

Е.И. НАЗИМКО, д-р техн. наук,

В.Г. НАУМЕНКО

(Україна, Донецьк, Донецький національний технічний університет)

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, прогревания 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 одноразмерных сферических частиц обеспечивает максимальную пористость и наибольший размер каналов между частицами. При гексагональной укладке каждый ряд сферических элементов смещается относительно предыдущего так, что

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

елементы 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.

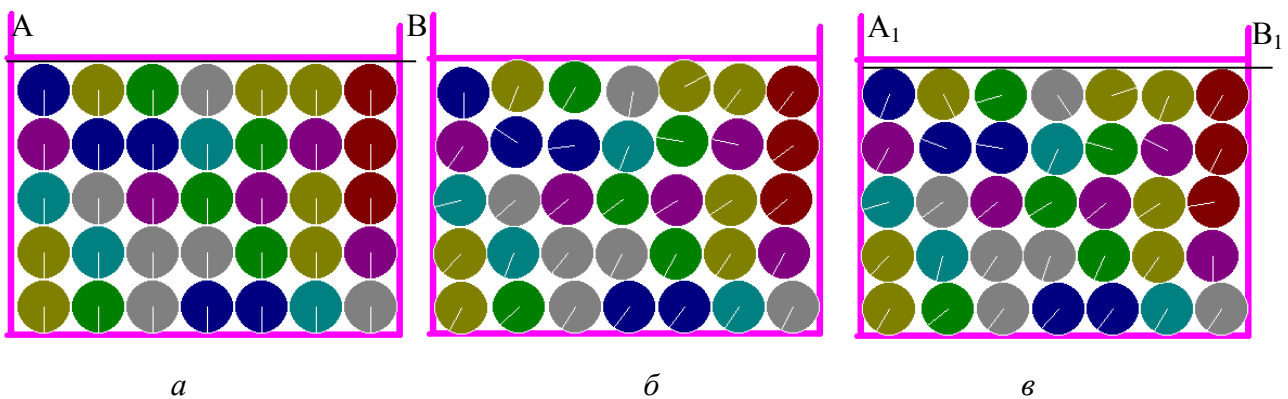


Рис. 1. Изменение состояния одноразмерного осадка, полностью заполняющего сосуд, при механическом воздействии: *а* – исходное состояние, *б* – 7 с, *в* – конечное состояние через 14 с

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 поддерживается 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

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

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

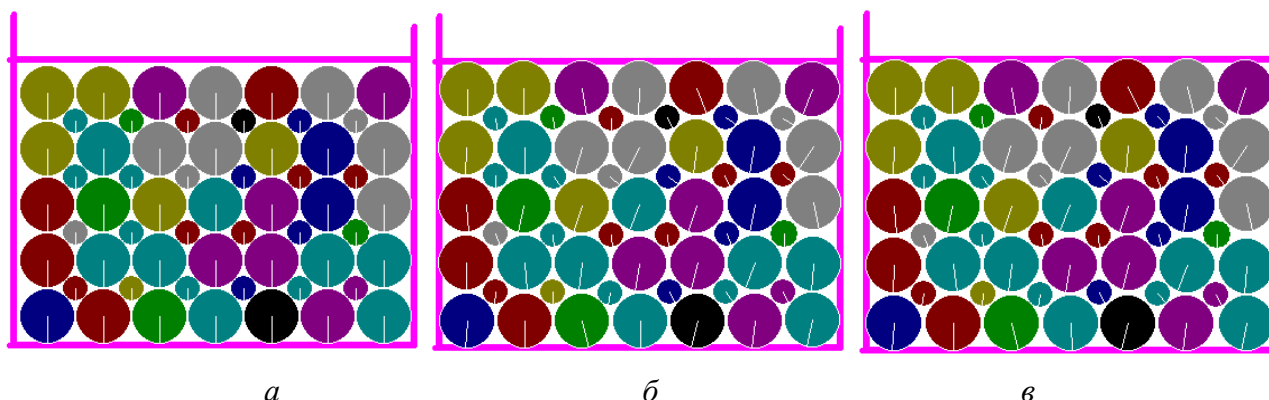


Рис. 2. Изменение состояния разноразмерного осадка при механическом воздействии с течением времени:
a – исходное состояние, *б* – 7 с, *в* – 14 с

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

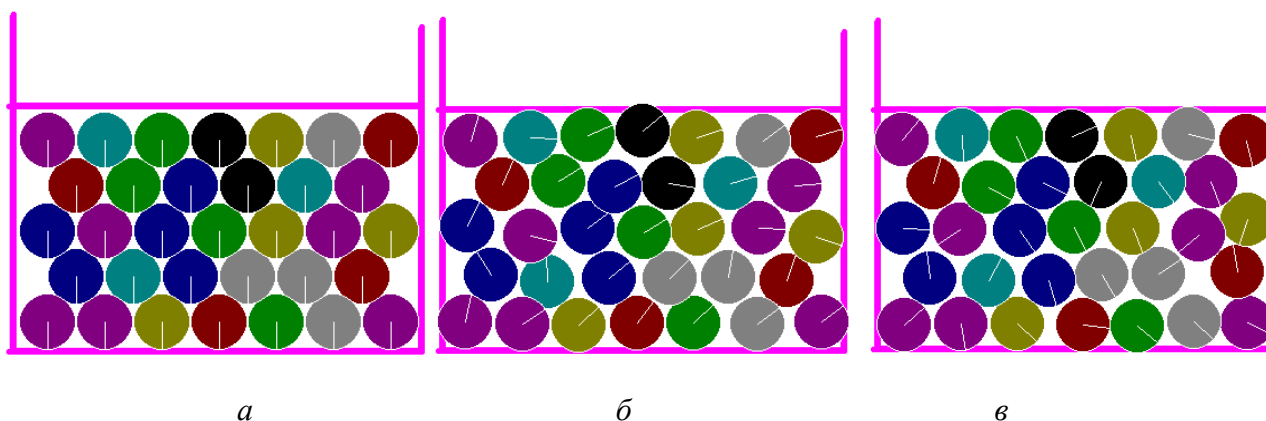


Рис. 3. Одноразмерный осадок гексагональной упаковки при механическом воздействии:
a – исходное состояние, *б* – через 7 с, *в* – конечное состояние через 14 с

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 из-

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

мененні порової структури осада. При цьому відбувається переформування каналів, по яким може удалятися рідина, звільнюються тупикові ловушки, збільшується розмір каналів і як наслідок підвищується ефективність обезводжування.

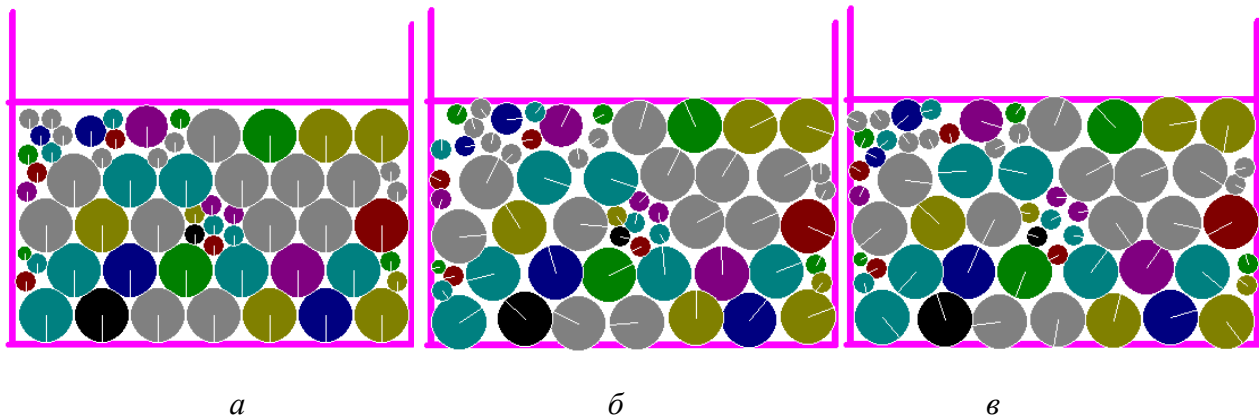


Рис. 4. Зміна стану різномірного осаду при механічному впливі з течією часу:
a – початковий стан, *б* – 7 с, *в* – кінцевий стан через 14 с

Аналіз імітаційних експериментів дозволив отримати чисельні значення для зміни стану порової середовища осаду в разі застосування до нього механічного впливу. Для аналізу використані дані цифрових файлів, отриманих в результаті роботи програми, в яких містяться координати центру тяжкості елементів. В розрахунок порівнювалися ординати елементів, що знаходяться в верхньому ряду в посуді. Результати розрахунок зміни стану осадків і їх порової структури при механічному впливі для різних типів осадків наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика осада	Цикл счета	Номер елемента верхнего ряда и ордината его центра тяжести, условных единиц									
		№5	№6	№7	№13	№17	№18	№23			
Однораз-мерный, 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			
Разнораз-мерный, гексагональная упаковка	1	220	220	220	220	205	212	216	205	205	205
	1400	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
Разнораз-мерный, кубическая упаковка	1	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
	1400	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

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

У свідетельствує о його перемещенні вниз, що приводить до ущільненню осаду. Соответственно, зменшення значення Y показує, що даний елемент зміщується при взаємодії з іншими елементами вгору, що втягує за собою змінення порової структури осаду в сторону розуплотнення і підвищення розміра каналів між частинками. В кінцевому ітогу збільшується пористість осаду і облягчається видалення рідини з нього.

Данні табл. 1 дозволяють встановити, що при приложенні механічного впливу неплотні і декілька ущільнені, але недоконсолідовані осадки, до яких відносяться однорозмірні осадки з кубічної упаковки, ущільнюються, т.к. приращення ординати має позитивне значення. Рознорозмірні осадки, т.е. переконасолідовані, які мають порову структуру з більш низькою пористістю по порівнянню з однорозмірними, в цілому розуплотнюються, т.к. приращення ординати має негативне значення. Следователно, для переконасолідованих осадків приложення сдвигу має позитивне впливання на процес фільтрації.

Для всіх дослідованих різновидностей осадків розраховані пористість і коефіцієнт пористості, представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристика осаду		Пористість, m	Коефіцієнт пористості, ε
Кубічна упаковка	Однорозмірний	0,248	0,331
	Рознорозмірний	0,129	0,148
Гексагональна упаковка	Однорозмірний	0,160	0,191
	Рознорозмірний	0,124	0,142

Пористість m визначається як відношення об'єму пор до об'єму зернистої середовища по співвідношенню:

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

де V_1 і V_2 – об'єм, займає зернистою середовищем, і об'єм твердих частинок, відповідно.

Коефіцієнт пористості ε представляє собою відношення об'єму пор до об'єму твердих частинок [8]:

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

Из даних табл. 2 видно, що найменшою пористістю володіє рознорозмірний осадок гексагональної упаковки – 0,124. В випадку кубічної упаковки рознорозмірних частинок пористість осаду наближається до пористості осаду з гексагональною упаковкою і становить 0,129. Коефіцієнти пористості також мають близькі значення для вказаних осадків, т.к. ці величини взаємозв'язані. Однорозмірний осадок з гексагональною упаковкою має декілька більшу пористість по порівнянню з вказаними вище. Максимальною пористістю

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

обладає однорозмерний осадоk 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 разно-размерные 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., Lyman G. Morphological Analysis and Modelling of Fine Coal Filter Cake Microstructure // Chemical Engineering Science. – 1997. – 52/7. – P. 1151-1162.
3. 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. – 398 с.
5. Гарковенко Є.Є. Особливості нормальних деформацій ущільнених осадів при активізації об'ємного зсуву // Вісник Криворізького технічного університету. – 2005. – Вип. 7. – С. 89-93.
6. Результаты исследований равновесного состояния жидкости в ячейке сита обезвоживающего грохота / В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др. // Вибрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – 2009. – Вип. 3(55). – С. 77-80.
7. 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. Учебное пособие по курсу "Механика грунтов" / А.А. Петраков, В.В. Яркин, Р.А. Таран и др. – Макеевка: ДонНАСА, 2004. – 164 с.

© Назимко Е.И., Науменко В.Г., 2012

*Надійшла до редколегії 20.03.2012 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н О.Д. Полуляхом*