

Е.И. НАЗИМКО, д-р техн. наук,

В.Г. НАУМЕНКО, асс.

(Украина, Донецк, Донецкий Национальный Технический Университет)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ ОСАДКОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Повышение эффективности обезвоживания тонкодисперсных осадков достигается за счет увеличения скорости удаления жидкости, снижения конечной влажности материала и производственных площадей, занимаемых оборудованием, на котором выполняется обезвоживание, повышения производительности аппаратов, уменьшения их стоимости и в целом затрат на процесс [1]. Многими исследованиями, которые проводились ранее и продолжают выполняться и в настоящее время, установлены направления совершенствования механического обезвоживания путем добавления к пульпе поверхностно-активных веществ, прогрева осадка паром, продувания сжатым воздухом, добавкой специальных присадок, механического воздействия на осадок и другими методами [2-4].

Анализ исследований и публикаций. В ходе исследований установлено, что наименее расходным по денежным средствам является приложение к поровой среде осадка механического воздействия различного вида. В основном наиболее эффективно использование вибрации и сдвиговых деформаций [5, 6].

Для исследования сложных процессов, происходящих в порах осадка при протекании жидкости в них, используют не только аналитические методы. В современных условиях с бурным развитием компьютерных технологий появилась возможность широко применять численные методы моделирования, которые позволяют более детально изучать многие явления. Один из таких методов использован в данной работе.

Постановка задачи. Цель работы – имитационное моделирование изменения свойств поровой структуры осадков при механическом воздействии.

Изложение материала и результаты. В соответствии с разработанной методикой [3] частицы в осадке представляются в виде сферических элементов, которые взаимодействуют друг с другом. В основу численного моделирования положены базовые разработки, опубликованные в работе [7].

Пористость зернистых сред зависит также от способа укладки частиц в такой среде. Крайними случаями укладки являются кубическая (ортогональная) и гексагональная. В первом случае частицы располагаются строго по вертикальным и горизонтальным рядам. Линии, соединяющие центры тяжести элементов, расположены под прямым углом друг к другу. Такая укладка одномерных сферических частиц обеспечивает максимальную пористость и наибольший размер каналов между частицами. При гексагональной укладке каждый ряд сферических элементов смещается относительно предыдущего так,

что элементы занимают углубления между соседними элементами нижнего или верхнего ряда. В таком случае линии, соединяющие центры тяжести элементов, располагаются под углом 60° друг к другу. Пористость и размер каналов между частицами при таком расположении одноразмерных сферических элементов минимальны.

Соответственно, если между сферическими крупными элементами расположить более мелкие, пористость такой среды уменьшится.

Для исследования изменения свойств осадков при механическом воздействии на частицы были рассмотрены различные варианты их упаковки с помощью имитационной компьютерной модели [7].

На рис. 1 представлен исходный вид осадка, состоящего из одноразмерных частиц с кубической упаковкой, и его изменение при сдвиге.

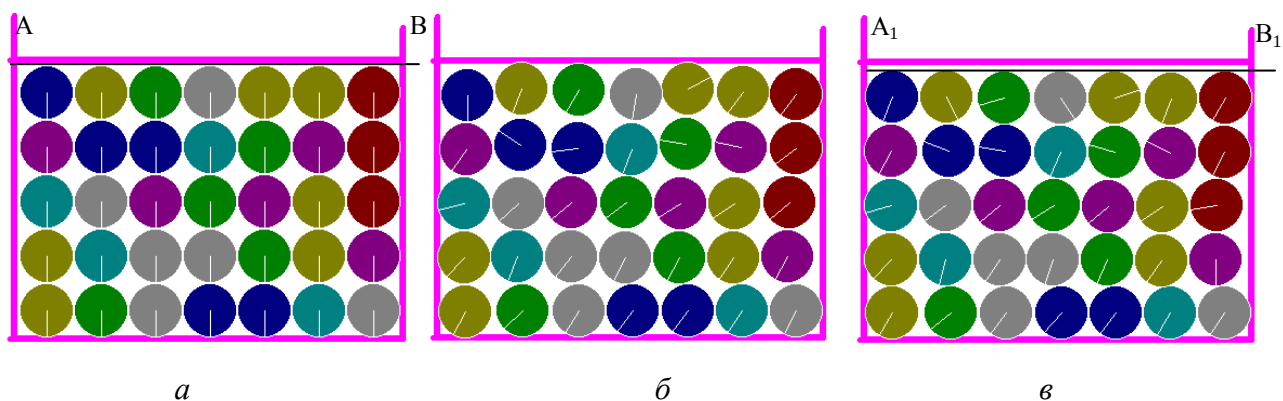


Рис. 1. Изменение состояния одноразмерного осадка, полностью заполняющего сосуд, при механическом воздействии: *a* – исходное состояние, *б* – 7с, *в* – конечное состояние через 14с

Частицы находятся в замкнутом сосуде, элементы в начальных условиях неподвижны. В механике горных пород такие осадки с кубическим (ортогональным) расположением частиц рассматриваются как недоконсолидированные, т.е. неуплотненные [8]. Во всех имитационных экспериментах сохраняются одни и те же исходные параметры элементов. При обработке анимаций выдерживается постоянный масштаб. Анимации скопированы с экрана монитора с шагом через задаваемое количество итераций.

Перемещение верхнего ряда вправо вызывает вращение и взаимодействие всех элементов, что видно по изменению угла поворота радиусов частиц. В результате этого возникает перестройка расположения частиц за счет их поворота и изменение порового пространства осадка с некоторым его уплотнением, о чем свидетельствует изменение положения линии АВ на A_1B_1 с образованием зазора между верхним рядом и крышкой сосуда. Анализ цифровых файлов позволил получить значение этого уплотнения, находящееся в пределах 1,99-3,7 относительных единиц. Ниже приведен анализ для всех рассмотренных типов осадков.

На рис. 2 представлен разноразмерный осадок с кубической упаковкой частиц, к которому так же было приложено механическое воздействие. Такой

осадок имеет низкую пористость из-за заполнения промежутков между крупными частицами более мелкими. Каналы между частицами имеют меньший размер.

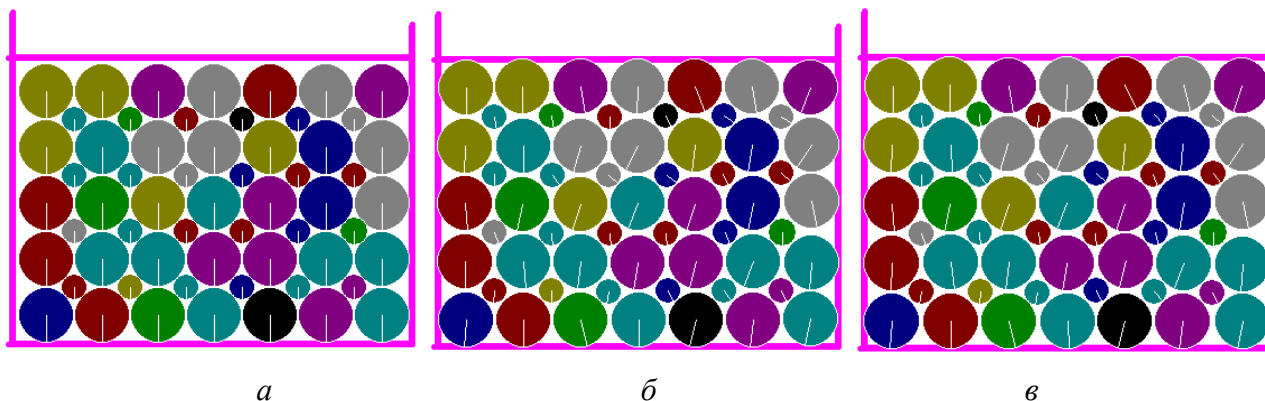


Рис. 2. Изменение состояния разноразмерного осадка при механическом воздействии с течением времени: *а* – исходное состояние, *б* – 7с, *в* – 14с

На рис. 3 представлен осадок с гексагональной упаковкой, состоящий из одноразмерных частиц.

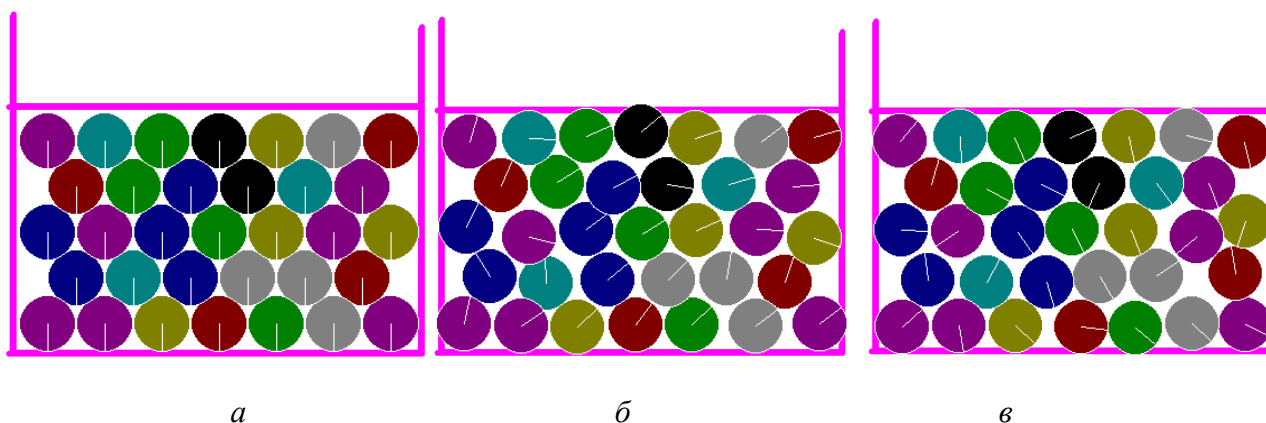


Рис. 3. Одноразмерный осадок гексагональной упаковки при механическом воздействии: *а* – исходное состояние, *б* – через 7с, *в* – конечное состояние через 14с

Из анимаций можно сделать вывод о наличии некоторого разуплотнения осадка при механическом воздействии и образовании более крупных каналов в осадке по сравнению с исходным состоянием.

На рис. 4 показаны результаты имитационного моделирования изменения состояния осадка с разноразмерными частицами, расположенными в виде гексагональной упаковки. В механике горных пород такие осадки относятся к переконсолидированным, т.е. уплотненным. Осадки в таком состоянии имеют самую низкую пористость и соответственно размер каналов в поровой среде осадка также минимальный.

Из анимаций следует вывод о том, что для переконсолидированных осадков приложение механического воздействия положительно сказывается на изменении поровой структуры осадка. При этом происходит переформирование

каналов, по которым может удаляться жидкость, освобождаются тупиковые ловушки, увеличивается размер каналов и как следствие повышается эффективность обезвоживания.

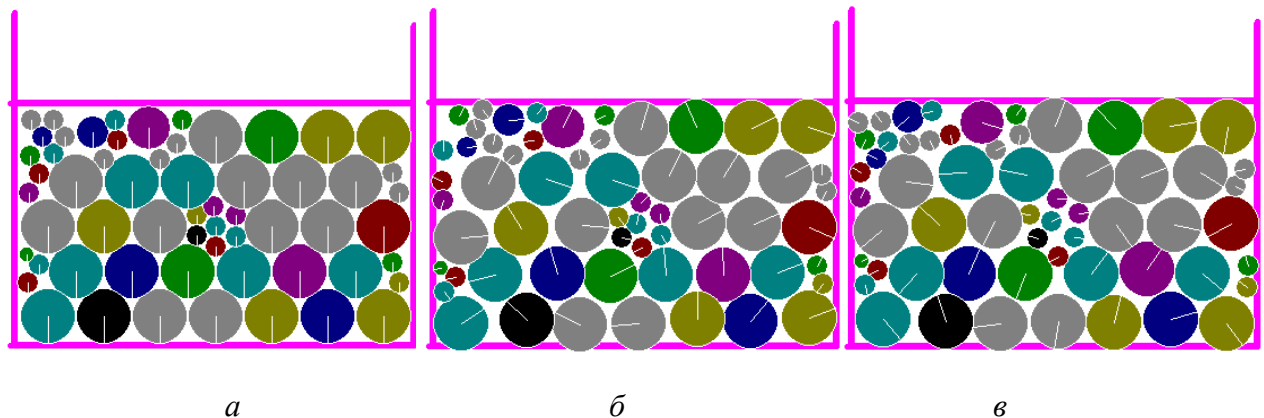


Рис. 4. Изменение состояния разноразмерного осадка при механическом воздействии с течением времени: *а* – исходное состояние, *б* – 7с, *в* – конечное состояние через 14с

Анализ имитационных экспериментов позволил получить численные значения для изменения состояния поровой среды осадка в случае приложения к нему механического воздействия. Для анализа использованы данные цифровых файлов, получаемых в результате работы программы, в которых содержатся координаты центра тяжести элементов. В расчете сравнивались ординаты элементов, находящихся в верхнем ряду в сосуде. Результаты расчетов изменения состояния осадков и их поровой структуры при механическом воздействии для различных типов осадков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика осадка	Цикл счета	Номер элемента верхнего ряда и ордината его центра тяжести, условных единиц									
		№5	№6	№7	№13	№17	№18	№23			
Одноразмерный, кубическая упаковка	1	180	180	180	180	180	180	180			
	1400	182,9	182,0	182,5	183,7	182,7	183,2	182,6			
	разница	2,93	1,99	2,46	3,73	2,69	3,15	2,63			
Разноразмерный, гексагональная упаковка	1	№8	№13	№18	№29	№45	№52	№53	№57	№58	№59
	1400	220	220	220	220	205	212	216	205	205	205
		213,2	212,7	214,1	211,2	208,5	208,9	203,9	198,7	202,0	208,6
	разница	-6,85	-7,34	-5,91	-8,79	3,49	-3,13	-12,07	-6,30	-3,03	3,62
Разноразмерный, кубическая упаковка	1	№5	№14	№23	№32	№55	№56	№57	№5	№14	№23
	1400	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
		174,7	174,3	174,4	174,4	174,8	174,4	174,6	174,7	174,3	174,4
	разница	-5,28	-5,69	-5,57	-5,61	-5,23	-5,58	-5,38	-5,28	-5,69	-5,57

При этом следует напомнить, что ось ординат в модели направлена сверху вниз. Следовательно, увеличение значения ординаты центра тяжести элемента Y свидетельствует о его перемещении вниз, что приводит к уплотнению осадка. Соответственно, уменьшение значения Y показывает, что данный элемент смещается при взаимодействии с другими элементами вверх, что влечет за собой изменение поровой структуры осадка в сторону разуплотнения и повышения размера каналов между частицами. В конечном итоге увеличивается пористость осадка и облегчается удаление жидкости из него.

Данные табл. 1 позволяют установить, что при приложении механического воздействия неплотные и несколько уплотненные, но недоконсолидированные осадки, к которым относятся одноразмерные осадки с кубической упаковкой, уплотняются, т.к. приращение ординаты имеет положительное значение. Разноразмерные осадки, т.е. переконсолидированные, имеющие поровую структуру с более низкой пористостью по сравнению с одноразмерными, в целом разуплотняются, т.к. приращение ординаты имеет отрицательное значение. Следовательно, для переконсолидированных осадков приложение сдвига имеет положительное влияние на процесс фильтрации.

Для всех исследованных разновидностей осадков рассчитаны пористость и коэффициент пористости, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика осадка		Пористость, m	Коэффициент пористости, ε
Кубическая упаковка	Одноразмерный	0,248	0,331
	Разноразмерный	0,129	0,148
Гексагональная упаковка	Одноразмерный	0,160	0,191
	Разноразмерный	0,124	0,142

Пористость m определялась как отношение объема пор к объему, занимаемому осадком, по соотношению:

$$m = (V_1 - V_2) / V_1, \quad (1)$$

где V_1 и V_2 – объем, занимаемый осадком, и объем твердых частиц, соответственно.

Коэффициент пористости ε представляет собой отношение объема пор к объему твердых частиц [8]:

$$\varepsilon = (V_1 - V_2) / V_2. \quad (2)$$

Из данных табл. 2 видно, что наименьшей пористостью обладает разноразмерный осадок гексагональной упаковки - 0,124. В случае кубической упаковки разноразмерных частиц пористость осадка приближается к пористости осадка с гексагональной упаковкой и составляет 0,129. Коэффициенты пористости также имеют близкие значения для указанных осадков, т.к. эти величины взаимосвязаны. Одноразмерный осадок с

гексагональной упаковкой имеет несколько большую пористость по сравнению с указанными выше. Максимальной пористостью обладает одномерный осадок с кубической упаковкой – 0,248.

Выводы и направления дальнейших исследований. Проведенные имитационные исследования с помощью численных методов, в частности метода дискретных элементов, позволили установить следующее. С точки зрения процесса фильтрования и обеспечения минимальной конечной влажности осадка разноразмерные плотно упакованные в сосуде осадки представляют наибольшую трудность. Установлено положительное влияние механического воздействия в виде сдвига на переконсолидированные осадки, которое приводит к разуплотнению осадков и увеличению каналов между частицами. Это будет способствовать повышению эффективности удаления влаги из осадка.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на определение влияния скорости перемещения верхнего ряда частиц (скорости сдвига) на скорость фильтрации.

Список литературы

1. Брук О.Л. Фильтрование угольных суспензий. М.: Недра, 1978. – 272с.
2. Bourgeois F. Morphological Analysis and Modelling of Fine Coal Filter Cake Microstructure / F. Bourgeois, G. Lyman // *Chemical Engineering Science*, 52/7, 1151-1162 (1997).
3. Nazimko L.I. & al Kinetics of Phases Interaction during Mineral Processing Simulation / L.I. Nazimko, E.E. Garkovenko, A.N. Corchevsky & al // *Proceedings of XV International Congress of Coal Preparation. - China. - 2006.- p. 785-798.*
4. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. М.: Химия. – 1980. – 398с.
5. Гарковенко Є.Є. Особливості нормальних деформацій ущільнених осадів при активізації об'ємного зсуву / Є.Є. Гарковенко // Вісник Криворізького технічного університету. – 2005. - вип.7. - С. 89-93.
6. Надутый В.П. Результаты исследований равновесного состояния жидкости в ячейке сита обезвоживающего грохота / В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко, И.П. Хмеленко // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця. – 2009. – Вип. 3(55). – С. 77-80.
7. Гарковенко Е.Е. и др. Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов. / Е.Е. Гарковенко, Е.И. Назимко, А.И. Самойлов и др. Донецк: Норд-Пресс. – 2002. – 266 с.
8. Петраков А.А., Яркин В.В., Таран Р.А., Казачек Т.В. Учебное пособие по курсу "Механика грунтов". – Макеевка: ДонНАСА. – 2004. – 164 с.

*Рукопись поступила в редколлегию 20.03.12
Рекомендована к опубликованию д.т.н. Полуляхом А.Д.*