



УДК 622.807

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОДВИЖНОСТЬ ЖИДКОСТИ В УГОЛЬНОМ ПЛАСТЕ



IMPACT OF VIBRATION ON MOBILITY LIQUIDS IN THE COAL SEAM

Павленко Михаил Васильевич

кандидат технических наук, доцент,
Национальный исследовательский
технологический университет (горный институт)
mihail_mggy@mail.ru

Pavlenko Mikhail Vasilyevich

Candidate of technical sciences,
associate Professor,
National research technological University
«Moscow Institute of steel and alloys»
(Mining Institute)
mihail_mggy@mail.ru

Аннотация. Использование вибрационного воздействия на трещиноватый низкопроницаемый угольный пласт для интенсификации процесса глубокой пропитки жидкостью в сочетании с проведенным предварительным гидровоздействием, что позволяет увеличить степень влагонасыщения угольного массива. В качестве исследовательской задачи автором был оценен физический механизм вибрационного воздействия на капилляры, заполненные жидкостью, который проявляется в том, что «вибрационная сила» действует в одном направлении с движущей силой капиллярного потенциала в сторону меньшего сечения поры. При этом используется энергия колебания на перемещение жидкости за счет амплитуды и частоты вибровоздействия в резонансном режиме для получения требуемого эффекта и реализации поставленной задачи.

Annotation. The use of vibration action on a fractured low-permeable coal seam to intensify the process of deep impregnation with a liquid in combination with the conducted preliminary hydro-action, which allows increasing the degree of moisture saturation of the coal mass. As a research task, the author evaluated the physical mechanism of vibration action on capillaries filled with liquid, which is manifested in the fact that the «vibration force» acts in the same direction as the driving force of the capillary potential towards a smaller pore section. In this case, the oscillation energy is used to move the liquid due to the amplitude and frequency of vibration in the resonant mode to obtain the desired effect and implement the task.

Ключевые слова: жидкость, частота, амплитуда, массив, капилляр, вибрация, образование, пористость.

Keywords: liquid, frequency, amplitude, array, capillary, vibration, formation, porosity.

В основу большинства способов воздействия на угольный пласт, с целью изменения его свойств (газоносность, влажность, трещиноватость и др.) и состояния составляет гидравлическое воздействие на угольный массив. В части использования рабочей жидкости в качестве внедрения текучего в пласт, является способ гидровоздействия на низкопроницаемый угольный пласта. После гидродинамического воздействия в угольном пласте появляется развитая сеть трещин, при этом пласт приобретает выраженные свойства блочно-трещиноватой среды. Процесс гидровоздействия на газонасыщенный низкопроницаемый угольный пласт требует достаточно высокой энергоемкости, причем основные затраты идут на преодоление сил инерции и упругости массива. На полезную работу по созданию трещин идет лишь малая часть затраченной энергии. Вибрационное воздействие является способом достаточно малой энергоемкости, открывающим новую возможность использовать инерционность и упругость самого горного массива, включая угольный пласт и вмещающие породы, изменяющим его реологические свойства.

Этот способ позволяет увеличить не только трещиноватость, но и увеличить газопроницаемость путем создания новых трещин и пор, перейти от ламинарной к турбулентной фильтрации жидкости. Главные качественные закономерности указанных процессов, происходящих в угольном массиве, группируются вокруг явления резонанса, дающего возможность согласованного, синхронного поведения такой сложной системы, как блочно-трещиноватый угольный массив.

В способ вибрационного воздействия входит комплекс решений по управлению влагонасыщением объема угля при движении жидкости по трещинам и порам. Как показывают данные многих экспериментов, решающая роль в глубокой, объемной пропитке угольного массива жидкостью принадлежит капиллярной пропитке. При этом важно знать связь объемов нагнетания жидкости и объемной пропитки угольного массива с его фильтрационными характеристиками и параметрами трещин и пор.

Скорость капиллярной пропитки играет существенную роль в насыщении вещества жидкостью и других пористых тел. Искривление свободной поверхности жидкости под действием внешних сил (например, вибрации) вызывает появление и распространение капиллярных волн.

Для смачивающих жидкостей поток жидкости направлен к мениску с меньшим радиусом кривизны (т.е. в сторону большего давления). Причиной капиллярного передвижения может быть не только градиент кривизны, но и градиент поверхностного натяжения жидкости.



Поскольку капиллярные силы возникают лишь при наличии поверхности раздела жидкой и газовой фаз, условия вещества в капиллярно-пористых телах, полностью и частично заполненных жидкостью, различны. При полном заполнении капилляров жидкостью перенос вещества осуществляется за счет массового движения, обусловленного разностью давлений на концах капилляра. Таким образом, на обоих менисках жидкости возникают противоположно направленные капиллярные потенциалы, не равные по абсолютной величине. В результате жидкость в капилляре приходит в движение под действием давления, которое продолжается до тех пор, пока потенциалы не выровняются (пока не наступит равенство $r_1 = r_2$). Это произойдет, когда мениск с r_2 достигнет узкого конца капилляра r_1 . Таким образом, происходит инициированное заполнение капилляров в пористых телах. Под действием внешних сил (вибровоздействие и т.д.) движение жидкости может усиливаться, продолжая движение по всей длине капилляра.

Для разработки основных параметров активных воздействий на угольный пласт, в частности усиления капиллярной пропитки пласта под вибровоздействием, оценим фильтрационные свойства угольного пласта в зонах гидровоздействия.

Так как для капилляров в угольном массиве характерна, прежде всего, кривизна поверхности жидкости в них, то естественно, что здесь больше всего сказывается влияние дополнительного давления, вызванного кривизной поверхности (давление Лапласа). Непосредственным следствием этого дополнительного давления является так называемый капиллярный подъем.

Эффект капиллярного переноса жидкости проявляется уже при радиусах капилляра менее 10 мкм. Даже при радиусе капилляра 50 мкм давление Лапласа не столь велико (984,96 Па), а при радиусе 500 мкм – совсем сходит на «нет» (98, 5 Па). Расчеты показывают, что капиллярное давление на мениске жидкости с радиусом капилляра 1 мкм равно 49248 Па (для сравнения: максимальное давление, развиваемое самым мощным на сегодняшний день вентилятором главного проветривания ВЦД 47,5У равно 9000 Па).

Вибрационное воздействие, особенно в резонансном режиме, на угольный пласт через скважину с поверхности направлено на более глубокое заполнение капилляров в пласте рабочей жидкостью гидровоздействия. В связи с этим в угольном пласте генерируются волновые поля. Одним из рациональных методов генерирования волнового поля является метод, основанный на вибрационном воздействии на внутрискважинную жидкость.

Рассмотрим физический механизм вибрационного воздействия на капилляры, заполненные жидкостью, и определим направление перемещения жидкости в капилляре. Для этого рассмотрим капилляр, заполненный смачиваемой жидкостью, в виде усеченного конуса с радиусами r_1 и r_2 . Произведем вибрационное воздействие на капилляр с частотой ν и амплитудой A . Условимся, что сила трения равна нулю, а другие силы уравновешены, поэтому нашу систему можно считать замкнутой, и ее полная энергия при движении не может измениться. Тогда потенциальная энергия жидкости U в поле сил тяжести при одном периоде колебания увеличится на:

$$U = \rho SgA^2, \tag{1.1}$$

где S – площадь сечения капилляра, ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения.

Пусть сечения капилляра по разным менискам смачиваемой жидкости будут S_1 (крайнее левое положение) и S_2 (крайнее правое положение) (рис. 1). В крайнем левом положении ($x = A$, где x – начало отсчета по координатной оси X , при котором центр тяжести жидкости находится в положении равновесия) потенциальная энергия равна $U_{\text{левое}} = \rho S_1 g A^2$. Кинетическая энергия в этот момент равна нулю, потому что нулю равна скорость движения жидкости. Значит, потенциальная энергия $U_{\text{левое}} = \rho S_1 g A^2$ – это полная механическая энергия системы в этот момент. Когда жидкость при своем движении окажется в крайнем правом положении ($x = -A$), его кинетическая энергия снова будет равна нулю и полная энергия системы опять равна потенциальной. А полная энергия не может измениться. Значит, она снова равна $U_{\text{правое}} = U_{\text{левое}} = \rho S_2 g A^2 = \rho S_1 g A^2$. Так как $S_2 > S_1$, это значит, что амплитуда смещения в крайнем правом положении меньше амплитуды смещения в крайнем левом положении (рис. 1). Следовательно, будет иметь место перемещение жидкости в сторону меньшего сечения за счет вибровоздействия.

В действительности, кроме сил вибрации будут еще действовать силы трения и капиллярного давления. Силы трения совершают отрицательную работу, а движущая сила капиллярного переноса жидкости действует в одном и том же направлении с силой виброперемещения и приведет к росту амплитуды, тем более что такая добавочная вибрационная сила (пусть даже небольшая) будет добавляться к давлению Лапласа каждый период колебания.

Глубокие изменения капиллярной пропитки угольного массива будут происходить в области резонансных частот, то есть совпадения вынуждающей силы вибровоздействия с собственной частотой колебания определенного участка угольного массива. Увеличение амплитуды колебаний в n раз приводит к возрастанию энергии колебательной системы в n^2 раз, что приводит к существенным энергетическим эффектам по сравнению с энергией возбуждения вибраций малой амплитуды и частоты.



Энергия вибрационного воздействия направлена на дальнейшее (после гидровоздействия) раскрытие трещин и продвижение жидкости вглубь массива по капиллярам более мелкого радиуса, то есть по капиллярам радиуса менее 10 мкм (область переходных и микропор), что и представляет собой сорбционный объем угля, который оставался малодоступным при применении гидровоздействия.

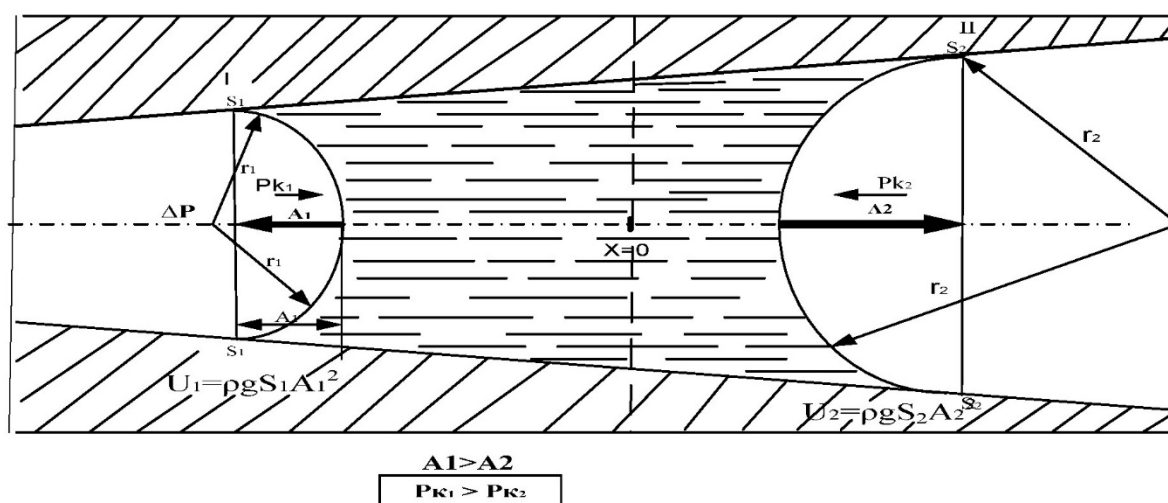


Рисунок 1 – Физический механизм вибрационного и капиллярного действий на перемещение жидкости

Расчётная разность капиллярных потенциалов, т.е. движущая сила переноса жидкости по капиллярам в угольном блоке является силой, перемещающей жидкость по капилляру против силы адгезии между жидкостью и стенками капилляра, и эта сила распределена вблизи поверхности капилляра. Таким образом, можно предположить, что скорость жидкости вблизи стенок капилляра имеет максимальное значение под действием вибрации и значительно превышает скорость в центре капилляра.

Процесс переноса газов и жидкости в капиллярах пористых тел отличается большим разнообразием механизмов, условий переноса, зависящих от движущей силы, а также от специфических свойств компонентов и размеров пор. Вибровоздействие на пласт активизирует не только капиллярное влагонасыщение угля, но и другие многие механизмы переноса жидкости и газов в пористых телах.

Как известно, в гладких цилиндрических капиллярах ламинарный режим течения сохраняется до критического значения критерия Рейнольдса ($Re = u d \rho / \eta$). При постоянных значениях зависит критерий Рейнольдса только от скорости течения жидкости вязкость η , плотность жидкости ρ и от диаметра капилляра d . Угли, как трещиноватое и пористое тело, имеют капилляры и поры различных диаметров, поэтому по ним течет с разными скоростями жидкость. Вследствие этого вместо скачкообразно перехода от ламинарного режима к турбулентному наблюдается плавное изменение режима течения жидкости. Кроме того, капилляры в углях имеют различную форму, а также шероховатость поверхности, разную извилистость, что в большой мере сказывается на режиме течения жидкости (критическое значение в этом случае Re снижается). Для реальных пористых тел оно изменяется в широких пределах, чаще всего этот диапазон меняется от 10 до 30, но может быть и меньше.

Способ вибровоздействия позволяет перейти от ламинарной к турбулентной фильтрации жидкости. Для пористо-трещиноватой структуры угольного массива, при ламинарном режиме потока в порах коэффициент проницаемости является постоянной величиной, характеризующей проницаемость данной пористой структуры. Изменяется и коэффициент проницаемости с изменением структуры угольно массива.

Как показали расчеты эффект капиллярного переноса жидкости проявляется при радиусах капилляра менее 10 мкм. Даже при радиусе капилляра 50 мкм давление Лапласа не столь велико (984,96 Па), а при радиусе 500 мкм – составляет всего 98, 5 Па. при этом капиллярное давление на мениске жидкости с радиусом капилляра 1 мкм равно 49248 Па.

Таким образом, физический механизм вибрационного воздействия на капилляры, заполненные жидкостью, проявляется в том, что «вибрационная сила» действует в одном направлении с движущей силой капиллярного потенциала (в сторону меньшего сечения поры), пополняя энергию на перемещение жидкости за счет амплитуды и частоты вибровоздействия. Энергия вибрационного воздействия направлена на дальнейшее (после гидровоздействия) раскрытие трещин и продвижение жидкости вглубь массива по капиллярам более мелкого радиуса, то есть по капиллярам радиуса менее 10 мкм (область переходных и микропор), что представляет собой сорбционный объем угля, который оставался малодоступным при применении заблаговременного гидровоздействия на низкопроницаемый газонасыщенный угольный пласт.



Литература

1. Чернов О.И., Черкасов В.С., Горбачев А.С. Движение жидкости в угольных пластах. – Новосибирск : Наука, 1981. – 129 с.
2. Pavlenko M.V. The Formation of zones of the coal fray volumetric impregnation as a result of the vibration impact. 23th International Conference Engineering Mechanics. – 2017. – Svratka. Czech Republik. 15–18 may 2017. – P. 758–761.
3. Павленко М.В. Обоснование технологии подготовки газоносного угольного пласта на базе комплексного воздействия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 3. – С. 91–97. – DOI: 10.25018/0236-1493-2018-3-0-91-97
4. Павленко М.В., Скопинцева О.В. О роли капиллярных сил при вибровоздействии на гидравлически обработанный газоносный угольный массив // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 3. – С. 43–50. – DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-43-50

References

1. Chernov O.I., Cherkasov V.S., Gorbachev A.S. liquid Movement in coal-fired ayers. – Novosibirsk : Nauka, 1981. – 129 p.
2. Pavlenko M.V. The Formation of zones of the coal fray volumetric impregnation as a result of the vibration impact. 23th International Conference Engineering Mechanics. – 2017. – Svratka. Czech Republik. 15–18 may 2017. – P. 758–761.
3. Pavlenko M.V. Substantiation of technology for preparing a gas-bearing coal seam on the basis of a complex impact // Mining information and analytical Bulletin. – 2018. – № 3. – P. 91–97. – DOI: 10.25018/0236-1493-2018-3-0-91-97
4. Pavlenko M.V., Skopintseva O.V. On the role of capillary forces in vibration action on a hydraulically processed gas-bearing coal array // Gorny information and analytical Bulletin (scientific and technical journal). – 2019. – № 3. – P. 43–50. – DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-43-50