Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVI, вып. 1, 1973 г.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ТЕПЛА ЗЕМЛИ — НОВАЯ ОБЛАСТЬ БУРОВЫХ РАБОТ

Ю. М. Парийский

Современный научно-технический прогресс требует все более полного освоения природных ресурсов. Наряду с использованием других видов энергии и топлива важный энергетический резерв представляют геотермические ресурсы, т. е. теплосодержание земной коры. Необходимые предпосылки для широкого практического освоения этих ресурсов создает развитие техники и технологии бурения скважин, способствующее изучению все более глубоких горизонтов земной коры и накоплению фактического материала по геотермии.

Практически осваивается лишь незначительная доля геотермических ресурсов, представленная наиболее доступными источниками подземного тепла в виде термальных вод, пара и паро-водяных смесей. В разведке и эксплуатации этих специфических видов полезных ископаемых бурение скважин играет роль основного технического средства. Однако современная технология бурения скважин позволяет существенно расширить возможности и масштабы освоения глубинного тепла Земли. Теплосодержание твердой фазы земной коры — горных пород в ее верхних слоях — на несколько порядков превосходит не только запасы пароги дротерм, но и теплотворную способность мировых запасов всех видов горючих ископаемых вместе взятых. В силу повсеместной распространенности этого вида тепла источник тепловой энергии может быть создан в любом районе, где в этом есть необходимость и экономическая целесообразность.

Наиболее важно использовать тепло Земли в районах Крайнего Севера, отличающихся острым дефицитом тепла и высокой стоимостью топлива. В районах Севера и особенно Северо-Востока СССР (Магаданская область, Якутская АССР и др.) значительную потребность в тепле испытывают предприятия горнодобывающей промышленности. Использование дешевого тепла в таких характерных для этих предприятий технологических процессах, как оттайка мерзлых пород, промывка золотоносных песков, способствовало бы значительному повышению эффективности горного производства в этих районах.

Исследование способов извлечения тепла, аккумулированного горными породами, осуществляется в ЛГИ совместно с рядом других научных учреждений. Предложены два типа циркуляционных систем

извлечения тепла Земли — с продольными и объемными зонами фильтрации [1].

Наиболее сложным характером буровых работ отличается сооружение систем с продольными зонами фильтрации (рис. 1). В этом случае нагнетательную *1* и эксплуатационную *4* скважины, отстоящие друг от друга на 500—600 *м*, проходят с применением методов наклонно-направленного многозабойного бурения. Искривленные интервалы отклоняются от основных стволов скважин по пересекающимся азимутальным направлениям так, чтобы забои сопряженных ветвей оказались сближенными до 10—12 *м*. Это необходимо для создания гидравлической связи между ними с помощью взрывных работ (соединительная зона дробления *5*) или гидроразмыва пласта.

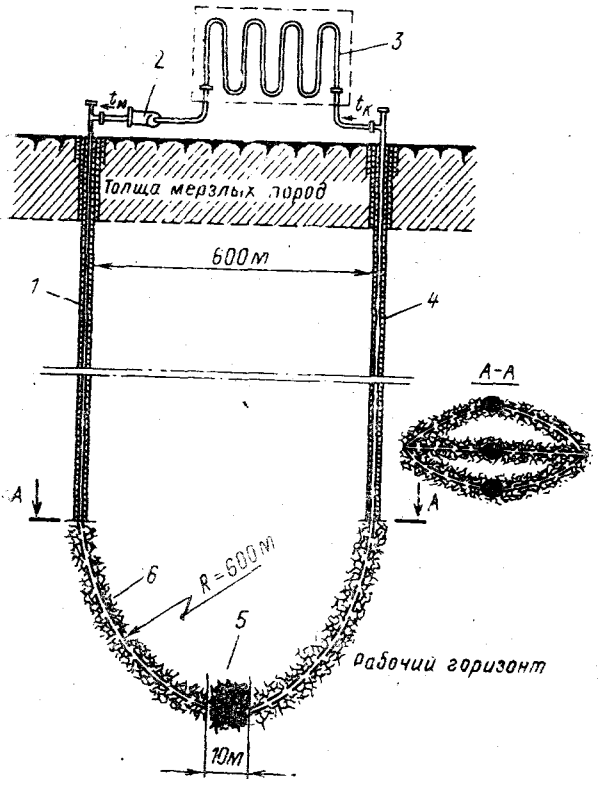


Рис. 1. Принципиальная схема циркуляционной системы извлечения тепла Земли с продольными зонами фильтрации

Искривленные интервалы могут буриться в один или два яруса по глубине, в каждом из которых располагается до трех ветвей. Для повышения интенсивности теплообмена искривленные интервалы торпедируются взрыванием скважинных зарядов ВВ. Зона разрушения *6*, созданная таким образом в непроницаемом или слабопроницаемом массиве горных пород в пределах рабочего горизонта системы, представляет собой искусственную проницаемую зону, в которой происходит фильтрация нагнетаемой насосом *2* с поверхности холодной воды и ее нагревание, главным образом в результате кондуктивного переноса тепла из ненарушенного массива. Нагретая вода по эксплуатационной скважине *4* поступает в теплообменник потребителя *3*.

Сооружение систем извлечения тепла Земли с объемными зонами фильтрации потребует бурения одной или нескольких зарядных скважин увеличенного диаметра для спуска мощных зарядов взрывчатых веществ, с помощью которых должна быть создана зона разрушения большого объема в массиве горных пород рабочего горизонта (подземный тепловой котел). Нагревание холодной воды, подаваемой в котел с поверхности через нагнетательные скважины, будет в этом случае происходить главным образом в результате теплообмена с разрушенными по-

родами в пределах теплового котла в процессе фильтрации воды по трещинам. Сокращать объем буровых работ в некоторых вариантах подобного рода систем можно также, применяя наклонно-направленное многозабойное бурение, особенно для проходки эксплуатационных скважин.

Бурение глубоких скважин с целью извлечения тепла, аккумулированного горными породами, обладает рядом особенностей, вытекающих из специфического назначения скважин и условий их проходки. Наибольший интерес представляет анализ этих особенностей в условиях северных и северо-восточных районов СССР — очень перспективных для практического использования тепла Земли. Недостаточная изученность геологического строения, суровые природные условия, удаленность от промышленных центров и баз снабжения, отсутствие развитой транспортной сети — все это создает трудности проходки глубоких скважин в этих районах и вызывает увеличение затрат. Практически во всех случаях верхние интервалы скважин будут пересекать толщу мерзлых пород, которая в некоторых районах достигает 500 *м*. Об этих особенностях нельзя забывать при разработке конструкции скважин, выборе способов и технических средств бурения, планировании его технико-экономических показателей.

Предварительные расчеты показывают, что на современном этапе экономически целесообразно создание систем извлечения тепла Земли при глубине скважин в 2—4 тыс. *м*. При обосновании диаметра этих скважин необходимо учитывать размеры взрывных устройств, спускаемых в нижние интервалы скважин, изменяющиеся в зависимости от принятого варианта системы извлечения тепла. Диаметр скважин определит также величину гидравлических сопротивлений при циркуляции теплоносителя и, следовательно, затраты энергии на привод насосной установки. С другой стороны, с изменением диаметра будут меняться и затраты на бурение скважин, определяющие величину необходимых капиталовложений на сооружение системы. Очевидно, что оптимальный диаметр может быть определен лишь путем минимизации приведенных затрат на извлечение единицы тепловой энергии (например, 1 *Гкал*).

С учетом сказанного для скважин в системах с продольными зонами фильтрации, а также нагнетательных и эксплуатационных скважин в системах с объемными зонами фильтрации оптимальный конечный диаметр бурения в зависимости от расхода теплоносителя изменяется в диапазоне 150—214 *мм*. В случае если для создания продольных зон фильтрации используются стандартные торпеды, применяемые в нефтяной промышленности и имеющие диаметр 150 *мм*, конечный диаметр скважин в этих системах должен быть не менее 190 *мм*. При недостаточной изученности условий бурения в предполагаемых районах сооружения систем необходимо рассчитывать на умеренные скорости проходки скважин и учитывать возможность осложнений при длительном воздействии бурильного инструмента и промывочной жидкости на незакрепленные интервалы скважин. В этих условиях использование одной или двух промежуточных обсадных колонн может оказаться необходимым. Глубина спуска кондуктора определится необходимостью крепления толщи мерзлых пород и неустойчивых подмерзлотных интервалов. Для предотвращения утечек воды в период эксплуатации в скважину после окончания бурения должна быть спущена эксплуатационная колонна или хвостовик. Изоляция скважин требует цементирования обсадных колонн на всю глубину. Необсаженными должны быть оставлены лишь искривленные интервалы, в которых будут производиться взрывные работы.

Расположение скважин в зоне многолетней мерзлоты создает определенные трудности, связанные с цементированием и теплоизоляцией кондукторов. Потребуются специальные, схватывающиеся при отрицательных температурах тампонажные смеси, разработке которых уделяют сейчас большое внимание при цементировании нефтяных и газовых скважин в мерзлых породах. Для теплоизоляции кондукторов с целью сокращения тепловых потерь и предотвращения растепления верхних интервалов скважин наиболее эффективно использовать пенопласты, обладающие низкой теплопроводностью, типа пенополиуретана или пенофенопласта: пенофенопласт — в качестве заполнителя кольцевого зазора между кондуктором и промежуточной колонной, пенополиуретан — для создания теплоизоляционного покрытия на внутренней поверхности обсадной колонны методом напыления.

Поскольку во многих вариантах циркуляционных систем предусматривается бурение наклонно-направленных и многозабойных скважин, анализ особенностей наклонно-направленного бурения применительно к этим условиям представляет особый интерес.

Весьма важным вопросом, в значительной мере определяющим эффективность наклонно-направленного бурения, является выбор рационального профиля скважины в зависимости от характеристики разреза, метода бурения, назначения скважины и технических возможностей. Основной критерий для выбора рационального профиля скважины — снижение затрат времени и средств на проходку скважины при обязательном выполнении ею своего производственного назначения. Поскольку в системах с продольными зонами фильтрации особое значение имеет точность контроля пространственного положения скважины, это обстоятельство необходимо учитывать при выборе профиля.

Теплопроизводительность таких систем, как показывают расчеты, при заданной глубине скважин зависит от суммарной длины продольных зон фильтрации, находящихся на рабочем горизонте системы, что определяет схему пространственного расположения дополнительных стволов и величину смещения их забоев относительно устья скважин. В зависимости от суммарной длины зон фильтрации и геологических условий района сооружения систем их конструктивные схемы могут быть построены на основе двух типовых профилей многоствольных скважин — веерообразного и перистого типов (рис. 2). В первом случае дополнительные стволы отклоняются от основного в разных азимутальных направлениях, располагаясь при этом на одном ярусе по глубине (рис. 2, *а*). Во втором случае они бурятся в одном азимутальном направлении, но располагаются в несколько ярусов по глубине. Возможна и комбинация этих двух профилей, когда дополнительные стволы располагаются в каждом из нескольких ярусов в разных азимутальных направлениях (рис. 2, *б*). Проектирование профилей многоствольных скважин в данном случае характеризуется рядом особенностей. Длина дополнительных стволов в пределах рабочего горизонта системы должна быть возможно большей, так как она определяет теплопроизводительность системы. Поскольку дополнительные стволы, бурящиеся от нагнетательной и эксплуатационной скважин, должны быть сопряженными, отклонения забоев от устья в разных азимутальных направлениях должны быть связаны следующим соотношением:

$$S_0 = S_\alpha \cos\alpha, \qquad (1)$$

где S_0 — отклонение забоя от устья в нагнетательной или эксплуатационной скважине в вертикальной плоскости, проходящей через их устья (плоскость «базисного» азимута); S_α — то же в плоскости, проходящей под углом α к базисной (см. рис. 2).

Дополнительные стволы могут бурить с постоянной или переменной кривизной. При этом кривизна стволов должна выбираться с учетом условий работы колонны бурильных труб и технических возможностей набора кривизны на том или ином интервале. При турбинном бурении наибольшая интенсивность искривления, достигаемая с помощью искривленных секционных турбобуров, составляет 1—1,2° на 10 *м* проходки, что соответствует минимальному радиусу искривления около 600 *м*. Весьма существенное значение имеет также конечная величина зенитного угла искривленного интервала скважины, с увеличением которого уменьшается осевая нагрузка на долото, а следовательно, и скорость бурения.

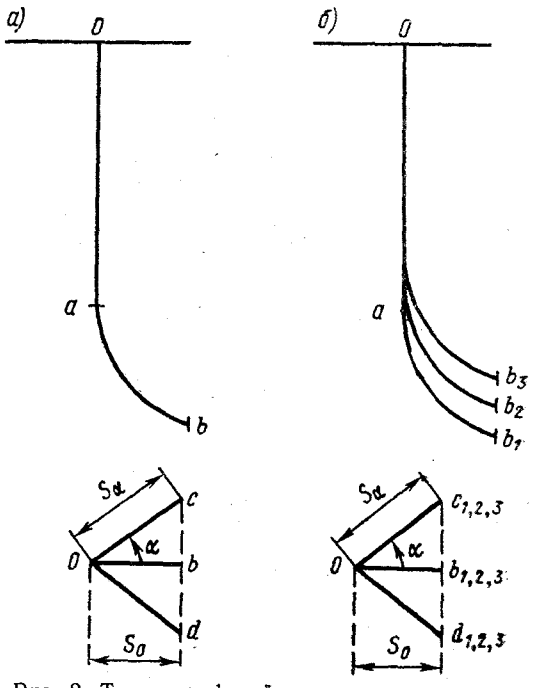


Рис. 2. Типы профилей многоствольных скважин для систем с продольными зонами фильтрации: *а* — веерообразного типа; *б*) комбинированного перисто-веерообразного типа
Oa—основной ствол; *ab*—дополнительный ствол; *Ob*—направление дополнительного ствола и плоскости „базисного" азимута; *Oc*, *Od* — азимутальные направления дополнительных стволов в других плоскостях

Известно, что для трехинтервального профиля, состоящего из вертикального участка, участка набора кривизны с постоянным радиусом искривления и наклонного прямолинейного участка, фактическая нагрузка на долото может быть рассчитана по приведенному в работе [2] соотношению

$$P=k_1 P_0+k_2 qk+k_3 q l_{\text{пр}}, \qquad (2)$$

где

$$k_1=e^{-\mu\upsilon_2}; \quad k_2=\sin(\vartheta_2+2\rho)-\sin 2\rho\, k_1;$$

$$k_3=\cos\vartheta_{\text{п}}-\mu\sin\vartheta_{\text{п}}; \quad \vartheta_2=\vartheta_3-\vartheta_1;$$

ϑ_1 и ϑ_3 — зенитный угол скважины соответственно в начале и в конце участка набора кривизны; $\vartheta_{\text{п}}$ — зенитный угол прямолинейного участка скважины; $\mu=\text{tg}\rho$ — коэффициент трения стали о породу; P_0 — нагрузка на долото в вертикальной скважине, *кг*; q — вес 1 *м* бурильных труб, *кг/м*; $l_{\text{пр}}$ — длина наклонного прямолинейного участка скважины; *м*.

Зависимость нагрузки на долото от характера профиля скважины требует определения максимальной допустимой величины зенитного угла искривленных интервалов скважин с учетом геологических и экономических соображений.

Дополнительные стволы нагнетательных и эксплуатационных скважин при заданной величине конечного зенитного угла могут проектироваться по одному из трех типов профилей, указанных на рис. 3. Профиль *1* с постоянным радиусом искривления отличается наименьшей длиной искривленного интервала, но дополнительный ствол целиком располагается в пределах рабочего горизонта системы. Если геологические условия позволяют оставлять скважины за пределами рабочего горизонта незакрепленными, дополнительные стволы могут бриться по профилям *2* и *3*. Из них наибольшей рабочей длиной ствола обладает профиль *3*, характеризующийся прямолинейным наклонным участком, расположенным в пределах рабочего горизонта. В зависимости от наклона этого участка будет меняться величина осевой нагрузки, которая может оказаться меньше, чем в случае бурения по профилю *2*. Окончательный выбор профиля может быть сделан поэтому лишь на основе технико-экономических расчетов, включающих определение приведенных затрат на извлечение 1 *Гкал* тепла.

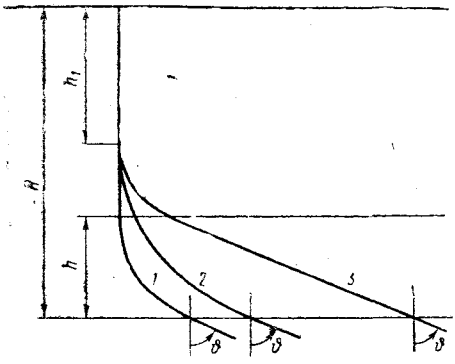


Рис. 3. Типы профилей дополнительных многоствольных скважин

Для проектирования профилей дополнительных стволов могут быть использованы следующие зависимости. При заданной мощности рабочего горизонта h и конечной величине зенитного угла ϑ рабочая длина дополнительных стволов составит

для профиля *1*

$$l_1=\frac{2\pi h\vartheta}{360\cdot\sin\vartheta}\ ; \tag{3}$$

для профиля *2*

$$l_2=\frac{2\pi(H-h_1)(\vartheta-\vartheta_н)}{360\cdot\sin\vartheta}\ ; \tag{4}$$

для профиля *3*

$$l_3=\frac{h}{\cos\vartheta}\ , \tag{5}$$

где H — вертикальная глубина скважины, *м*; h_1 — глубина заложения дополнительного ствола, *м*; $\vartheta_н$ — значение зенитного угла на кровле рабочего горизонта, *град*.

Угол $\vartheta_н$ находится из соотношения

$$\sin\vartheta_н=\left(1-\frac{h}{H-h_1}\right)\sin\vartheta\ . \tag{6}$$

Радиусы искривления для указанных профилей будут соответственно равны

$$R_1=\frac{h}{\sin\vartheta}\ ; \tag{7}$$

$$R_2=\frac{H-h_1}{\sin\vartheta}\ ; \tag{8}$$

$$R_3=\frac{H-(h_1+h)}{\sin\vartheta}=R_2-R_1. \tag{9}$$

Горизонтальные смещения забоев (отклонения от устья) определяются следующими зависимостями:

$$S_1=R_1(1-\cos\vartheta)=h\,\mathrm{tg}\,\frac{\vartheta}{2}\ ; \tag{10}$$

$$S_2=R_2\,(1-\cos\vartheta)=(H-h_1)\,\mathrm{tg}\,\frac{\vartheta}{2}\ ; \tag{11}$$

$$S_3=R_3\,(1-\cos\vartheta)+h\,\mathrm{tg}\,\vartheta=[H-(h_1+h)]\mathrm{tg}\frac{\vartheta}{2}+h\,\mathrm{tg}\,\vartheta. \tag{12}$$

При расположении дополнительных стволов в различных азимутальных направлениях проектирование их профилей должно учитывать условие сопряженности (1). С учетом этого азимутальное отклонение от плоскости «базисного» азимута должно выбираться по соотношениям:

для профиля *1*

$$\cos\alpha=\frac{h_0\,\mathrm{tg}\,\frac{\vartheta_0}{2}}{h_\alpha\,\mathrm{tg}\,\frac{\vartheta_\alpha}{2}}\ ; \tag{13}$$

для профиля *2*

$$\cos\alpha=\frac{(H-h_1)\,\mathrm{tg}\,\frac{\vartheta_0}{2}}{(H-h_2)\,\mathrm{tg}\,\frac{\vartheta_\alpha}{2}}\ ; \tag{14}$$

для профиля *3*

$$\cos\alpha=\frac{[H-(h_1+h)]\,\mathrm{tg}\,\frac{\vartheta_0}{2}+h\,\mathrm{tg}\,\vartheta_0}{[H-(h_2+h)]\,\mathrm{tg}\,\frac{\vartheta_\alpha}{2}+h\,\mathrm{tg}\,\vartheta_\alpha}\ , \tag{15}$$

где h_0, h_α — высота зарезки дополнительных стволов, измеряемая от забоя, в плоскости «базисного» и иного азимута соответственно, *м*; ϑ_0 и ϑ_α — конечная величина зенитного угла соответственно в плоскости «базисного» азимута и в плоскости, расположенной под углом α к базисной, *град*; h_2 — глубина заложения дополнительного ствола (измеряемая от поверхности) в плоскости, расположенной под углом α к «базисной», *м*.

С учетом сказанного максимальные значения конечных зенитных углов и длины рабочей части дополнительных стволов должны проектироваться для тех стволов, которые располагаются под углом α к плоскости «базисного» азимута. В последней же эти значения будут минимальными. Горизонтальные смещения забоев в плоскости «базисного» азимута определят также расстояние между нагнетательной и эксплуатационной скважинами.

Для повышения точности контроля пространственного положения оси скважины представляется рациональным проведение основного ствола не вертикально, а с некоторым наклоном (зенитный угол 5—10°).

При этом значительно повысится точность определения азимутальных углов в точках замера искривления скважины и соответственно точность определения положения забоя. Как показывают расчеты, при использовании стандартных измерительных приборов и рациональном выборе профиля скважины максимальная точность определения положения забоя при вертикальной глубине скважины 3000 *м* составляет 10—11 *м*. Имеются предложения [3] обеспечить соединение двух скважин с помощью магнитных приборов, один из которых, будучи размещен на забое скважины, создает искусственное магнитное поле, а другой, непосредственно связанный с буровым инструментом, расположен в другой скважине и представляет собой датчик направления магнитных силовых линий этого поля. Управление буровым инструментом осуществляется с помощью электронной системы с поверхности. Возможны также и другие решения задачи сближения дополнительных стволов нагнетательных и эксплуатационных скважин.

Выводы

1. Создание циркуляционных систем извлечения тепла Земли технически осуществимо при достигнутом уровне развития технологии бурения глубоких скважин.

2. Наиболее сложной задачей при создании циркуляционных систем извлечения тепла Земли с продольными зонами фильтрации является сближение дополнительных стволов нагнетательных и эксплуатационных скважин. Для ее успешного решения должны быть выбраны рациональные профили основного и дополнительного стволов с учетом геологических условий, мощности рабочего горизонта, допустимых радиусов искривления и конечных значений зенитных углов на соответствующих интервалах в зависимости от азимутального направления стволов. Первостепенное значение имеет также точность контроля пространственного положения оси скважины в процессе бурения, обоснованный выбор технических средств и приборов наклонно-направленного бурения. В значительной мере решению этой задачи могут способствовать различные физические методы контроля и управления пространственным положением скважин, разработка которых уже началась.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дядькин Ю. Д. и др. Перспективы использования тепла Земли в технологических процессах горнопромышленного производства. — «Колыма», 1969, № 5.
2. Бронзов А. С. и др. Турбинное бурение наклонных скважин. «Недра», 1965.
3. Henderson J. K. Methods and devices for interconnecting subterranean boreholes. U. S. Pat. 3406766, Oct. 1968.