Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. XLVIII, вып. 2, 1965 г.

О НАГНЕТАНИИ РАСТВОРА СИНТЕТИЧЕСКОЙ СМОЛЫ В ГОРНЫЕ ПОРОДЫ В ЦЕЛЯХ ИХ УПРОЧНЕНИЯ

В. М. Максимов, Н. И. Набокин

Теория и практика нагнетания однородных вязких жидкостей и вяжущих растворов в пористые и трещиноватые, сухие и водоносные горные породы освещается во многих работах, изданных в СССР и за рубежом. Все работы по содержанию можно разделить на две группы. К первой относятся труды С. К. Абрамова, Н. Н. Биндемана, Н. Н. Веригина, Г. Н. Каменского, Е. Е. Керкиса, В. С. Козлова, В. М. Насберга, А. И. Силина-Бекчурина, И. А. Скабаллоновича, Инструкция и методические указания по опытным нагнетаниям И-20-52 и др. [1, 2, 5, 7, — 10 15, 20, 21]. В них рассматриваются вопросы теории и практики нагнетания воды в пористые и трещиноватые горные породы в связи с изучением их фильтрационных свойств и проектированием дренажных и гидротехнических сооружений.

Ко второй группе относятся работы И. И. Вахромеева, Н. Н. Веригина, Р. С. Зиангирова, М. Т. Кулеева, А. И. Мирского, Б. А. Ржаницына, Н. Г. Трупака, Б. П. Шрейберга, Г. Камбефорта и многих других [3, 4, 6, 11—14, 16—19, 22—25]. В них описываются методы укрепления горных пород и грунтов и способы нагнетания цементного раствора (цементация), глинистого раствора удельного веса 1,2—1,4 (глинизация), жидкого стекла и хлористого кальция (силикатизация), расплавленного битума (горячая битумизация), битумной эмульсии, состоящей из воды и мелкодисперсного битума (холодная битумизация), и растворов синтетических смол (смолизация). Все эти способы нагнетания вяжущих растворов приводят к искусственному изменению физико-механических и фильтрационных свойств горных пород и грунтов — повышению их механической прочности, водостойкости и уменьшению водопроницаемости.

Из перечисленных менее изучен способ нагнетания растворов синтетических смол в горные породы и грунты. Специфические особенности теории и технологии нагнетания растворов синтетических смол в горные породы обусловлены самой природой синтетических смол: с одной стороны, по своим гидравлическим свойствам они приближаются к вязким однородным жидкостям (воде, нефти), а с другой — к вяжущим растворам (битуму и др.).

Растворы синтетических смол обладают хорошей проникающей способностью. Их вязкость изменяется от высокой (десятки сантипуазов) до близкой к вязкости воды. Они твердеют при обычной температуре, причем время отвердения можно подбором концентраций смолы и кислоты установить такое, которое превысит время нагнетания. Учитывая эти свойства, при изучении нагнетания синтетической смолы в сухие трещиноватые горные породы в условиях Яновского рудника и шахты Одесская комсомольская № 2 (Донбасс) мы использовали известную теорию движения жидкостей в трещиноватых горных породах.

Для определения расхода жидкости при нагнетании в совершенную скважину (рисунок) или коэффициента проницаемости, по данным нагнетания, при заложении скважины в кровлю выработки можно воспользоваться приведенными ниже формулами. Они соответствуют приведенной схеме и получены при следующих исходных положениях.

1. Движение жидкости в породах рассматривается как плоско-радиальное, расходящееся, установившееся, турбулентное, что в действительности и имело место при нагнетании воды и раствора синтетической смолы.

2. На устье скважины действует постоянное давление $p_н$, а на границе области растекания жидкости — давление $p = 0$.

3. В трещиноватых горных породах на Яновском руднике и шахте Одесская комсомольская № 2, как показали исследования, трещиноватость доминирует над пористостью. Пористость алевролитов и углей небольшая (4—15%).

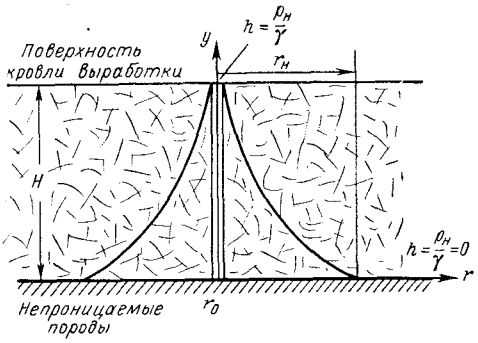


Схема совершенной нагнетательной скважины (перевернута на 180°).

H — мощность зоны трещиноватых пород; h — действующий при нагнетании напор.

4. При нагнетании воды и раствора синтетической смолы в практически сухие породы из трещин и сообщающихся пор воздух вытесняется водой или смолой.

5. Так как вязкость воздуха ниже вязкости воды и раствора смолы, а мощность укрепляемой зоны трещиноватых пород небольшая, сопротивление воздуха при движении воды или смолы в трещинах принято равным нулю.

6. Вследствие небольшой длины нагнетательных скважин сила тяжести (воды или раствора смолы) принята равной нулю.

7. При нагнетании воды и раствора синтетической смолы трещиноватая среда принимается за однородную (изотропную) жесткую. Упругие силы, которые возникают при нагнетании, не учитывались, так как нагнетание производилось при небольших давлениях (1—2 *ат*) в течение непродолжительного времени.

8. В период нагнетания вязкость раствора синтетической смолы принимается постоянной*, соответствующей температуре окружающих скважину горных пород (18—20° С), а продолжительность нагнетания — меньше времени отвердевания синтетической смолы.

Учитывая эти положения, напишем уравнение расхода жидкости при нагнетании в скважину, пройденную в сухих трещиноватых породах,

$$Q = -\frac{k\gamma}{\mu} f \left(\frac{dy}{dr}\right)^{1/2}. \qquad (1)$$

Для цилиндрической площади фильтрации, равной $2\pi ry$ и соответствующей радиусу r, уравнение (1) примет вид

$$Q = \frac{2\pi ryk\gamma}{\mu}\left(\frac{dy}{dr}\right)^{1/2}. \qquad (2)$$

После разделения переменных и интегрирования уравнения (2) в пределах от r_0 до $r_н$ и от h до 0 получим

$$Q = \frac{2\pi hk\gamma}{\mu}\sqrt{\frac{h}{3\left(\frac{1}{r_0}-\frac{1}{r_н}\right)}}, \qquad (3)$$

* В действительности вязкость во времени меняется. За расчетную вязкость при небольшой продолжительности периода нагнетания можно принять среднюю из соответствующих началу и окончанию процесса нагнетания раствора.

где Q — расход жидкости, *см³/сек*;
k — коэффициент проницаемости, *дарси*;
γ — объемный вес жидкости, *г/см³*;
h — напор при нагнетании, *см*;
μ — вязкость жидкости, *спз*;
$r_н$ — радиус влияния скважины, *см*;
r_0 — радиус скважины, *см*;
f — площадь фильтрации.

При $\gamma = 1$ и $h = \frac{p_н}{\gamma}$ расход выразится формулой

$$Q = \frac{2\pi k p_н}{\mu} \sqrt{\frac{p_н}{3\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_н}\right)}}, \tag{4}$$

где $p_н$ — давление на устье скважины (давление на выходе нагнетательного шланга насоса), *ат*.

Если $\gamma \neq 1$ и $\mu \neq 1$, тогда

$$Q = \frac{2\pi k p_н}{\mu} \sqrt{\frac{p_н}{3\left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_н}\right)}}. \tag{5}$$

Принимая $\frac{1}{r_н} \approx 0$, получим

$$Q = \frac{2\pi k p_н}{\mu} \sqrt{\frac{p_н r_0}{3\gamma}} \tag{6}$$

или

$$Q = 3{,}63 \frac{k p_н}{\mu} \sqrt{\frac{p_н r_0}{\gamma}}. \tag{7}$$

В зависимости от решаемой задачи, по формуле (7) можно определять Q при известных k, $p_н$, γ, μ, r_0 или k при известных Q, $p_н$, γ, μ, r_0.

В горных выработках нагнетание растворов синтетических смол во многих случаях производится в скважины, не совершенные по степени вскрытия зоны или пласта проницаемых горных пород. В этом случае, а также и при нагнетании в скважины, заложенные в бока выработки, задача по определению расхода жидкости или вяжущего раствора может быть решена только экспериментально.

Как известно, при нагнетании жидкости в сухие трещиноватые горные породы на выходе насоса может иметь место такое давление, при котором наступает разрушение породы. Это давление, называемое предельным для данных горных пород, определяется по известной формуле

$$p_{пред} = \frac{n h_н \gamma_п}{10} \beta, \tag{8}$$

где $h_н$ — глубина нагнетательной скважины, *м*;
$\gamma_п$ — объемный вес породы, *т/м³*;
n — коэффициент, равный 1,5—2,5;
β — коэффициент связности породы и смолы.

В виду отсутствия данных по коэффициентам n и β, расчет предельного давления при нагнетании раствора синтетической смолы в горные породы произвести невозможно.

В настоящее время ясно только одно, что в горно-геологических условиях Яновского рудника и шахты Одесская комсомольская № 2 предельное давление будет больше 2 *ат*. Определяется оно специальными опытами непосредственно в горных выработках. Изучение процесса нагнетания раствора карбамидной смолы в трещиноватые горные породы и

проверка рассмотренных выше предпосылок нами произведены в лаборатории и горных выработках на шахте Одесская комсомольская № 2.

В лаборатории определяли проницаемость, изучали физико-механические свойства горных пород (временное сопротивление на срез, разрыв, сжатие, коэффициент упрочнения*), пористость, трещиноватость и др.), движения растворов смолы в блоках пород (алевролитов, сланцев) при давлении 1—2 *ат*. На Яновском руднике и шахте Одесская комсомольская № 2 эти породы вмещающие.

Как показали опыты, растворы смолы с вязкостью 4,3—7,98 *спз* и давлением 2 *ат* хорошо проникают в крупные и мелкие трещины сухих пород, твердеют при комнатной температуре (17—20° С). Причем время отвердения (более 2 *ч*) значительно превосходит время нагнетания. Нагнетание смолы в блоки трещиноватых пород производили через перфорированную трубку — скважину, сопряженную со специально сконструированным прибором, который через редуктор подключали к баллону, наполненному азотом.

Выяснили, что применение раствора смолы для упрочнения сухих трещиноватых пород возможно ($k_{упр} = 1{,}45$); адгезия (сцепление) смолы оказалась больше когезии алевролитов; пропитанные смолой образцы практически газонепроницаемы.

Опыты по нагнетанию продолжили в выработках шахты Одесская комсомольская № 2. В кровлю выемочной печи и аккумулирующего штрека заложили три нагнетательные скважины: центральную и две наблюдательные, пройденные в 1 и 1,25 *м*. Раствор смолы и воды нагнетали в центральную скважину при 1 и 2 *ат*. Появление раствора фиксировали через наблюдательные скважины.

Опыты показали, что в процессе нагнетания при 1 *ат* режим движения был ламинарным (действительная скорость 0,51 *см/сек*), а при 2 *ат* — турбулентным (действительная скорость 1,18 *см/сек**). При этом радиусы растекания раствора и воды при таком давлении не вышли из пределов 1,25—1,5 *м*.

Полученные коэффициенты проницаемости при $\mu = 4{,}3$ *спз* и $\gamma = 1{,}087$, в 5 и 5,5 *дарси* свидетельствуют с хороших фильтрационных свойствах пород кровли выработок, что согласуется с данными лабораторных исследований проницаемости и трещиноватости пород и геологическими условиями Яновского рудника и шахты Одесская комсомольская № 2.

Выводы

1. Так как теория и практика нагнетания растворов синтетических смол в сухие трещиноватые горные породы в шахтных условиях не разработаны, настоящие исследования следует считать лишь началом решения вопроса упрочнения трещиноватых горных пород синтетической смолой.

2. Проведенные исследования, несмотря на небольшой объем, свидетельствуют о том, что раствор карбамидной смолы 25—28-процентной концентрации с вязкостью 4—4,3 *спз* можно нагнетать в горные выработки — в сухие трещиноватые породы. При этом от одной невзаимодействующей скважины можно получить радиус закрепления до 1 *м*.

3. Приведенная формула расчета коэффициента проницаемости сухих пород является известной формулой динамики подземных вод для откачки. Она несколько преобразована соответственно с условиями на-

---

* Коэффициент упрочнения горных пород $k_{упр} = \frac{\sigma_{сж_{упр}}}{\sigma_{сж}}$ ($\sigma_{сж_{упр}}$ и $\sigma_{сж}$ — временное сопротивление на сжатие породы соответственно упрочненной и до упрочнения, *кг/см*^{2}).

** Практически, по Г. Н. Каменскому, считают, что при действительной скорости превышающей 1,15 *см/сек*, ламинарный режим движения сменяется турбулентным.

гнетания жидкости в совершенную скважину и требует проверки при разных давлениях на устье скважин, пройденных в различных трещиноватых сухих породах.

Необходимо создание новых формул расчета коэффициента проницаемости трещиноватых и пористых пород по данным нагнетания растворов синтетических смол в совершенные и несовершенные, одиночные и взаимодействующие скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов С. К., Скиргелло О. Б. и Чельцов М. И. Осушение шахтных полей и карьеров угольных месторождений. Госгортехиздат, 1961.
2. Биндеман Н. Н. Методы определения водопроницаемости горных пород откачками, наливами и нагнетаниями. Углетехиздат, 1951.
3. Вахромеев И. И. Новый подход к расчету цементации и глинизации горных пород. Горный журнал, 1960, № 4.
4. Веригин Н. Н. Нагнетание вяжущих растворов в горные породы в целях повышения прочности и водопроницаемости оснований гидротехнических сооружений. ОТН АН СССР, № 5, 1952.
5. Веригин Н. Н. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. Госстройиздат, 1962.
6. Зиангиров Р. С., Гончарова Л. В. Уменьшение водопроницаемости песков карбамидной смолой. Сб. «Вопросы инженерной геологии и грунтоведения», изд-во МГУ, 1963.
7. Инструкция и методические указания по опытным нагнетаниям в одиночные скважины И-20-52. Госэнергоиздат, 1953.
8. Каменский Г. Н. Инструкция по исследованию водопроницаемости горных пород методом опытных нагнетаний. Геолиздат, 1946.
9. Керкис Е. Е. Определение коэффициента фильтрации горных пород комбинированным методом откачки-нагнетания. Советская геология, 1956, № 5.
10. Козлов В. С. Расчет дренажных сооружений. Стройиздат, 1940.
11. Кулеев М. Т. Способ закрепления лёссовых грунтов карбамидной смолой. Тр. Совещания по теоретическим основам технической мелиорации грунтов. Изд-во МГУ, 1961.
12. Кулеев М. Т. Некоторые особенности процесса закрепления лёссовых грунтов растворами карбамидной смолы. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1963, № 2.
13. Луговской В. В. О некоторых теоретических основах процесса цементации пород. Шахтное строительство, 1958, № 5.
14. Мирский А. И. Горячая битумизация. Госстройиздат, 1962.
15. Насберг В. М. Гидродинамическая сетка при фильтрации без подпора из скважины и применение сетки для определения водопроницаемости грунтов. Изв. Тбилисского НИИ сооруж. и гидроэнергет., т. 3, 1950.
16. Ржаницын Б. Н. Силикатизация песчаных грунтов. Изд-во Министерства стр-ва предприятий машиностроения, 1949.
17. Ржаницын Б. Е., Блескина Н. А. Закрепление песчаного грунта карбамидной смолой. Сб. Института оснований, № 39, 1960.
18. Ржаницын Б. А. Некоторые вопросы силикатизации и смолизации грунтов. Тр. Совещания по теоретическим основам технической мелиорации грунтов. Изд-во, МГУ, 1961.
19. Самсонов Н. Г. Определение радиуса распространения раствора, нагнетаемого в несвязный грунт. «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1963, № 2.
20. Силин-Бекчурин А. И. Специальная гидрогеология. Госгеолиздат, 1951.
21. Скабаллонович И. А. Гидрогеологические расчеты. Углетехиздат, 1960.
22. Тр. Совещания по теоретическим основам технической мелиорации грунтов. Изд-во МГУ, 1961.
23. Трупак Н. Г. Цементация трещиноватых пород в горном деле. Металлургиздат, 1956.
24. Шрейберг Б. П. Битумизация в подземном строительстве. Изд-во «Недра», 1964.
25. Cambefort H. Injection des sols. T. I. Principes et metodes. Paris, 1964.