Записки Ленинградского горного института имени Г.В.Плеханова.
Т. 128. Л., 1991

УДК 622.257.1

В.А.МИРОНЕНКО,
Ф.Г.АТРОШЕНКО,
В.В.ЛОБАНОВ

СПОСОБ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТАМПОНАЖА НА УЧАСТКАХ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЗАВЕС, СОЗДАВАЕМЫХ В КРИОЛИТОЗОНЕ

П о с т а н о в к а з а д а ч и. В настоящее время на карьере „Мир", в связи с высокой его обводненностью рассолами (свыше 1000 м^3/ч), особенно остро встал вопрос о горно-технической и экологической безопасности при дальнейшей выемке полезного ископаемого. Для сокращения объемов откачиваемых рассолов принят к осуществлению проект создания вокруг трубки „Мир" кольцевой противофильтрационной завесы (ПФЗ). Однако высокая значимость сооружаемой ПФЗ для открытой и подземной отработки месторождения, тесная зависимость ее качества от многочисленных и трудно устранимых (при принятой технологии) факторов делают особо актуальным поиск возможных путей дальнейшего совершенствования и роста эффективности тампонажа и методов контроля качества создаваемой завесы.

В геологическом отношении район месторождения относительно хорошо изучен и описан [3, 4]: он представляет собой слоистую систему терригенно-карбонатных отложений, разбитых естественной трещиноватостью. Системы трещин развиты параллельно и перпендикулярно наслоению пород. Во всем объеме отложений отмечается наличие открытых трещин (до 10 % и выше) в исследовавшемся керновом материале.

Гидрогеологические условия района характеризуются наличием в разрезе двух водоносных комплексов: Олекминского (глубины залегания 800–1000 м) и Метегеро-Ичерского (300–500 м).

При детальной разведке глубоких горизонтов установлено, что все породы, в том числе и отложения Олекминской свиты, залегающие ниже Метегеро-Ичерского водоносного комплекса, следует рассматривать как водоупорные, слабопроницаемые, со спорадическим распространением коллекторов с хлоридными кальциевыми рассолами (минерализацией до 400 г/л), углеводородными газами, битумами, нефтью.

Метегеро-Ичерский водоносный комплекс является типичным горизонтом криопегов. Нижний водоупор в районе месторождения находится на отметках от –160 до –186 м, а верхний на отметках от +17 до +20 м. Напоры над кровлей здесь составляют 100–200 м. Водоносный комплекс рассматривается как единая гидравлическая система, имеющая региональное распространение. Химический состав подземных вод представлен рассолами хлоридного натриевого состава с минерализацией от 35 до 300 г/л. По результатам химических

анализов проб из водопонижающих скважин, минерализация подземных вод 90-95 г/л, содержание H_2S 110÷135 мг/л, газовый фактор 0,15-0,25 л/л. Детальный анализ геолого-технологических условий в районе трубки „Мир" показал, что строение Метегеро-Ичерского водоносного комплекса в региональном плане целиком определяется развитием Ангаро-Мунской тектонической зоны, в пределах которой отмечены многочисленные разрывные нарушения, сгруппированные в системы, в которых (в фильтрационном плане) особое значение имеют глубинные тектонические разломы субмеридионального простирания. Зоны тектонических разломов, имеющие ширину от 300 до 500-700 м, обладают повышенными фильтрационными свойствами, при этом дайки долеритов, выполняющие разломы, малопроницаемы. В районе месторождения выделяют Западный, Параллельный, Центральный и Восточный разломы. Кроме того, непосредственно на трубке „Мир", приуроченной к зоне Параллельного разлома, поле фильтрации разбивается на ряд крупных блоков: центральный, восточный и западный, различающиеся по трещиноватости и проницаемости. Одновременно в рамках каждого блока выделяют по фильтрационным свойствам зоны более мелкого порядка.

В этих условиях, как известно, принят к исполнению следующий вариант создания ПФЗ вокруг трубки „Мир": с берм карьера бурятся скважины через каждые 20 м с последующей закачкой глинисто-цементных растворов в Метегеро-Ичерский водоносный комплекс. Затем, после сформирования кольцевой завесы, должны буриться скважины второй очереди, располагаемые посередине между первоочередными скважинами, и при необходимости вновь проводится нагнетание растворов. Если притоки в карьер превысят допустимые величины, то предусмотрено бурение скважин третьей очереди (посередине между скважинами второй очереди) и т.д. В законченном виде данное сооружение должно иметь общую длину около 3100 м, высоту 230 м, расчетную толщину 32 м, предполагаемое снижение проницаемости в теле завесы до $N \cdot 10^{-5}$ м/сутки. Считается, что создание ПФЗ позволит сократить притоки в карьер до 250-300 $м^3$/ч. Стоимость сооружения ПФЗ по проектным разработкам составляет около 100 млн.руб.

Не вдаваясь подробно в анализ факторов, влияющих на эффективность данной ПФЗ, отметим лишь, что глиноцементные растворы не позволяют тампонировать трещины массива размером менее 0,1 мм [1]. Это дает право утверждать, что добиться проектной проницаемости ПФЗ будет довольно трудно, и притоки в карьер будут продолжаться, по всей вероятности, в объемах, превышающих проектные.

В этой связи авторами разработан способ дополнительного тампонажа [2], позволяющий повысить противофильтрационную эффективность завесы и снизить стоимость изоляционных работ вокруг горной выработки, вскрывающей минерализованные воды с отрицательной температурой.

К р а т к а я х а р а к т е р и с т и к а п р е д л а г а е м о г о с п о с о б а. Для создания ПФЗ проводится бурение скважин первой очереди, нагнетание в них глиноцементных растворов, тампонирующих крупную трещиноватость (до 0,1 мм), бурение скважин второй очереди и нагнетание через них пресной воды с последующим ее замерзанием в массиве.

В свое время уже предлагалось использование естественных низких температур рассолосодержащих пород для создания ПФЗ путем закачки и последующего замерзания в массиве пресных вод. Хотя идея эта выглядела достаточно перспективно, ее реализация оказалась несостоятельной по ряду технических причин:

1) из-за незначительного проникновения в массив пресной воды, которая быстро „схватывается" холодом уже вблизи скважины или в самом ее стволе;

2) ввиду сильного влияния плотностной конвекции, приводящей к „всплыванию" закачиваемой пресной воды в окружающих, более плотных рассолах;

3) вследствие сильного корродирующего влияния рассолов на ледопородную завесу из пресной воды.

Нам представляется полезным обратиться к использованию естественного холода для создания, точнее для усиления ПФЗ, на принципиально новой основе с использованием следующей технологии:

1) сочетание „ледового тампонажа" с первоочередной ПФЗ, заранее созданной на базе традиционных видов тампонажа (например, глиноцементными растворами);

2) предварительный разогрев массива на участке ледового тампонажа путем закачки „теплых" рассолов;

3) создание в массиве переходной зоны с постепенно меняющейся минерализацией между рассолами и пресной водой (льдом).

Эта технология практически полностью устраняет первую из отмеченных выше причин и резко ослабляет до незначительных масштабов действие второй и третьей. Действительно, разогрев массива, точнее краевых зон породных блоков, позволяет пресной воде продвигаться практически по всему активному трещинному пространству в пределах зоны влияния избыточного гидростатического давления, заданного в скважине. Таким образом, пресная вода не только заполняет (а затем тампонирует) свободные от тампонажного материала трещины в пределах первоочередной ПФЗ, но и намного раздвигает ее плановые границы, увеличивает эффективную толщину ПФЗ, причем при существенно меньших давлениях на скважине (часто в режиме свободного налива, т.е. в режиме, автономном от бурового оборудования), нежели в условиях работы с обычными тампонажными растворами. Резко сокращается и расход остаточной фильтрации по пористым блокам, которые оказываются покрытыми со всех сторон непроницаемой „оболочкой". Все перечисленное демонстрирует преимущества данного способа тампонажа по сравнению с повторным тампонажем традиционными средствами. Далее влияние плотностной конвекции падает благодаря уменьшению проницаемости (в данном случае вертикальной) пород на участке ПФЗ в результате первоочередного тампонажа. И, наконец, переходная зона устраняет непосредственный контакт между образующимся льдом и высокоминерализованными рассолами, так что корродирующее действие последних будет сильно демпфироваться.

Благодаря постепенному распространению процесса промерзания от краевых, менее прогретых зон пресной воды к центральной, более прогретой при-

скважинной зоне обеспечивается равномерное заполнение трещин льдом; повышенная плотность заполнения гарантируется увеличением объема пресной воды при промерзании.

Способ может применяться и в сдренированных породах криолитозоны, к которым естественные рассолы будут подниматься после создания ПФЗ. Специального анализа и опытной проверки требует возможность реализации этой идеи в целях первичного тампонажа пород в пределах криолитозоны. Кроме того, идея предварительного разогрева массива с последующей подачей пресной воды может найти применение и для временного тампонажа скважин в пределах криолитозоны: такой тампонаж ликвидируется после повторного прогрева скважин.

Подчеркнем, что предлагаемый способ дополнительного (повторного) тампонажа ориентирован именно на трещиноватые или трещиновато-пористые породы, где возможен временный разогрев породных блоков на их контактах с трещинами при консервации основных запасов холода данной зоны в центральных (резко преобладающих по объему) частях блоков: это обеспечивает быстрое повторное охлаждение разогретых краевых частей блоков и эффективное замерзание пресной воды в трещинах после прекращения подачи „теплых" растворов.

Среди возможных факторов, способных затруднить или ограничить применение предлагаемого способа повторного (дополнительного) тампонажа, требуют анализа и опытной проверки действие плотностной конвекции и коррозии льда рассолами, хотя и резко ослабленных на участке ПФЗ; при оценке последнего фактора нужно принять во внимание возможную роль ограниченного поступления рассолов в трещины из пористых блоков после промерзания трещин и снятия избыточного гидростатического давления.

Теоретическое (расчетное) обоснование. Процессы движения рассолов и пресной воды, а также прогрева массива и последующего охлаждения стенок трещин описываются известными закономерностями фильтрации, а также тепло- и массопереноса подземных флюидов. Объединяя, в частности, уравнение плоскорадиальной стационарной фильтрации жидкости[x] и нестационарного теплопереноса (в рамках модели неограниченной емкости [5]), можно получить известное уравнение Ловерье для плоскорадиальной миграции в однородной гетерогенной трещиновато-пористой среде [5]. Однако, априорно ясно, что использование этого решения будет давать большие ошибки: из-за фильтрационной неоднородности пород, обусловленной первоочередным тампонажем, реальное распределение скорости фильтрации v вблизи скважин будет резко отличаться от известного решения плоскорадиальной фильтрации в однородной среде. Так, если в последнем случае $v \sim 1/r$ (здесь r - радиальная координата), то при проницаемости, растущей от средней линии ПФЗ (оси скважины) к ее периферии примерно по

[x] Различиями плотности и вязкости пока пренебрегаем.

линейному закону, распределение скорости в зоне преобладающего движения нагнетаемой жидкости в том же направлении - от оси ПФЗ к ее границе - будет гораздо более равномерным. Поэтому до проведения специальных работ по моделированию более близким к реальности представляется решение Ловерье для теплопереноса в потоке с постоянной скоростью. Наконец, учитывая, что время продвижения пресной воды до границ прогретой зоны будет на два-три порядка меньше времени прогрева (действительная скорость движения по трещинам в сотни-тысячи раз превышает скорость рассчитываемой тепловой волны), можно принять упомянутое решение для условий непрерывного теплового сигнала, отвечающего периоду нагнетания „теплых" рассолов: тем самым мы пренебрегаем отдачей тепла в блоки из пресной воды до ее замерзания, что идет при расчетах в запас.

Итак, процесс изменения температуры в трещинах описывается зависимостью [5]:

$$\bar{T} = \frac{T(x,t) - T_0}{T_0 - T^0} = erfc\left(\frac{x S_\delta n_T}{2v}\sqrt{\frac{a_T}{t}}\right), \qquad (1)$$

где T, T^0 и T_0 - соответственно текущая, начальная и граничная („теплые" рассолы) температуры; x - расстояние от скважины; $t \geqslant t_0 \geqslant ln/v$ - время, отсчитываемое от начала периода нагнетания рассолов (продолжительностью t_0); S_δ - удельная поверхность блоков; n_T - их тепловая емкость; a_T - коэффициент температуропроводности; n - степень трещиноватости (открытой после первоочередного тампонажа).

По зависимости (1) могут оцениваться требуемые характеристики технологического цикла, из которых наиболее показательным является время t_0, необходимое для последующего создания ледовой завесы по всей ширине l первоочередной ПФЗ. При этом можно ориентироваться на условие

$$T(l/2, t_0) = 0\,^\circ C \quad \text{или} \quad \bar{T}(l/2, t_0) = -\frac{T^0}{T_0 - T^0}. \qquad (2)$$

Рассмотрим расчет на примере. Для условий ПФЗ трубки „Мир" примем, что ледовый тампонаж ведется из вскрытых скважин второй очереди ПФЗ, расположенных посередине между затампонированными глиноцементной смесью скважинами первой очереди, отстоящими друг от друга на 20 м. Остальные исходные данные: $l = 20$ м; $S_\delta \simeq 1$ м$^{-1}$ (расстояние между открытыми трещинами около 2-5 м); $n_T = 0{,}6$; $a_T \sim 0{,}01$ м^2/сутки; $T^0 = (-0{,}5 \div -1)$ °С; $T_0 = 10$ °С или с запасом $\bar{T}(l/2, t_0) = 0{,}1$ [см. условие (2)]. Полагаем, что исходная средняя проницаемость на участке закачки рассолов снижена в результате тампонажа примерно на порядок, причем при нагнетании вследствие ограниченного гидрорасчленения пласта она окажется заметно (скажем в 1,5-2 раза) большей, чем при наливе. Соответственно, верхнее значение скорости фильтрации ($v = 2{,}3$ м/сутки) дается для режима нагнетания рассолов, а нижнее ($v = 0{,}5 \div 0{,}7$ м/сутки) - для режима свободного налива, отвечающего возможному дополнительному столбу воды в скважине длиной около 100 м.

Таким образом, $t_0 = 3 \div 6$ ч для режима нагнетания и $t_0 = 2 \div 4$ суток для режима налива можно считать достаточно характерными для условий ПФЗ трубки „Мир". С учетом условия (2), формулу (I) можно представить в виде

$$t_0 = C \frac{\lambda l^4}{k^2 (\Delta H)^2}, \qquad (3)$$

где C – постоянная величина, $C \approx 0{,}4$; k – коэффициент фильтрации (по рассолам); $\lambda = S_0^2 n_T a_T$; ΔH – перепад напоров при нагнетании (наливе).

Если учесть, что из-за возможного гидрорасчленения $k \sim \Delta H^{-m}$, то зависимость t_0 от ΔH оказывается еще более сильной: $t_0 \sim (\Delta H)^{-n}$, где, вероятнее всего, $n \geqslant 2{,}3 \div 2{,}5$. Иначе говоря, ΔH – важнейший управляющий параметр при прогреве пласта. С другой стороны, роль исходной температуры закачиваемых „теплых" рассолов не столь существенна; так, увеличение T_0 с I0 до 20 °С уменьшит время t_0 на 40 %.

Аналогично можно рассчитать время промерзания трещин t_3, однако в этом нет резона, так как при правильно подобранных технологических характеристиках $t_3 \ll t_0$ и требования к закачке пресной воды всецело определяются лишь фильтрационными параметрами в зоне тампонажа и увязанной с ними технологией работ.

Примерная технологическая схема проведения работ по ледовому тампонажу. Для ледового тампонажа наиболее целесообразно использование скважин, пройденных между скважинами первоочередного тампонажа. При этом возможны два варианта проведения работ: аналогично стандартной технологии тампонажа и по специально модифицированной схеме.

Говоря о первом варианте, нужно отметить некоторое увеличение сроков работ (в сравнении со стандартной методикой тампонажа), необходимое для прогрева массива и вытеснения рассолов из ствола скважины, что ощутимо при поинтервальном тампонаже. Для устранения этого недостатка следует рассмотреть возможность заблаговременного вскрытия всех подлежащих тампонажу интервалов.

На второй вариант разумно ориентироваться после накопления достаточно представительного опытного материала на начальных этапах (участках) создания ПФЗ[x], причем преимущественно для условий глубокого залегания тампонируемых интервалов и естественных пьезометрических уровней, позволяющих вести эффективный ледовый тампонаж в режиме свободного налива: благодаря этому можно при автономном вскрытии скважин проводить все последующие работы без бурового и компрессорного оборудования, достаточно свободно варьируя временем тампонажа и другими технологическими параметрами. Это позволяет увеличить время прогрева и радиус тампонажа[xx],

---

[x] Нужно быть относительно уверенным в том, что первоочередной тампонаж обеспечивает достаточно эффективное снижение исх дной проницаемости пород.

[xx] Наряду с шириной переходной зоны.

в частности, и за пределами первоочередного контура ПФЗ, выстаивая скважину в режиме налива (рассолов и пресной воды); важно также, что при этом резко расширяется возможность предварительного опробования скважин и соответственно гибкой адаптации параметров тампонажа к конкретным условиям.

Принципиальная последовательность работ в обоих вариантах примерно одинакова:

1) вскрытие рабочего интервала скважины (после тампонажа скважин первой очереди);

2) опробование скважины „теплым" рассолом в стандартном или специально модифицированном исполнении; последнее предполагает проведение кратковременной откачки закачанных рассолов после „выстаивания" их в пласте;

3) нагнетание (налив) в скважину при подтверждении положительного результата первоочередного тампонажа „теплого" рассола в течение заранее намеченного времени, уточненного по данным опробования (при отрицательном результате опробования скважина тампонируется по стандартной технологии, а для ледового тампонажа на участке разбуриваются скважины третьей очереди);

4) вытеснение рассола из ствола скважины нагнетанием (наливом) пресной воды, причем для качественного вытеснения лучше подавать пресную воду к подошве тампонируемого интервала через внутреннюю трубу; при этом концентрация рассолов в скважине будет убывать постепенно, что создаст в массиве переходную зону между исходными рассолами и пресной водой; процесс образования переходной зоны можно упорядочить, направленно снижая (ступенями) концентрацию подаваемых в скважину рассолов вплоть до перехода к пресной воде;

5) продолжение нагнетания (налива) пресной воды для ее достаточно существенного продвижения по пласту и замерзания, по крайней мере, в периферийной зоне, что будет зафиксировано резким снижением приемистости скважины или ее падением практически до нуля.

Изложенный способ тампонажа органически сочетается с разработанным авторами способом контроля качества ПФЗ по режимной сети скважин.

Таким образом, в рамках единого технологического цикла и даже с использованием одних и тех же скважин могут последовательно проводиться следующие операции:

1) контроль качества (опробование) ПФЗ после первого цикла стандартного тампонажа;

2) при положительных результатах опробования - повторный (дополнительный) тампонаж льдом вплоть до наращивания толщины ПФЗ, созданной после первого цикла;

3) закладка режимной сети ПФЗ для ее долговременного контроля;

4) выборочный „третичный" тампонаж льдом по скважинам, выявившим неудовлетворительное качество ПФЗ на конкретном участке, аналогично вторичному тампонажу, после принудительного прогрева ствола скважины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.с. 757713 СССР МКИ[3] Е 21 Д 1/16. Способ проходки горных выработок / Н.В.Лисничук (СССР). Опубл. 23.08.80. Бюл. № 31.

2. А.с. 1507977 СССР МКИ[3] Е 21 Д 1/16. Способ создания противофильтрационных завес / В.А.Мироненко, Ф.Г.Атрошенко, В.Г. Румынин, В.В.Лобанов (СССР). Опубл. 15.09.89. Бюл. № 34.

3. Гойденко Е.И. Проблемы инженерной гляциологии. Новосибирск: Наука, 1986. 183 с.

4. Иванов И.С. Тепло- и массоперенос в мерзлых горных породах. М.: Наука, 1968. 256 с.

5. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах (опыт гидрогеологических исследований). Л.: Недра, 1980. 320 с.