

Полагаем $h = h_1$ и по формулам (3) вычисляем коэффициенты A_1 и B_1 . Затем по формуле (4) определяем a_1 - амплитуду колебаний в направлении уменьшения h для первого периода колебаний процесса уплотнения.

Тогда, за первый период колебаний изменение высоты слоя материала составит $\Delta h_1 = F_0 / (\rho h_1 \omega^2) - a_1$. В начале второго периода ($i = 2$) колебаний

$h_2 = h_1 - \Delta h_1$. Повторяя вычисления по формулам (3) и (4) определим

$\Delta h_2 = a_1 - a_2$, $h_3 = h_2 - \Delta h_2$ и т.д. Итерационный процесс продолжается до достижения времени $t = i/2\pi\omega$, равного времени разгрузки обезвоженного материала с сита грохота. Например, при частоте вращения дебалансного вала грохота 150 рад/с, средней скорости транспортирования материала при обезвоживании 0,1 м/с и длине участка сита, на котором обеспечивается собственно процесс виброуплотнения, равном 2 м, число итераций составит 3000.

Таким образом, на основании представления процесса обезвоживания суспензии на виброгрохоте, как процесса пульсирующего деформирования инерционного вязкопластического тела, предложена динамическая модель, отвечающая уравнению (1), в котором коэффициент вязкости K является функцией интенсивности вибрационного воздействия $A\omega^2/g$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. - М.: Наука, 1988. - 736 с.
2. Куннос Г.Я. Вибрационная технология бетона. - Л.: Стройиздат, 1967. - 168 с.
3. Гончаревич И.Ф., Фролов К.В. Теория вибрационной техники и технологии. - М.: Наука, 1981. - 320 с.
4. Савинов О.А., Лавринович Е.В. Вибрационная техника уплотнения и формирования бетонных смесей. - Л.: Стройиздат, 1986. - 280 с.

УДК 622.794

Е.Е. Гарковенко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СМАЧИВАЮЩЕЙ И НЕСМАЧИВАЮЩЕЙ ФАЗ В ПОРОВОЙ СРЕДЕ ОСАДКА

Наведено результати моделювання порового середовища мілких та тонких осадів та криві залежності капілярного тиску від насичення рідиною.

SIMULATION OF BOUNDARY MOVEMENT OF HYDROFILIC AND HYDROFOBIC PHASES IN POROUS MEDIA OF SEDIMENT

Results of porous media simulation and capillary pressure curves have been presented for fine sediments.

Наибольшие технологические трудности возникают при обезвоживании мелких и тонких осадков, т.к. такие материалы имеют высокоразвитую поверхность, активно взаимодействующую с водой. Кроме того, пористость и соответственно проницаемость этих сред как правило низкая. Обезвоживание таких осадков обычно выполняется в несколько стадий, чаще это сочетание механи-

ческого обезвоживания и термического. Последний процесс требует значительных энергетических затрат и является наиболее дорогостоящим и невыгодным с точки зрения экологической безопасности. Поэтому внимание многих авторов направлено на совершенствование первой стадии обезвоживания – различных механических методов, одним из которых является вакуумное фильтрование, с целью снижения влажности его продуктов и затрат на последующую сушку.

При обезвоживании мелких и тонких осадков в поровой среде протекают довольно сложные процессы, связанные с взаимодействием твердой, жидкой и газообразной фаз. Работы многих исследователей (Бейлин М.И., Карягина Н.В., Клешнин А.А., Майдуков Г.Л., Полулях А.Д., Fat I., Salter S. и др.) посвящены исследованию истечения жидкости и повышению скорости процесса фильтрования. В частности, установлены зависимости скорости фильтрации от свойств поровой структуры осадка, представляющие основу современной теории фильтрации. Теоретические и экспериментальные исследования влияния гранулометрического состава шламов на структурную характеристику порового пространства осадка и его проницаемость позволили исследовать изменение режима течения фильтрата в осадке. Кроме того, исследованиями было установлено сложное влияние газообразной фазы на процесс истечения жидкости. Было показано, что воздух, адсорбируясь на поверхности частиц, может находиться в каналах довольно долго, вызывая закупорку узких извилистых каналов в осадке. И эта закупорка более устойчива, чем мелкими частицами неправильной формы.

Изучение свойств осадков на микроуровне свидетельствует о необходимости продолжения исследований в этом направлении для более глубокого понимания сложных явлений, протекающих в этой среде. Поскольку процесс фильтрования имеет две основные фазы – собственно фильтрование и просушку осадка, когда в порах осадка происходит перемещение не только жидкой, но и газообразной фазы, особый интерес представляет исследование поведения этих фаз в каналах пористой среды.

Целью данной статьи является исследование перемещения границы раздела фаз «жидкость-газ» в порах осадка и определение условий насыщения этой среды влагой, т.к. именно сеть открытых каналов в осадке является магистралью для удаления влаги. Это позволит определить пути совершенствования процесса фильтрования.

Следует отметить, что именно переходная область от насыщенного влагой осадка до частично насыщенного, является наиболее интересной для исследования, т.к. здесь происходят главные обменные процессы, а также фазовые изменения многокомпонентной среды. Эти процессы являются сложными и характеризуются ярко выраженной неравновесностью и необратимостью.

Течение жидкости в капиллярах возможно только при условии, что хотя бы часть пор сообщается друг с другом, образуя проницаемые для жидкости капилляры. Определенный интерес представляет также исследование перемещения несмачивающей (газообразной) фазы в среде осадка.

При выполнении исследований поровая среда осадка представляется в виде разветвленной сети с чередованием узких протоков (каналов) и расширений (крупных пор). Такая модель успешно использовалась для моделирования кривых капиллярного истечения жидкости с применением теории просачивания [1].

Часть влаги удерживается капиллярными силами в тонких или в изолированных порах, не связанных с другими. Величина капиллярных сил зависит от кривизны поверхности раздела жидкой (смачивающей) и газообразной (несмачивающей) фаз. Пористую среду осадка можно представить в виде четочных капилляров, которые имеют переменное значение поперечного сечения. Упрощенный фрагмент такого четочного капилляра представлен на рис. 1.

Обычно принимают для упрощения, что капилляры имеют круглое сечение, приближающееся к окружности и характеризующееся радиусом. Вследствие того, что радиус капилляра является величиной переменной по длине капилляра и изменяется от минимального значения r до максимального R , наблюдается явление капиллярного гистерезиса.

При постепенном поступлении смачивающей фазы в четочный капилляр в сечении, имеющем максимальный радиус R , происходит мгновенное перемещение границы раздела смачивающей и несмачивающей фаз и остановка ее в сечении с минимальным радиусом r . Это явление связано с тем, что мениск, образующийся в наиболее узкой части капилляра, имеет большую кривизну и, следовательно, наименьшее капиллярное давление. При этом жидкая смачивающая фаза находится в наиболее энергетически выгодном равновесном положении. Такое состояние графически представлено на рис. 1а и 1б.

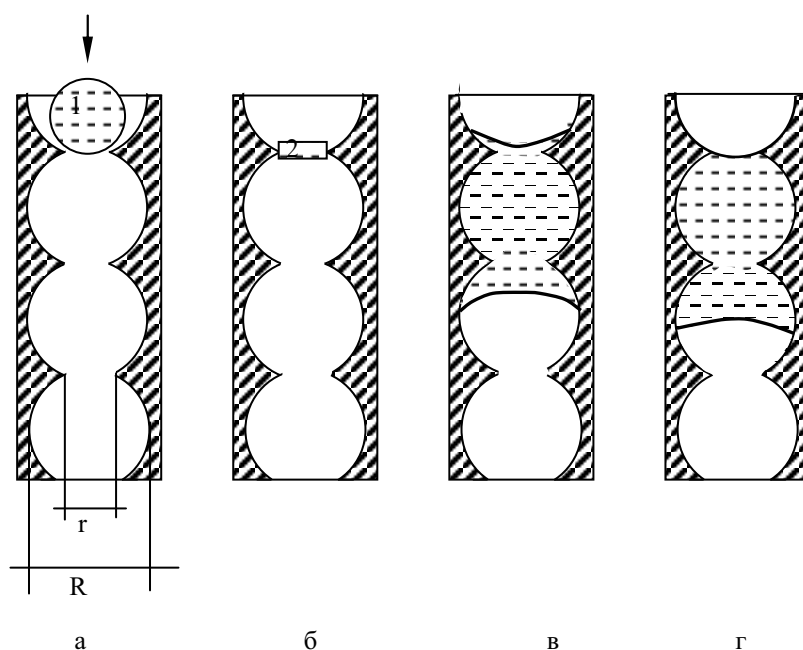


Рис. 1 – Перемещение границы раздела жидкой и газообразной фаз в поровой среде осадка

При дальнейшем увеличении количества смачивающей фазы, высота столбика жидкости будет повышаться, что повлечет за собой увеличение разности величин радиусов кривизны верхнего и нижнего менисков (см. рис. 1в). Дальнейшее перемещение границы раздела фаз будет наблюдаться в направлении приближения нижнего мениска к центру расширенного участка сечения капилляра с максимальным радиусом R .

При увеличении количества смачивающей фазы высота столбика в капилляре будет возрастать до тех пор, пока будет расти гидростатическое давление. Последнее будет равно разности капиллярных давлений в момент времени, когда верхний мениск смачивающей фазы будет находиться в самой узкой части капилляра с минимальным радиусом, а нижний – в наиболее широкой части капилляра с максимальным радиусом. Это состояние отображено на рис. 1г. При этом условии столбик смачивающей фазы будет перемещаться вниз (если капилляр не погружен в жидкую фазу) и вытекать из капилляра.

Выражение для капиллярного давления в верхней части четочного капилляра (состояние рис. 1г) имеет вид:

$$P = 2 \sigma \cos \theta / r, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение смачивающей (жидкой) фазы; θ – краевой угол смачивания.

Капиллярное давление в нижней части четочного капилляра при этом же состоянии будет определяться зависимостью:

$$P = 2 \sigma \cos \theta / R. \quad (2)$$

Разность капиллярных давлений, удерживающая жидкость в капилляре переменного сечения, составит:

$$P = 2 \sigma \cos \theta (1/r - 1/R) \quad (3)$$

При сравнении свойств цилиндрических и четочных капилляров с точки зрения изменения капиллярного давления было установлено, что в цилиндрическом канале капиллярное давление выше на 25%.

Ряд исследователей отмечают, что изучение свойств четочных капилляров позволяет приблизиться к пониманию некоторых явлений, происходящих в реальных сложных пористых средах [2].

Обычно капиллярность представляют как функцию фазового насыщения поровой среды. При этом предполагается, что поверхность раздела смачивающей и несмачивающей фаз движется в теле пор постепенно.

Мениск раздела фаз быстро и резко перемещается только в том случае, когда оказывается в трубках и в телах меньших пор, которые связаны с поверхностью раздела при условии, когда капиллярное давление достаточно мало и уравнение Янга-Лапласа удовлетворяется (см. рис. 1).

В связи с тем, что при увеличении радиуса расширения поры капиллярное давление уменьшается, поверхность раздела жидкой и газообразной фаз перемещается из позиции 1 в позицию 2 (см. рис. 1).

Из уравнения Лапласа радиус поры a определяется как:

$$a = 2 \sigma \cos \theta / P, \quad (4)$$

В том случае, когда радиус тела поры r равен значению a , пора заполнится полностью.

Моделирование поровой среды проводилось с помощью дискретных элементов в постановке плоской деформации. Поровая среда задавалась набором частиц дискообразной формы разного диаметра от 0,01 до 0,30 мм. Частицы укладывались в прямоугольную форму, имеющую отверстие в основании (рис. 2). Вначале частицы нагружались собственным весом, а к границам прикладывалось давление, обусловленное его перепадом при создании вакуума порядка 40-70 КПа. Частицы имели возможность взаимодействовать. Это взаимодействие описывалось вторым законом Ньютона и законом Гука. Упругие характеристики частиц принимались эквивалентными углю средней степени метаморфизма.

После достижения равновесия в нижней стенке формы открывались несколько отверстий размером 0,26 мм. В результате тонкие частицы под действием перепада давления устремлялись в сторону отверстий, что порождало поток фильтрата в теле поровой среды.

По мере перераспределения частиц возникала ситуация, когда над отверстием пористой перфорированной перегородки формировались устойчивые своды, после чего наступало примерное равновесие поровой среды.

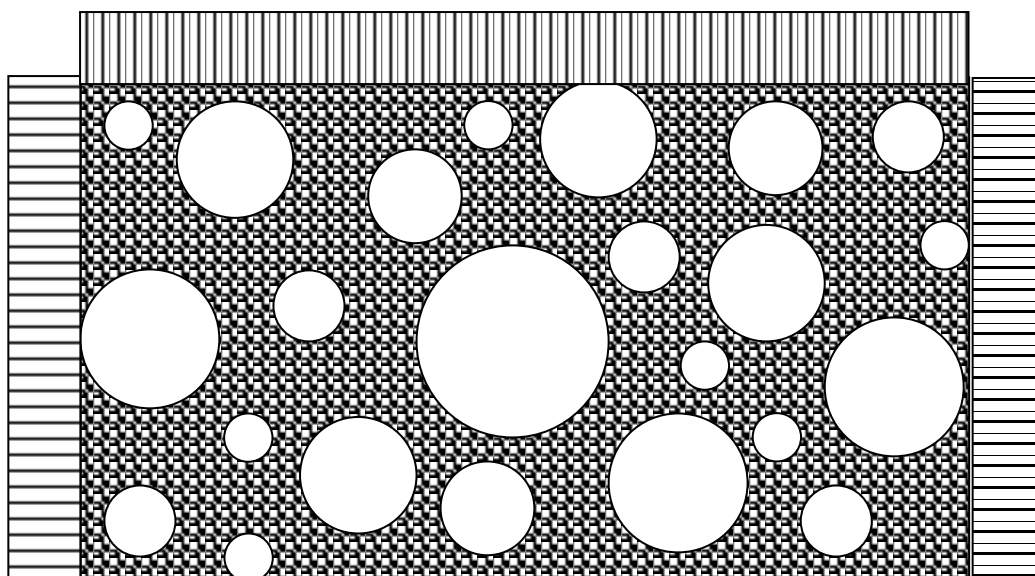


Рис. 2 – Исходная модель фильтруемой суспензии флотоконцентрата

При этом некоторые частицы еще перемещались в сторону отвода фильтрата, однако относительно крупные зерна заклинивались в пределах устойчивого свода и фильтрование в целом прекращалось. При достаточно длительном времени моделирования случались моменты, когда локальное равновесие нарушалось и вокруг отдельного отверстия в пористой перегородке процесс фильтрования на некоторое время возобновлялся. Затем после некоторого перераспределения частиц снова возникал устойчивый свод и т.д.

Такое поведение поровой среды достаточно хорошо отражает реальное поведение шламовых продуктов при их фильтровании. Поэтому полученные результаты могут быть использованы для анализа сложных гидродинамических процессов, протекающих при фильтровании тонких осадков.

В процессе проведения моделирования в файл результатов выводились давления на контактах частиц и их текущие координаты. По этим данным можно было определить размер зазоров между частицами, и таким образом связать размеры капилляров с капиллярным давлением.

На основании моделирования насыщения поровой среды тонкого песка получены зависимости капиллярного давления от насыщения водой [3], приведенные на рис. 3.

Анализ приведенных данных позволяет заключить, что с уменьшением размера пор и, соответственно, проницаемости поровой среды одно и то же значение капиллярного давления может быть получено при более высокой степени насыщения поровой среды влагой. Кроме того, характер кривых также изменяется.

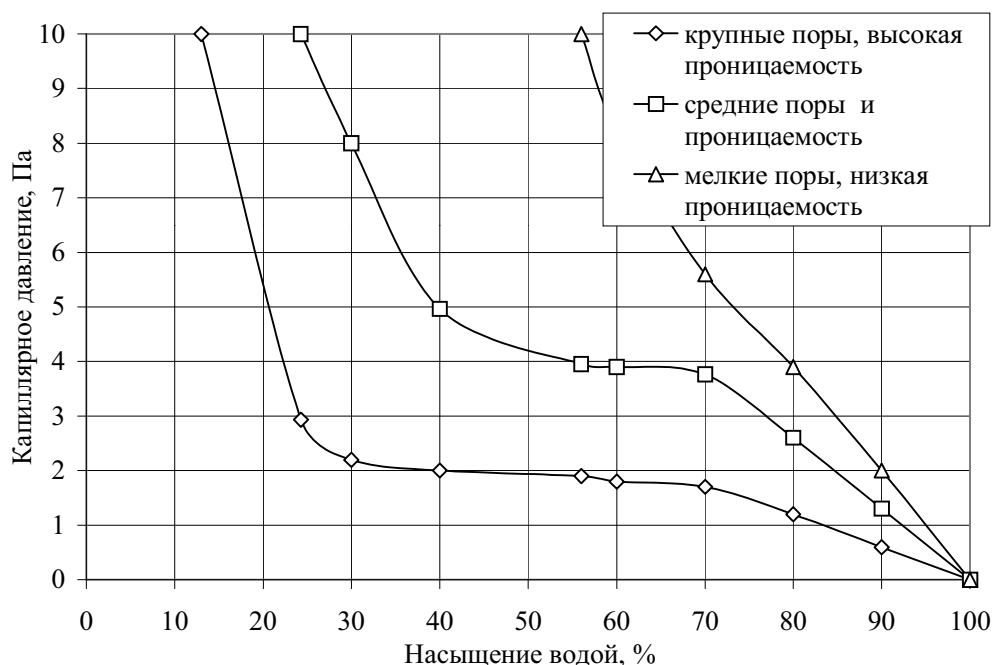


Рис. 3 - Изменение капиллярного давления при различном насыщении поровой среды осадка водой

Для среды с более крупными порами при увеличении насыщения влагой капиллярное давление снижается с более высокой скоростью до степени насыщения около 20%. В этой точке кривая имеет перегиб, и дальнейшее снижение капиллярного давления происходит очень медленно.

Для среды с низкой проницаемостью и преобладанием мелких пор капиллярное давление снижается практически равномерно, и этот процесс начинается примерно при 55% насыщения поровой среды.

Можно предположить, что критерием изменения вида кривых является некоторое значение проницаемости данной поровой среды. Аналогичные данные получены и другими исследователями [4].

Установленные закономерности имеют важное значение с практической точки зрения. Так в зависимости от диаметра капилляров, которые определяются грансоставом твердой фазы, перепадом давления при фильтровании, режимом фильтрования и другими факторами, у определенных осадков существуют рациональные пороговые значения влажности. Ниже этих пороговых значений доводить влажность нецелесообразно, поскольку приращение времени фильтрования не оправдывается соответствующим ему падением влажности. Важно то, что пороговым значением влажности можно управлять, создавая такие режимы фильтрования, при которых обеспечивается выгодное перераспределение частиц и создаются условия для растяжки рациональных режимов фильтрования. Один из перспективных подходов для создания таких режимов основан на динамическом изменении структуры поровой среды в процессе ее фильтрования.

Для практических целей обезвоживания более существенным является не только изучение и исследование процессов, происходящих в отдельных порах и каналах поровой среды, но и рассмотрение перемещения фронта поверхности раздела фаз в целом, т. е. интегральный подход.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bryant S., King P. R., Mellor D. W. Network model evaluation of permeability and spatial correlation in a real random sphere packing. *Transport in Porous Media*, 11, 1993. – p. 53–70.
2. Бейлин М.И. Теоретические основы процессов обезвоживания углей. М.: Недра. – 1969 – 236 с.
3. Гарковенко Е.Е., Назимко Е.И., Самойлов А.И., Папушин Ю.Л. Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов. Донецк: Норд-Пресс. – 2002. – 266 с.
4. Yang G., Myer L. R. Object-Oriented Analysis of Network Flows at Por and Reservoir Scales. *ISRM International Symposium 36th U.S. Rock Mechanics Symposium June 29 – July 2, 1997. New York.*
5. Lockhart N. C., Veal C.J. Coal dewatering: Australian R&D trends//Coal preparation? 1996? Vol. 17, pp. 5-24.