочей поверхности не убывает вдоль образующей при движении снизу вверх к точке S_0, то непосредственной проверкой нетрудно убедиться, что оптимальной является изотермическая коронка: $\theta = \theta(S_0)$. При других ограничениях на класс функций, в котором ищется решение оптимизационной задачи, оптимальное распределение θ может быть далеко не тривиальным.

Исследования и разработки, выполненные на кафедре техники и технологии бурения скважин ЛПИ, по созданию и совершенствованию технических средств и технологических приемов теплового способа бурения-плавления скважин в низкотемпературных ледовых толщах Арктики и Антарктики, достигнутые в этом направлении теоретические и практические результаты могут быть использованы в качестве первого шага в организации и проведении новых исследований по изучению сложных тепловых процессов, сопровождающих бурение скважин методом плавления проходимых пород.

Предварительный анализ позволяет считать рассматриваемый метод перспективным для следующих целей и условий бурения:

1) бурение неглубоких скважин в твердых скальных и рыхлых слабосцементированных отложениях;

2) проходка интервалов, сложенных склонными к пучению сланцами, зон интенсивного поглощения промывочной жидкости, пластов с низким давлением;

3) колонковое разведочное бурение в слабосвязных и несвязных сухих и обводненных горных породах и отложениях;

4) проходка скважин в многолетнемерзлых породах для геологических и инженерных целей;

5) бурение скважин в снежно-фирновых и ледовых отложениях;

6) проходка скважин в осадочных толщах прибрежной и шельфовой зон;

7) сверхглубокое бурение скважин как сплошным забоем, так и с отбором высококачественного керна;

8) направленное бурение скважин в сложных горнотехнических условиях;

9) бурение горизонтальных скважин для сооружения подземных городских коммуникаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд И.М., Фомин С.В. Вариационное исследование. М., Физматгиз, 1961.

2. Кудряшов Б.Б., Чистяков В.К., Бобин Н.Е. Бурение скважин в Антарктиде. М., изд. ОНТИ ВИЭМС, 1977.

3. Пудовкин М.А., Саламатин А.Н., Фомин С.А. и др. О влиянии формы рабочей поверхности термобура на показатели бурения льда протаиванием. – В кн.: Исследования по прикладной математике. Вып. 7, Изд-во Казанского ун-та, 1979.

4. Чистяков В.К., Соловьев Г.Н., Фомин С.А. Исследование влияния формы поверхности нагревателя на скорость бурения-плавления горных пород. - В кн.: Физические процессы горного производства. Межвуз. сб. Л., изд. ЛГИ, 1978, вып. 5.

5. Чистяков В.К., Чугунов В.А. Исследование процесса бурения методом плавления горных пород. - В кн.: Физические процессы горного производства. Межвуз. сб., Л., изд. ЛГИ, 1977, вып. 4.

6. Шульман З.П. Конвективный тепломассоперенос реологически сложенных жидкостей. М., Энергия, 1978.

7. S i m s D.L. - Petr. eng., 1974, July.