

УДК 622.621.311.21

Хямяляйнен Вениамин Анатольевич, профессор, д.т.н

Рожнова Елена Владиславовна, студент

(КузГТУ, г. Кемерово)

Khyamyalyainen Veniamin, professor, doctor of engineering sciences

Rozhnova Elena, student

(KuzSTU, Kemerovo)

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ТАМПОНАЖА ГОРНЫХ ПОРОД РАСТВОРАМИ НА ОСНОВЕ ВЯЖУЩЕГО

THE PHYSICAL FEATURES OF THE PROCESS OF PLUGGING OF ROCKS WITH SOLUTIONS BASED ON A BINDER

Аннотация

Изложены теоретические предпосылки исследования физических особенностей процесса тампонажа (инъекции) массива горных пород нестабильными растворами на основе цемента. Рассмотрены процессы осаждения цементных частиц, отфильтровывания жидкой фазы раствора в пористые породные блоки и по длине потока в трещинах при распространении от нагнетательных скважин.

Annotation

Theoretical prerequisites of a research of physical features of process of a plugging (injection) of the massif of rocks by unstable solutions based on cement are stated. Processes of sedimentation of cement particles, filtering out of a liquid phase of solution into porous blocks and on flow length in cracks at propagation from delivery wells are considered.

Основными проблемами при проведении и поддержании горных выработок являются обрушение горных пород и водопритоки в выработки. Одним из эффективных способов при проведении и поддержании горных выработок является тампонаж горных пород [1,2]. Цель тампонажа укрепление массива горных пород, а также создание противofильтрационной завесы, которая приводит к уменьшению притока воды в горные выработки. Различают 3 способа тампонажа: растворами на основе вяжущего (цемента), на основе глино-цементных растворов и на основе химических растворов. Химические растворы в 10 раз дороже цемента, поэтому лучше всего использовать тампонажные растворы на основе цемента.

Физические особенности цементации заключаются в отфильтровывании жидкой фазы раствора в пористые породные блоки, седиментации (осаждении) цементных частиц в трещинах, а также в отфильтровывании жидкой фазы по длине потока.

Для оценки отфильтровывания жидкой фазы в пористые породные блоки для простоты решения рассмотрим отдельно движение жидкой фазы, удовлетворяющее линейному закону движения Дарси.

$$\bar{v} = -\frac{k_B}{\mu_B} \text{grad}P, \quad (1)$$

где \bar{v} – скорость жидкой фазы в трещине, м/с; k_B – коэффициент фазовой проницаемости трещины, м²; μ_B – коэффициент динамической вязкости жидкой фазы, Па·с; P – давление в трещине, Па.

В силу того, что фильтрация цементных растворов при инъекции происходит в сравнительно небольших объемах горных пород, ее сжимаемость не учитывается. Тогда уравнение неразрывности потока будет иметь вид

$$\text{div}\bar{v} = 0. \quad (2)$$

Решая совместно эти два уравнения, получим уравнение Лапласа для определения давления при плоскопараллельном и осесимметричном течении жидкой фазы. Так для плоскопараллельного течения будем иметь

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (3)$$

где x, z – прямоугольные координаты.

Решение этого уравнения получено в виде рядов. Определив функцию давления в трещине, можно найти расходы жидкой фазы на входе в трещину и выходе из нее. Степень отфильтровывания жидкой фазы через пористые породные блоки определяем следующим соотношением:

$$\eta = \frac{Q_{СК} - Q_K}{Q_{СК}}, \quad (4)$$

где η – степень (интенсивность) отфильтровывания жидкой фазы в пористые породные блоки; $Q_{СК}$ – расход жидкой фазы на входе в трещину, м³/с; Q_K – расход жидкой фазы на выходе из трещины, м³/с.

Для инженерных расчетов желательно иметь зависимости в виде конечных выражений, приведение которых в соответствии с точным решением может быть выполнено введением переходных коэффициентов.

В случае плоскопараллельного течения

$$\eta = \frac{12k_{\Gamma}L^2[(P_K + P_{CK})/2 - P_0]}{\delta^3 \sigma h(P_{CK} - P_K) + 2k_{\Gamma}L^2/(3P_{CK} + 2P_K - 5P_0)}, \quad (5)$$

В случае осесимметричного течения

$$\eta = \frac{6k_{\Gamma}R_K^3[(P_K + P_{CK})/2 - P_0]}{\delta^3 \sigma h R_{CK}(P_{CK} - P_K) + k_{\Gamma}R_K^3(3P_{CK} + 2P_K - 5P_0)}, \quad (6)$$

где k_{Γ} – коэффициент поровой проницаемости горных пород, m^2 ; h – толщина фильтрующего слоя, m ; $L=R_K - R_{CK}$ – длина потока в трещине, m ; σ – объемная концентрация жидкой фазы в растворе; δ – раскрытие трещины, m ; P_0 – пластовое давление воды, $Па$; P_{CK} – давление на входе в трещину, $Па$; P_K – давление на выходе из трещины, $Па$; R_{CK} – радиус скважины, m ; R_K – радиус контура распространения раствора, m .

На рис. 1 и 2 в виде графиков приведены некоторые результаты расчетов степени отфильтровывания при плоскопараллельном и осесимметричном течении раствора в трещине при следующих исходных данных: $P_{CK} = 1 МПа$; $P_K = P_0 = 0$; $\delta = 1 \cdot 10^{-3} m$; $k_{\Gamma} = 0,2 \cdot 10^{-12} m^2 = 0,2 Д$; $\sigma = 1$, $R_{CK} = 0,075 m$; $R_K = 6,075 m$.

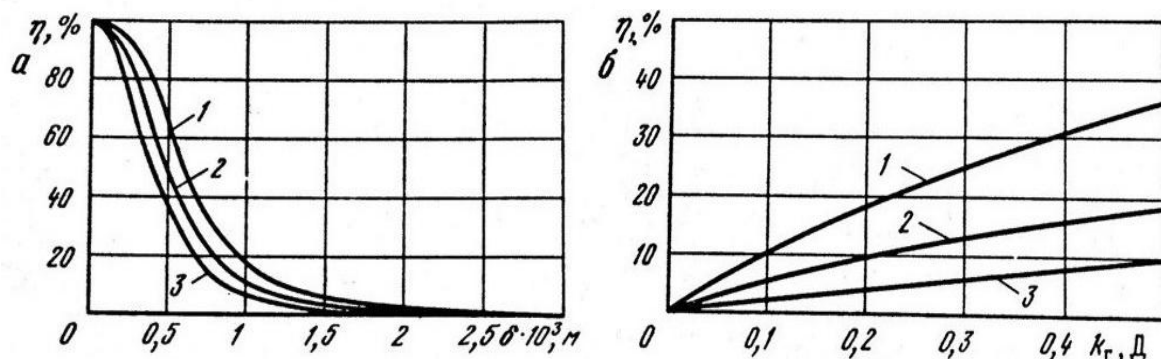


Рис.1. Зависимости степени отфильтровывания η жидкой фазы в поры горных пород от раскрытия трещин δ (а) и проницаемости k_{Γ} (б) при плоскопараллельной фильтрации: кривые 1,2, и 3 – при h соответственно 0,2; 0,5 и 1 м.

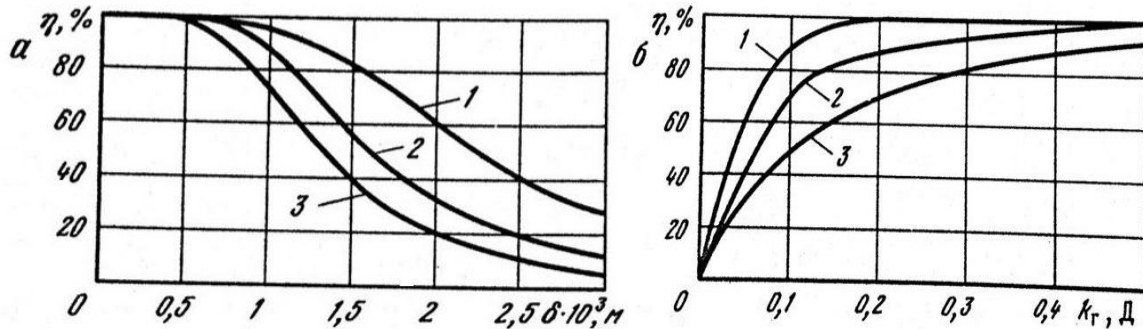


Рис.2. Зависимости степени отфильтровывания η жидкой фазы в поры горных пород от раскрытия трещин δ (а) и проницаемости $k_{Г}$ (б) при осесимметричной фильтрации: кривые 1,2, и 3 – при h соответственно 0,2; 0,5 и 1 м.

При рассмотрении 2-ой особенности тампонажа – седиментации цементных частиц, рассмотрено определение гидравлического сопротивления движению тампонажного раствора в трещинах. Анализ движения цементных растворов в трещинах горных пород показывает, что причиной заполнения трещин цементным материалом является осаждение цементных частиц. Существует некоторая минимальная скорость движения раствора $V_{КР}$, ниже которой начинается осаждение твердой фазы. Для получения критической скорости рассмотрено гидравлическое сопротивление движению тампонажного раствора в трещине. За основу принята методика исследования двухфазных мелкозернистых водоугольных суспензий. Предположено, что зависимость гидравлических сопротивлений от скорости имеет минимум. Этот минимум соответствует $V_{КР}$ и он означает, что ниже $V_{КР}$ происходит осаждение и сечение трещины начинает уменьшаться, а значит сопротивление резко возрастает. При исследовании этого минимума получили формулу для определения критической скорости

$$v_{КР} = k(g\delta)^{1/2} \left[\frac{V^2(\rho_{Ц} - \rho_{В})S^n}{6fgd_{СР}\rho_{В}} \right]^{3/7}, \quad (7)$$

где k – поправочный коэффициент, $k=1,25$; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; V – гидравлическая крупность цементных частиц, m/c ; $\rho_{В}$ и $\rho_{Ц}$ – соответственно плотность воды и цементных частиц, $кг/м^3$; S – массовая концентрация цементных частиц в растворе; f – коэффициент гидравлического сопротивления трещины движению воды; $d_{СР}$ – характерный размер цементных частиц, $м$; n – эмпирический показатель степени.

Для оценки третьей физической особенности – отфильтровывания жидкой фазы по длине потока предложена схема осесимметричного распространения тампонажного раствора в трещине среднего раскрытия δ

при постоянном расходе раствора (рис.3). Перенос цементных частиц в трещине возможен только при скорости больше критической, т.е. $V > V_{кр}$. При достижении раствором радиуса $R_{кр}$, соответствующего скорости $V_{кр}$, седиментация твердой фазы происходит в достаточно малой окрестности. В результате седиментации твердых частиц происходит отфильтровывание жидкой фазы из раствора по длине потока.

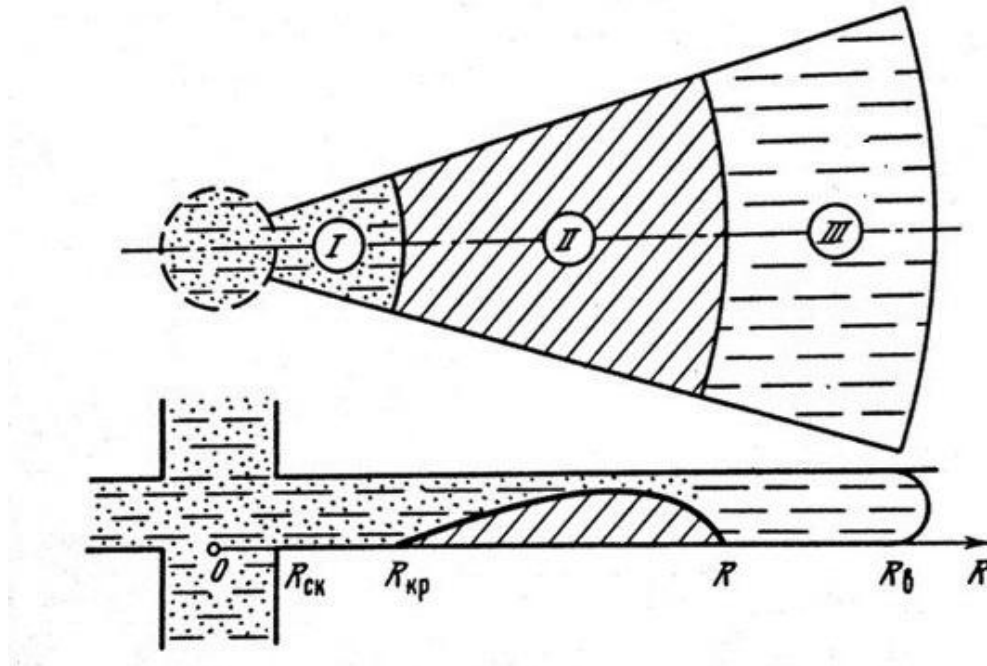


Рис. 3. Схема фильтрации:

I, II и III – зоны соответственно безосадочной фильтрации, осадкообразования и распространения отфильтровываемой жидкой фазы раствора

Введем в рассмотрение коэффициент отфильтровывания по длине потока раствора c_B , как отношение объема трещины в пределах зоны седиментации к объему трещины в пределах зоны седиментации и отфильтровавшейся жидкой фазы.

$$c_B = \frac{(\rho - \rho_B)(R/R_{кр} + 1)}{(\rho_{ос} - \rho_B)(R/R_{кр} + 1) + 2(\rho - \rho_{ос})}, \quad (8)$$

где $R_{кр}$ – радиус границы начала зоны седиментации, м; R – радиус границы осаждения твердой фазы (радиус цементации), м; R_B – радиус границы зоны отфильтровывания жидкой фазы, м; ρ – плотность раствора, кг/м³; $\rho_{ос}$ – плотность осевшей твердой фазы, кг/м³.

Анализ показывает, что величина коэффициента отфильтровывания по длине потока c_B изменяется от 0 до 1. Ноль будет тогда, когда отфильтровывание максимальное, а 1 – когда отфильтровывания вообще нет.

Рассмотрим случай значительного удаления раствора (границы зоны седиментации) R от границы начала зоны седиментации R_{KP} . Тогда значение коэффициента отфильтровывания по длине потока, согласно полученному выражению (8), будет

$$\lim_{R/R_{KP} \rightarrow \infty} c_B = (\rho - \rho_B) / (\rho_{OC} - \rho_B) \quad (9)$$

Рассмотрим случай незначительного удаления раствора R от границы начала зоны седиментации R_{KP} , $R \rightarrow R_{KP}$. Тогда, согласно выражению (8), в пределе коэффициент отфильтровывания будет равен 1. Если седиментация цементных частиц начинается непосредственно у скважины, т.е. величина R_{KP} одного порядка малости с величиной $R_{СК}$ (радиусом скважины), то при достаточном удалении границы седиментации от скважины значение коэффициента следует определять по формуле (9).

Выводы

Величина степени отфильтровывания η зависит в основном от геометрии области фильтрации (δ , L , l , h) и проницаемости горных пород (k_f), образующих трещины. Зависимость степени отфильтровывания от величины перепада давления $P_{СК} - P_K$ по длине трещины незначительна. При плоскопараллельном течении (нагнетание раствора в группу скважин) отфильтровывание жидкой фазы необходимо учитывать при величинах раскрытия трещин $\delta = (2 \div 3)10^{-3} \text{ м}$ и менее; наиболее резкое увеличение степени отфильтровывания наблюдается при уменьшении раскрытия трещин, начиная с величины $\delta = (1 \div 1,5)10^{-3} \text{ м}$. При осесимметричном течении (нагнетание раствора в одну скважину) в зависимости от конкретных условий степень отфильтровывания может быть в 2-8 раз больше по сравнению с плоскопараллельным. В этом случае отфильтровывание практически нужно учитывать, начиная с раскрытия трещин примерно $(6 \div 8)10^{-3} \text{ м}$ и менее.

Информация об интенсивности отфильтровывания жидкой фазы позволяет разработать мероприятия по учету этого явления, например, путем уменьшения концентрации раствора, проведения предварительной химической обработки цементируемого массива (приведения трещиновато-пористого массива к «чисто» трещиноватому) или другими способами [3,4].

Седиментация цементных частиц определяет степень заполнения трещин тампонажным материалом и определяет режим движения раствора при удалении от скважины.

При расчете размеров зоны формирования тампонажной завесы необходимо учитывать тот факт, что радиус распространения жидкой фазы раствора по длине потока может значительно превышать размер зоны формирования цементного осадка, поэтому в качестве радиуса цементации при расчетах необходимо принимать радиус границы зоны формирования цементного осадка.

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. – 400с.
2. Хямяляйнен В.А. Физико-химическое укрепление пород при сооружении выработок / В.А. Хямяляйнен, В.И. Митраков, П.С. Сыркин. – М.:Недра, 1996. – 352с.
3. Хямяляйнен В.А. Разрушение и тампонаж пород в сейсмически активных условиях метаноугольных месторождений / В.А. Хямяляйнен, В.В. Иванов, В.И. Мурко. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2014. – 256с.
4. Хямяляйнен В.А. Развитие инъекционных способов уплотнения массивов горных пород в Кузбассе / В.А. Хямяляйнен // Вестник КузГТУ. – Кемерово, 2015. - №5 (111). – С. 25-32.