

УДК 622.2

В.А. Хямяляйнен, А.Е. Майоров

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ЦЕМЕНТАЦИОННЫХ РАСТВОРОВ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ТРЕЩИНОВАТЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Рассмотрены процессы фильтрации цементного раствора при упрочнении нарушенного массива горных пород. Представлен поэтапный анализ движения суспензии и ее дисперсной фазы в пространстве горизонтальной трещины. Определены зоны критической локализации частиц цемента.

Ключевые слова: горные породы, трещина, цементация, поток суспензии, фильтрация, частицы цемента.

Семинар 19

Исследуя проблемы формирования цементационных завес или зоны цементационного упрочнения нарушенных пород вокруг горных выработок, неизбежно возникают вопросы по качеству заполнения системы трещин цементным материалом, максимально возможной дальности его распространения, требованиям к технологии инъекционной цементации.

С целью повышения эффективности упрочнения массива авторами разработана серия технологий, основанных на цементационном упрочнении трещиноватой приконтурной зоны в сочетании с анкерами, закрепляемыми в скважине сыпучим материалом – кварцевым песком (патенты РФ № 2283959, 2320875, 2321749). При этом скважины анкерного крепления используются как для нагнетания цементационного раствора, так и в качестве дренажных фильтрационных сбросов «излишней» жидкой фазы (не участвует в процессе гидратации цемента и необходима только для гидротранспорта частиц). Используемый для закрепления анкеров песок представляет собой фильтрующую среду для частиц цемента. Дисперси-

онная среда отфильтровывается из системы трещин через песок дренажных скважин под воздействием давления нагнетания и последующего механического сжатия (поджатия) анкерами расслоившейся и нарушенной структуры приконтурной зоны. Анкеры в данных технологиях также выполняют функцию временной крепи, в том числе ограничивая развитие системы трещин под действием давления нагнетания цементационного раствора.

Из анализа работ [1–4] очевидно, что эффективность упрочнения массива может быть повышена за счет обеспечения равномерной высокой плотности частиц цемента по длине трещин и в объеме зоны цементации. Также доказано, что более высокая концентрация частиц цемента в растворе напрямую связана с повышением коэффициента сцепления и адгезионной прочности цементного камня с породами [5].

В контексте разработанных технологий рассмотрим условия, влияющие на фильтрацию цементного раствора и структурирование частиц цемента в пространстве горизонтальной трещины.

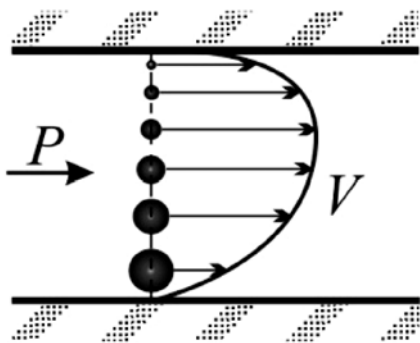


Рис. 1. Качественная эпюра скоростей потока полидисперсной суспензии

Особое влияние на поток полидисперсной суспензии в щелевом канале оказывает седиментация частиц [1]. У цементационных растворов частицы имеют различный фракционный состав и объемный вес. Механика течения при этом осложнена большим объемным весом именно самых крупных частиц, что способствует их значительно более быстрому осаждению. Неоднородность структуры суспензии в объеме потока является одной из важных характеристик для цементных растворов. Рассматривая фильтрацию цементационного раствора как гидротранспорт полидисперсных частиц цемента, можно наблюдать в вертикальной плоскости горизонтального потока движение частиц с различной скоростью (рис. 1), что вполне согласуется с теорией фазового течения суспензий [6].

При движении раствора частицы цемента объединяются в группы за счет взаимодействия поверхностных сил и сил межмолекулярного притяжения. Этому препятствуют гидратные оболочки. Наиболее тонки эти оболочки на острых гранях частиц, поэтому в этих местах и происходит слипание (флокуляция) частиц. Флокулы под действием силы тяжести в жидких растворах быстрее опускают-

ся на дно по сравнению с отдельными частицами.

Необходимо отметить, что в соответствии с классической теорией пограничного слоя Прандтля движение суспензии (цементного раствора) по длине трещины сопровождается диссипацией энергии в зоне контакта со стенками, где возникают большие градиенты напряжений по нормали к потоку. Как известно, на нижней стенке трещины формируется стационарный слой осевших частиц, над которым на некотором удалении происходит течение уплотненного ядра повышенной концентрации, ограниченного потолочной поверхностью. Особо сложна механика течения суспензии в узкой переходной области между ядром потока и ограничивающими его стационарными поверхностями трещины. При установившемся непрерывном потоке суспензии разница в относительных скоростях движения частиц вызывает их взаимное сдвигово-ротационное смещение и непрерывную локальную групповую перестройку их структуры с механическим разрушением агрегатов (флокул). Указанный процесс способствует высвобождению дополнительного количества связанной воды, снижая тем самым вязкость и предельные напряжения сдвига суспензии в переходной области.

Известно, что существует некоторая минимальная скорость движения раствора $v_{кр}$, ниже которой начинается осаждение твердой фазы. При скоростях течения $v < v_{кр}$ происходит рост осадка на нижней стенке трещины. Рост осадка по высоте происходит до тех пор, пока скорость раствора снова не возрастет до $v_{кр}$. При дальнейшем увеличении скорости потока осадок остается на месте, ибо вследствие адгезии скорость эрозии

превышает минимальную безосадочную скорость. Например, по Юльстему скорость эрозии почти в 10 раз превышает минимальные безосадочные скорости. Особенно сильно адгезия проявляется в случае мельчайших частиц.

Понятием критической (минимальной безосадочной) скорости широко пользуются при гидравлических расчетах гидротранспорта угля и пород по трубам, а также при расчетах систем канализации как у нас в стране, так и за рубежом. При этом суть введенного понятия скорости $v_{кр}$ остается одной и той же. Так, например, по мнению С.Соу, под минимальной скоростью переноса понимается средняя скорость потока, при которой на дне горизонтальной трубы не накапливается слой неподвижных или проскальзывающих частиц. При движении малонасыщенных растворов значение критической скорости увеличивается с ростом концентрации. В концентрированных же растворах флоккулы, соединяясь между собой, не падают на дно, а образуют структурированную смесь. Вследствие этого значение критической скорости уменьшается начиная с некоторой концентрации при ее увеличении. Если при сравнительно небольших насыщениях растворов твердой фазой в потоке появляется коллоидная составляющая (увеличивается вязкость взвесенесущей жидкости), то при значительных насыщениях раствор приобретает свойства вязкопластичного тела. Результаты экспериментальных и теоретических исследований, выполненных в ОАО «КузНИИшахтострой» и ГУ КузГТУ [7], предложена схема заполнения трещины цементным материалом (рис. 2) при движении раствора от на-

гнетательной скважины. Стенки трещины приняты непроницаемыми. Согласно данной схеме различают три области течения раствора от скважины.

В области I наблюдается безосадочное движение со скоростью, превышающей критическую безосадочную.

В области II образуется устойчивый осадок за счет седиментации цементных частиц вследствие уменьшения скорости потока. По мере осадкообразования над осевшей твердой фазой устанавливается течение с постоянной скоростью $v_{кр}$ и постоянной площадью живого сечения потока. Со временем на некотором расстоянии от скважины в области IIб осесимметричное течение раствора преобразуется к плоскопараллельному по отдельным каналам.

Расстояние, начиная с которого течение раствора в области II пойдет по отдельным каналам, можно ориентировочно определить исходя из соотношения при условии равенства площадей поверхности осадка и верхней стенки трещины [7]

$$2(R_k^2 - R_{кр}^2) = \frac{4\delta}{R_k} R_{кр} (R_k - R_{кр}),$$

где δ – среднее раскрытие трещины, R_k – радиус начала каналаобразования, $R_{кр}$ – радиус начала образования осадка.

В соответствии с данной зависимостью минимальное расстояние, с которого может начаться процесс каналаобразования, примерно равно $3R_{кр}$ [7].

Учитывая результаты исследований, фильтрация раствора в одиночной трещине проходит также при структурировании твердой фазы раствора (суспензии).

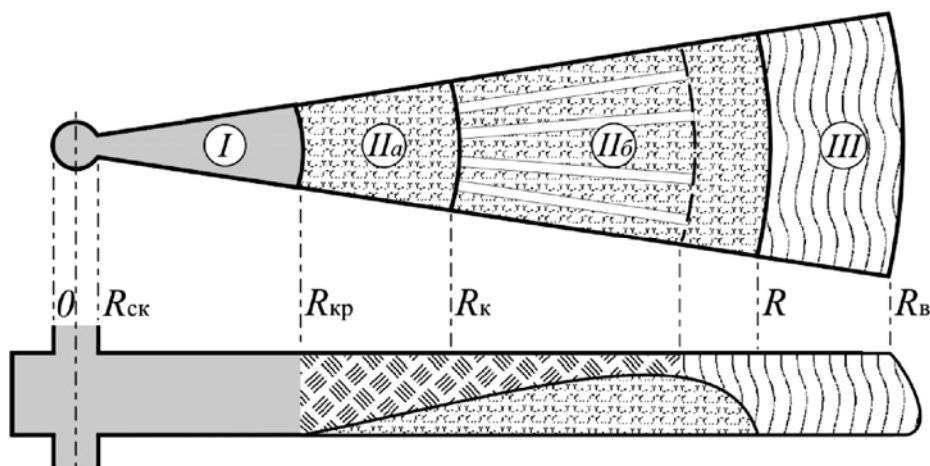


Рис. 2. Схема плоскорadiaльной фильтрации раствора в одиночной трещине

В области *IIa* происходит агрегативное течение раствора с последующим структурированием в области *IIб* при отфильтровывании жидкой фазы по длине трещины. В области *II* кроме магистральных течений в их промежутках образуется хаотично разветвленная сеть каналов, русло которых расположено над седиментировавшей твердой фазой раствора.

В области *III* наблюдается течение отфильтровываемой жидкой фазы раствора.

При упрочнении массива по разработанным технологиям для обеспечения качественного заполнения трещин цементным материалом необходимо выбирать место размещения дренажных скважин с учетом предложенной схемы (рис. 2) в области *IIб* и не далее предельно возможного радиуса распространения раствора R .

Процесс цементации реального массива трещиноватых горных пород проходит в более сложном режиме. Например, происходит отфильтровывание жидкой фазы раствора при одновременной седиментации цементных частиц. При этом образуются за-

стойные зоны, независимо от причин образования которых происходит остановка частиц и начинается процесс заполнения трещины цементом. Одновременно жидкая фаза раствора начинает опережать твердую, отфильтровываясь и продвигаясь далее по пространству щели. Таким образом, выделяется два основных режима фильтрационного течения: с отфильтровыванием жидкой фазы по длине потока и с локальным отфильтровыванием жидкой фазы в микротрещины породных блоков. Основные варианты локализации зон повышенной концентрации частиц цемента при цементации трещин горных пород представлены на рис. 3.

Следующим важным условием, осложняющим процесс цементации реального массива трещиноватых горных пород, является ограничение проникающей способности цементационного раствора, под которой понимается способность дисперсной фазы проникать в трещины. Практикой установлено [1], что цементации поддаются трещины с раскрытием не менее $(0,1-0,2) \cdot 10^{-3}$ м. Проникновение твердой фазы в трещину зависит

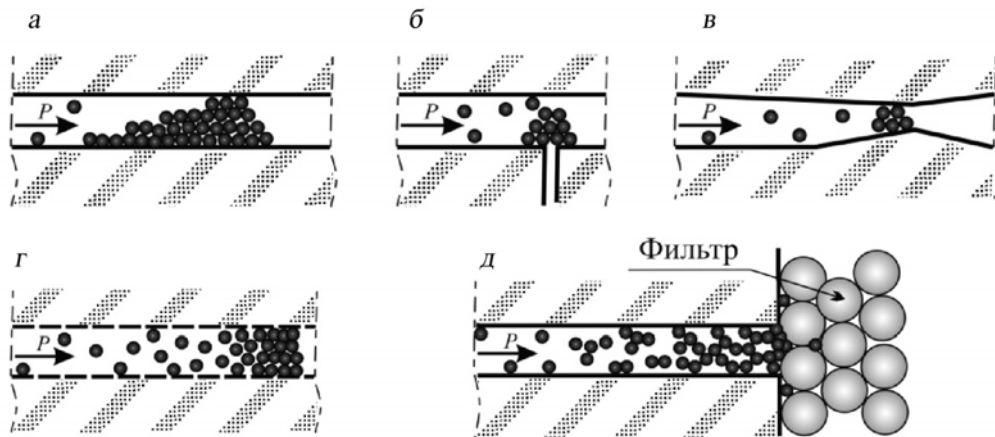


Рис. 3. Варианты локализации зон повышенной концентрации частиц цемента при цементации трещин горных пород: а – седиментация и критическое снижение скорости движения частиц; б – отфильтровывание дисперсионной среды в пересекающие трещины; в – критическое локальное сужение магистральной трещины; г – отфильтровывание дисперсионной среды по длине потока в поры и микротрещины горных пород; д – отфильтровывание дисперсионной среды в конце потока: фильтр дренажной скважины или зона заштыбовки трещины

от ряда факторов, основными из которых являются: раскрытие трещины, размер твердых частиц, их концентрация, давление (напор) потока.

Для определения условий, влияющих на процесс и интенсивность прохождения частиц сквозь щелевые отверстия (трещины), было проведено триста опытов на модели гравитационной решетки. Испытывались частицы разной формы с одномоментной загрузкой в верхнюю часть модели партии определенного, одинакового для всех опытов объема. Частицы падали вниз, часть из которых проходила сквозь решетку, а часть, зависая при взаимном расклинивании, задерживалась на решетке. Для опытов использовались сменные решетки с различным соотношением максимального размера частиц к ширине отверстия. При этом важны факты сводообразования и струк-

турирования частиц вокруг отверстий, которые происходят с различной частотой повторений в зависимости от соотношения их размера к величине раскрытия щели. Выявлено, что имеет место влияние формы частиц на процесс их прохождения сквозь щелевые отверстия. В стесненных условиях угловатые частицы по сравнению с округлыми образуют более устойчивую структуру, которая реализуется в виде прямых и обратных сводов над щелевыми отверстиями (рис. 4).

При прочих равных условиях более свободное состояние частиц, перемещения которых возможны со свободным взаимным поворотом, приводит к большей устойчивости структуры из округлых частиц. При этом меньшая склонность к взаимному повороту наблюдается у более вытянутых частиц, работающих в структуре по принципу балки с защемленным концом.



Рис. 4. Структура прямых (в центре) и обратных сводов угловатых частиц над щелевыми отверстиями гравитационной решетки

В [4] также отмечается, что при разделении (отфильтровывании) суспензий «...для образования «сводов» угловатые частицы предпочтительнее, чем округлые».

Чем легче раствор отдает жидкую фазу, тем интенсивнее сводообразование и наоборот. Именно этим, по видимому, можно объяснить повышение проникающей способности растворов при введении в них пластифицирующих добавок, которые в той или иной степени снижают водоотдачу цементационных растворов. Последний факт подтверждает, что при цементации трещиновато-пористых горных пород проникающая способность растворов существенно снижается вследствие повышения интенсивности отфильтровывания жидкой фазы. Вышеизложенный качественный анализ также показывает, что сводообразование возможно не только в устье трещины, но и в самой трещине на некоторой ее глубине.

Таким образом, можно констатировать, что процесс устойчивого сводообразования частиц при цементации нарушенных горных пород более сложен и зависит не только от


общеизвестных факторов. Важным условием реализации рассматриваемых технологий упрочнения массива является дальнейшие исследования влияния на процесс цементации формы частиц и их концентрации, структурно-реологических характеристик раствора, скорости потока и т.д.

Отдельно необходимо отметить важность выбора рациональных параметров скорости потока и давления нагнетания цементационного раствора на входе в трещину, подтверждая ранее сделанные выводы [1] о необходимости поддержания постоянного расхода в начале процесса инъекционного нагнетания и при последующем переходе на нагнетание при постоянном давлении. Как указывалось, при увеличении скорости потока до некоторого критического значения происходит разрушение неустойчивых агрегатов частиц суспензии с высвобождением дополнительного количества связанной жидкой фазы. Тем самым, снижается общая вязкость смеси и толщина гидратных оболочек частиц, а соответственно, и их проникающая способность.

Выполненные исследования также позволяют утверждать, что практическое использование рекомендаций о применении только высококонцентрированных растворов может во многих случаях привести к снижению качества цементационных работ за счет значительного снижения проникающей способности. Однако при снижении концентрации цементационных растворов необходимо учитывать понижение прочностных харак-

теристик получаемого цементного камня и горных пород при их излишнем размокании. Решение проблемы возможно при организации фильтрационных сбросов (отфильтровывании через дренажные скважины) излишней для процесса гидратации цемента жидкой фазы раствора, что и позволяет реализация предложенных технологий крепления горных выработок при решении новых поставленных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хямяляйнен В.А. Формирование цементационных завес вокруг капитальных горных выработок / В.А. Хямяляйнен, Ю.В. Бурков, П.С. Сыркин. – М.: Недра, 1994. – 400 с.
2. Красовицкий Ю.В., Жужиков В.А. // Химическая промышленность. – 1964. – № 8. – С. 60–61.
3. Shirato M., Murase T., Tokunaga A. e.a. // J. Chem. Eng. Japan. – 1974. – V.7. – № 3. – P. 229–231.
4. Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий / В.А. Жужиков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1980. – 398 с.
5. Заславский Ю.З. Инъекционное упрочнение горных пород / Ю.З. Заславский, Е.А. Лопухин, Е.Б. Дружко, И.В. Качан. – М.: Недра, 1984. – 176 с.
6. Ходаков Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование // Российский химический журнал (журн. Рос. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева). – 2003. – Т. XLVII, № 2. – С. 33 – 44.
7. Хямяляйнен В.А. Цементация слоистых пород / Хямяляйнен В.А., Угляница А.В. РАЕН; КузГТУ. – Кемерово, 2000. – 218 с. 

Коротко об авторах

Хямяляйнен В.А. – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой Теоретической и геотехнической механики ГОУ Кузбасского государственного технического университета, заслуженный деятель науки РФ, vah@kuzstu.ru
Майоров А.Е. – кандидат технических наук, зав. лабораторией проблем энергосбережения Кемеровского научного центра СО РАН, majorov-ae@mail.ru

