

# ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

---

УДК 622.2

## ФИЛЬТРАЦИОННОЕ ТЕЧЕНИЕ И ПРИЛИВЫ ПЛОТНОСТИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ТРЕЩИН ГОРНЫХ ПОРОД ЦЕМЕНТНЫМ РАСТВОРОМ

А. Е. МАЙОРОВ, В. А. ХЯМЯЛЯЙНЕН

Кемеровский научный центр Сибирского отделения РАН,  
Кузбасский государственный технический университет

*Рассмотрены процессы фильтрационного течения потока суспензии (цементного раствора) при заполнении горизонтальной трещины. Установлена качественная зависимость между расходом и концентрацией суспензии с наличием максимума функции в точке перегиба и зоны предельной концентрации, приводящей к пульсации потока. Выявлен волновой характер относительного движения дисперсной фазы в виде приливов плотности по длине трещины при отфильтровывании дисперсионной среды (жидкой фазы). Предложен рациональный диапазон концентрации цементного раствора для упрочнения нарушенных горных пород.*

*Ключевые слова:* горные породы, трещина, цементный раствор, концентрация, волновые процессы.

*The processes of filtration of suspension flux (cement grout) at filling of horizontal fissure are considered. Qualitative relation between spending and concentration of suspension with the maximum of function in point of inflection and the zone of limited concentration leading to flow fluctuation has been stated. The wave character of relative movement of dispersed phase in flows of density at length of fissure at filtration of dispersive medium (liquid phase) has been discovered. Rational range of concentration of cement grout for strengthening of damaged rocks is suggested.*

*Key words:* rocks, fissure, cement grout, concentration, wave processes.

При исследовании проблемы формирования противофильтрационных цементационных завес или зоны цементационного упрочнения нарушенных пород вокруг горных выработок неизбежно возникают вопросы о плотности и качестве заполнения системы трещин цементным материалом, влияющие на прочность и устойчивость консолидированной приконтурной зоны.

Плотный высокопрочный цементный камень образуется при твердении цементного теста, полученного при затворении сухого цемента и 20—25 % воды (от массы цемента). Высокая концентрация частиц цемента в растворе напрямую связана с повышением сцепления и адгезионной прочности цементного камня с породами [1]. Однако концентрация такого раствора настолько велика, что его транспортирование в породный массив невозможно. Поэтому при приготовлении в раствор вводят гораздо большее количество воды, чем это нужно для гидратации цемента. Уменьшение концентрации раствора приводит к повышению седиментационной неустойчивости и необходимости рассмотрения раствора как суспензии. Реологические свойства таких двухфазных дисперсных систем определяют их технологические характеристики, влияют на структуру и прочность цементного камня. Для повышения плотности и прочности цементного камня, получаемого при упрочнении нарушенного массива, целесообразно в процессе инъекционной

цементации удалять жидкую фазу, отфильтровывающуюся из цементного раствора. Указанное позволяет исключить образование в упрочненном горном массиве водяных «карманов» и «пробок», препятствующих заполнению трещин цементным материалом, а также уменьшить размокаемость горных пород, приводящую к снижению их прочности и устойчивости. После прекращения нагнетания раствора, вследствие обратной фильтрации, жидкая фаза способна разуплотнять твердую фазу в трещинах горных пород. Удаление жидкой фазы из упрочняемого горного массива авторами предложено осуществлять через дренажные фильтрационные скважины, пробуренные вокруг цементационных [2—6]. При этом эффективность упрочнения массива может быть повышена за счет обеспечения равномерной высокой плотности частиц цемента по длине трещин и в объеме зоны цементации, что также подтверждают работы [7—10].

Очевидно, что пропускная способность щели (трещины) для твердых частиц ограничена и при постоянном повышении концентрации раствора обязательно настанет момент полной остановки потока, т. е. массовый (объемный) расход по цементу станет равным нулю. Таким образом, дальнейшее исследование процесса движения потока суспензии в пространстве щели важно для определения оптимальных параметров концентрации, выяснения характера структурирования и распределения плотности дисперсной фазы по длине потока при отфильтровывании дисперсионной среды в процессе цементации нарушенных горных пород.

В реальных условиях цементации нарушенного массива происходит отфильтровывание жидкой фазы раствора как по длине, так и по трещине в конце потока, изменяются структурно-реологические характеристики цементного раствора. На основании проведенных исследований, при рассмотрении упрощенной схемы движения раствора по трещине с отфильтровыванием жидкой фазы только в конце потока, было выделено три принципиальных состояния — структурные стадии, взаимодополняющие и последовательно переходящие одна в другую:

*I* — частицы цемента находятся в свободном взвешенном состоянии;

*II* — частицы цемента в состоянии структурированной смеси, заполняющей при флокуляции весь объем в режиме «мостообразования» (агрегативное течение);

*III* — частицы цемента в состоянии уплотненной структуры (получаемый цементный камень обладает определенными прочностными свойствами).

Наиболее сложен процесс заполнения трещины частицами цемента во второй стадии. Учитывая известный механизм седиментации твердых полидисперсных частиц суспензии, авторы выдвинули гипотезу о волновом характере движения цементного раствора по трещине в виде прямых (по направлению движения потока) и обратных волн приливов плотности частиц цемента при отфильтровывании жидкой фазы.

Известно [11—13], что в двухфазном течении, при наличии зависимости между расходом и концентрацией, всегда наблюдаются непрерывные (кинематические) волны, представляющие собой квазистационарное явление. Учитывая данный факт и возможность проявления подобных эффектов в условиях плоскорадиальной фильтрации цементных растворов, провели серию экспериментов на модели искусственной щели с раскрытием 2 мм, выполненной из двух листов стекла длиной 1000 мм и шириной 70 мм с наведенной шероховатостью на внутренней поверхности. Линейный размер щели выбран с учетом минимального фактического расстояния, например между нагнетательными и дренажными скважинами (рядами анкеров), которое в основном варьируется в интервале от 1 до 2 м. Подвод цементного раствора к стенду организован через вентиль по шлангу из емкости со встроенным смесителем. После прохождения через щель цементный раствор свободно сбрасывался во внешнюю мерную емкость.

Испытания проводились следующим образом. В условиях комнатной температуры готовился цементный раствор при определенном цементно-водном (Ц : В) массовом соотношении компонентов, соответствующем концентрации  $\alpha$ . В опытах использовался портландцемент М 400 (г. Искитим). После перемешивания в течение одной минуты раствор заливался в емкость, которая при включенном смесителе поднималась на фиксированную высоту 2,5 м. При открытии вентиля поток раствора по шлангу подавался к искусственной щели. Время  $t$  замерялось от момента начала истечения раствора из щели до момента выпуска его фиксированного объема из поднятой емкости.

Зависимость между концентрацией раствора и временем его истечения из щели при фиксированном объеме истечения и давлении приведена на рис. 1.

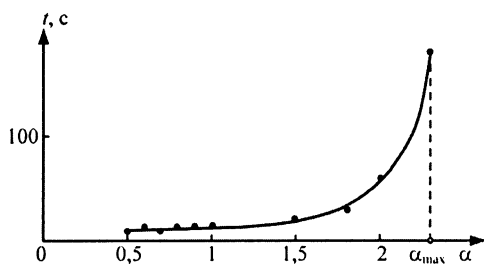


Рис. 1. Зависимость между концентрацией раствора и временем его истечения

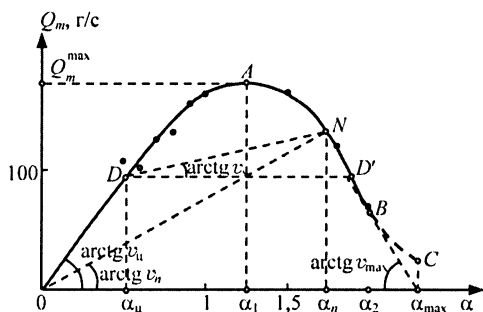


Рис. 2. Зависимость между расходом и концентрацией раствора при его истечении из щели (при фиксированных объеме истечения и давлении)

Вид данной зависимости, по сути, является качественной характеристикой процесса применительно к другим маркам цемента.

На основании результатов исследований выведена зависимость между массовым расходом  $Q_m$ , г/с, и концентрацией  $\alpha$  классической формы, получаемой при наличии непрерывных волн в потоке двухфазной среды [12, 13], а в рассматриваемом случае — волн приливов плотности дисперсной фазы в потоке суспензии (рис. 2).

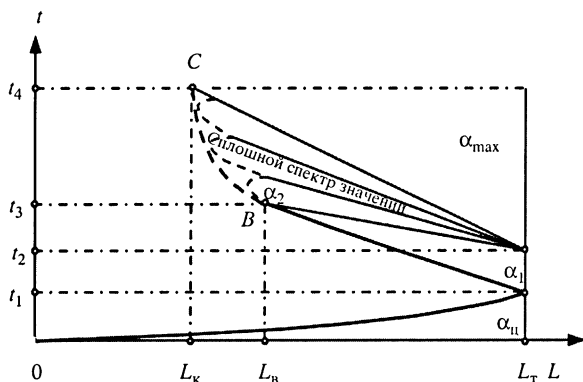


Рис. 3. Изменение плотности потока твердой фазы по длине трещины в процессе цементации

Наиболее точно полученную зависимость  $Q_m(\alpha)$  описывает полином пятой степени:

$$Q_m = 81,9\alpha^5 - 436,9\alpha^4 + 780,3\alpha^3 - 637,5\alpha^2 + 371,5\alpha + 0,23.$$

Качественная картина описываемого процесса в координатах *время* ( $t$ ) — *расстояние* ( $L$ ) представлена на рис. 3.

Важно, что при проведении испытаний с цементным раствором концентрацией менее 2 на выходе из щели наблюдался равномерный поток. При концентрации более 2 выход раствора из щели осуществлялся в режиме пульсации — периодического изменения общего расхода. Повышение концентрации испытываемого раствора до  $\alpha_{\max} = 2,3$  привело к тому, что через незначительное время после начала истечения начался порционный выплеск раствора, который, плавно затухая, полностью прекратился и сопровождался последующим закупориванием щели.

Если в потоке отсутствует дисперсная фаза, то  $\alpha = 0$ , когда частицы расположены вплотную друг к другу, соответственно  $\alpha = \alpha_{\max}$ . Цементация начинается при некотором выбранном значении  $\alpha_{\text{ц}}$  от точки  $D$  (рис. 2), соответствующей точке 0 начала координат (рис. 3). Скорость движения частиц дисперсной фазы  $v_{\text{ц}}$  в потоке при начале цементации трещины определяется углом наклона прямой  $OD$  к горизонту, что соответствует значению  $\arctg v_{\text{ц}}$  (рис. 2). В рассматриваемом случае исходная концентрация раствора принята равной 0,5, соответствующей точке  $D$ .

Полученные результаты позволяют провести анализ и обобщение для условий плоскорадиальной фильтрации цементных растворов.

В процессе нагнетания нерасслоившегося цементного раствора с определенными производительностью и давлением поток по магистральной трещине с непроницаемыми стенками можно считать стационарным. Частицы цемента приняты несжимаемыми, что вполне допустимо при фильтрационном течении. Значение концентрации суспензии задано изначально и может иметь следующие принципиальные значения для зависимости  $Q_m(\alpha)$ : до точки максимума — участок  $OA$ ; непосредственно в точке максимума  $A$ ; после точки максимума до начала пульсаций потока — участок  $AB$ ; в процессе пульсаций до  $\alpha_{\max}$  — участок  $BC$  (рис. 2).

В любой трещине рано или поздно начнется отфильтровывание жидкой фазы раствора в конце потока, что вызвано различными причинами: наличием дренажных скважин с фильтрующей средой, сужением или заштыбровкой трещины и т. п. Рассмотрим данный вариант. После начала отфильтровывания жидкой фазы структура суспензии последовательно переходит в стадию  $II$  при «обратном» приливе плотности (волна структурной перекомпоновки частиц цемента с новым значением  $\alpha$  распространяется по трещине навстречу потоку). Следовательно, в точке  $N$ , изображающей новую ситуацию, кривая должна иметь отрицательный наклон. Причем одному и тому же значению  $Q_m$  соответствуют два различных значения  $\alpha$ , в данном случае — большее. Скорость движения частиц дисперсной фазы  $v_n$  в потоке концентрацией  $\alpha_n$  определяется углом наклона прямой  $ON$  к горизонту. Таким образом, процесс проходит с образованием «скачка» плотности и ударная волна прилива движется навстречу потоку с отрицательной скоростью  $v_n$ , соответствующей углу наклона линии  $DN$ .

В какой-то момент времени  $t_2$  (рис. 3) в определенном объеме суспензии, находящейся во  $II$  структурной стадии, происходит срыв рыхлых мостообразований частиц цемента и их одномоментное сжатие перед местом отфильтровывания под действием давления нагнетания раствора. В месте отфильтровывания (в конце потока, равного длине рассматриваемой трещины  $L_r$ ) исходный скачок плотности расщепляется на непрерывные волны, соответствующие сплошному спектру значений  $\alpha$ . Волны, соответствующие значениям  $\alpha$  слева от максимума кривой, распространяются вперед и гасятся в точке отфильтровывания, а соответствующие величинам справа от максимума — назад. Самая быстрая из волн, движущихся назад, в момент времени  $t_3$  в точке  $B$  на расстоянии  $L_b$  сливается с исходным скачком (приливом плотности). По мере наложения последующих волн скачок ослабляется, разворачивается в плоскости  $iL$  и асимптотически вырождается в бесконечно малую непрерывную волну. В области  $BC$  плотность потока непрерывно изменяется. Конечное время  $t_4$ , как и время нагнетания раствора в трещину, также ограничено временем схватывания цемента, останавливающим все описанные процессы. В конечной ста-

дии, в период времени  $t_4$ , максимальное расстояние распространения волн прилива плотности соответствует некоторому значению  $L_k$ . На больших свободных участках графика плотность постоянна. В области с веером линий плотность частиц в потоке непрерывно изменяется во времени.

Остановимся на факте порционного выплеска раствора при истечении из щели. Ранее рассматривались случаи при неподвижной фильтрующей среде. Особая ситуация возникает при достижении высокой критической концентрации раствора, близкой к значению  $\alpha_{\max}$ , что способствует образованию пульсирующего режима течения раствора по трещине. При данных концентрациях раствор находится в состоянии структурированной смеси, что инициирует частичное кратковременное заклинивание группы частиц между стенками щели. Соответственно начинаются процессы отфильтровывания жидкой фазы с волнами прилива плотности навстречу потоку и разрежения в направлении движения потока. Далее происходит срыв заклиненной группы частиц с порционным выплеском из щели и последующее выравнивание потока. Подобный процесс происходит и с другой подобной группой частиц. При этом наложение волн структурных перекомпоновок потока суспензии приводит к скачкам плотности, прогрессирующее количество которых при достижении некоторого критического значения полностью перекрывает пространство щели «пробкой», останавливая движение частиц. Значение  $\alpha_{\max}$  для полностью уплотненной структуры частиц распространяется от места отфильтровывания по длине трещины со скоростью «скачка»  $v_{\max}$ , соответствующей тангенсу угла наклона касательной к кривой  $Q_m(\alpha)$ , проведенной из точки  $\alpha = \alpha_{\max}$ ,  $Q_m = 0$ .

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Движение жидких цементных растворов (суспензий) в пространстве щели с непроницаемыми стенками можно рассматривать как гидротранспорт взвешенной дисперсной фазы в неразрывном потоке. Процесс отфильтровывания дисперсионной среды в конце потока стабилен до момента начала структурирования и флокуляции частиц цемента, заполняющих весь объем трещины в режиме «мостообразования».

В процессе принудительного отфильтровывания дисперсионной среды в конце потока дальнейшее структурирование дисперсной фазы сопровождается ее уплотнением с неравномерным изменением концентрации и качества упаковки частиц по длине трещины и в объеме зоны цементации. При этом происходят волновые процессы, реализующиеся в виде относительного дрейфа и смещения частиц системы, что инициирует образование взаимосогласованных слоевых иерархичных структур, эстафетная перекомпоновка которых выражается в виде прямых и обратных волн прилива плотности по длине трещины.

Выбранные параметры нагнетания и концентрацию цементного раствора перед инъекционным упрочнением нарушенных горных пород рекомендуется корректировать в соответствии с экспериментально определенной зависимостью  $Q_m(\alpha)$  для различных видов трещин и растворов. Максимальная массовая производительность по дисперсной фазе потока (пропускная способность трещины) соответствует верхней точке перегиба  $A$  зависимости  $Q_m(\alpha)$  с соответствующим оптимальным значением концентрации раствора  $\alpha_1$ , которое принимается за исходное при цементации крупных трещин.

Пределом допустимого повышения концентрации суспензии при условии обеспечения стабильности потока по длине трещины можно принять значение  $\alpha_2$  в точке  $B$  зависимости  $Q_m(\alpha)$ , соответствующее началу периодического (пульсирующего) течения потока при критическом взаимоналожении волн прилива плотности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инъекционное упрочнение горных пород / Ю. З. Заславский [и др.]. М.: Недра, 1984. 176 с.
2. А. с. 768990 СССР, МПК Е 21 D 1/16. Способ упрочнения горных пород / Г. И. Комаров, Е. Г. Дуда, Ю. В. Бурков, В. А. Хмяляйнс (СССР); опубл. 07.10.80, Бюл. № 37.

3. Пат. 2283959 Российская Федерация, МПК Е 21 D 20/00, Е 21 D 11/00. Способ крепления горных выработок / В. А. Хямяляйнен, А. Е. Майоров; опубл. 20.09.06, Бюл. № 26.
4. Пат. 2320875 Российская Федерация, МПК Е 21 D 21/00. Способ крепления горных выработок и устройство для его осуществления / В. А. Хямяляйнен, А. Е. Майоров; опубл. 27.03.08, Бюл. № 9.
5. Пат. 2337241, Российская Федерация, МПК Е 21 D 11/00. Способ цементации трещиноватых горных пород / В. А. Хямяляйнен, А. Е. Майоров; опубл. 27.10.08, Бюл. № 30.
6. Пат. 2387838, Российская Федерация, МПК Е 21 D 1/16, Е 21 D 9/00, Е 02 D 3/12. Способ упрочнения трещиноватых горных пород / В. А. Хямяляйнен, А. Е. Майоров; опубл. 27.04.10, Бюл. № 12.
7. Хямяляйнен В. А., Бурков Ю. В., Сыркин П. С. Формирование цементационных завес вокруг капитальных горных выработок. М.: Недра, 1994. 400 с.
8. Красовицкий Ю. В., Жужиков В. А. // Химическая промышленность. 1964. № 8. С. 60—61.
9. Calculations of consolidation period in expression operations / M. Shirato, T. Murase, A. Tokunaga, O. Yamada // J. Chem. Eng. 1974. Vol. 7. No. 3. P. 229—231.
10. Жужиков В. А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1980. 398 с.
11. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения: пер. с англ. М.: Мир, 1972. 440 с.
12. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.
13. Там же. Ч. 2. 360 с.

Поступила в редакцию 25 марта 2010 г.

---