

Е.И. НАЗИМКО, Е.Е. ГАРКОВЕНКО, доктора техн. наук, проф., В.Г. НАУМЕНКО, ассистент
Донецкий национальный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ОСАДОК

Приведены результаты моделирования удаления влаги фильтрованием при наложении сдвиговых деформаций к одноразмерным тонкодисперсным осадкам с использованием метода дискретных элементов.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Повышение качества минерального сырья и продуктов его обогащения остается одной из задач современного состояния техники и технологии обогащения [1]. Наибольшие технологические трудности возникают при обезвоживании осадков, содержащих мелкие и тонкие частицы. Такие осадки имеют высокоразвитую поверхность, взаимодействующую с водой. Пористость и проницаемость этих сред как правило низкая. Удаление влаги из тонкодисперсных осадков обычно выполняется в несколько стадий, чаще это сочетание механического обезвоживания и термического. Последний процесс требует значительных энергетических затрат и является одним из дорогостоящих, кроме того имеет негативное воздействие на окружающую среду. Поэтому внимание многих авторов направлено на совершенствование более дешевых механических методов, в частности фильтрования, с целью снижения влажности его продуктов и затрат на последующую сушку.

В связи с этим поиск способов совершенствования механических методов удаления влаги из осадков является актуальной задачей.

Анализ исследований и публикаций. При обезвоживании мелких и тонких осадков в поровой среде протекают довольно сложные процессы, связанные с взаимодействием твердой, жидкой и газообразной фаз. Работы многих отечественных и зарубежных исследователей посвящены изучению истечения жидкости и повышению скорости процесса фильтрования [2-6]. Изучение свойств осадков на микроуровне свидетельствует о необходимости продолжения исследований в этом направлении для более глубокого понимания сложных явлений, протекающих в этой среде. Микроструктура осадка определяется не только его гранулометрическим составом, но и параметрами динамического воздействия на осадок, подвергаемый обезвоживанию механическими методами. Необходимо проанализировать критически влияние свойств осадков, микроструктуры сложной пористой среды на совершенствование и расширение возможностей их обезвоживания. Такая оценка позволит количественно и сравнительно определить соответствующее влияние на технологические возможности процесса и предельно идентифицировать потенциальные пути для улучшения свойств осадков и технологии.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является исследование изменения свойств тонких труднофильтруемых осадков при наложении динамических полей и влияние этих изменений на скорость удаления влаги из порового пространства.

Изложение материала и результаты. Исследование взаимодействия поверхности твердой фазы с водой при обезвоживании мелких продуктов представляют значительную трудность. Это связано с динамическим течением процессов и влиянием значительного количества факторов как физической, так и химической природы. Для исследования таких процессов могут быть применены методы численного моделирования [7, 8]. Для численного моделирования сложных процессов, протекающих при вакуумном обезвоживании угля, разработана компьютерная модель, позволяющая исследовать кинетику взаимодействия фаз.

В основу модели, базирующейся на дискретных элементах, положено взаимодействие пары сферических частиц, показанное на рис. 1,а. В модели задается положение частиц с координатами центров тяжести и радиусами R_1 и R_2 в прямоугольной системе координат $X-Y$. Элементам придаются определенные свойства путем введения соответствующих коэффициентов. Элементы перемещаются под действием сил F_1 и F_2 , вращаются в соответствии с законом Ньютона, если при взаимодействии возникают моменты M_1 и M_2 .

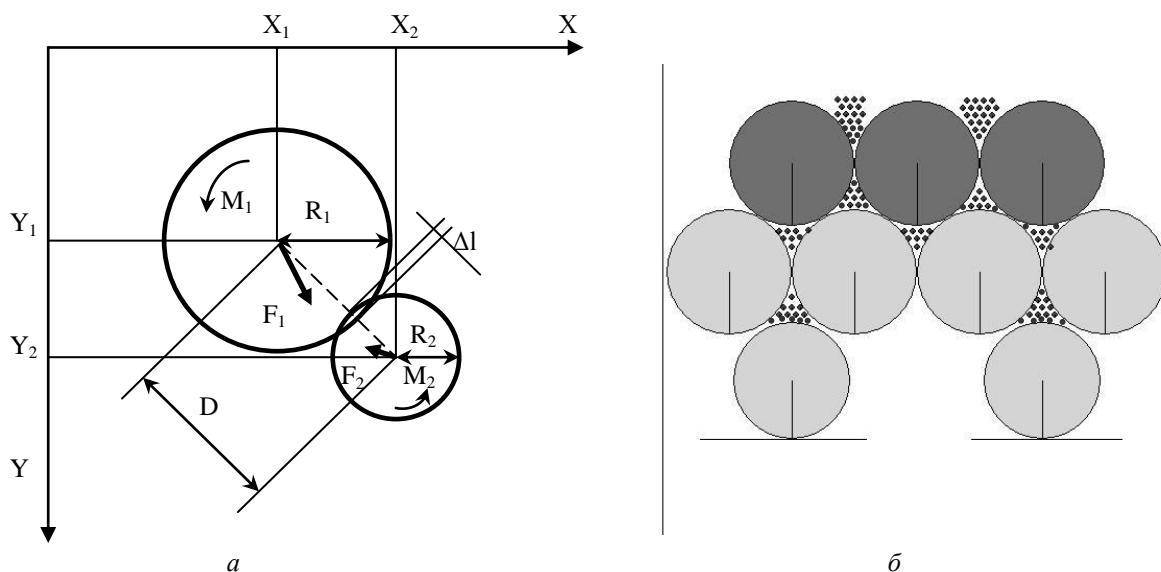


Рис. 1. Моделирование взаимодействия пары элементов: *а* – принцип модели, *б* – исходное состояние осадка

Движения элементов рассматриваются в дискретные периоды времени, которые в компьютерной реализации моделируются как циклы. В пределах цикла счета координаты центров тяжести частиц X_1 , Y_1 и X_2 , Y_2 , скорости V_1 и V_2 , а также силы являются постоянными. При переходе к следующему циклу счета эти параметры пересчитываются с учетом происшедших взаимодействий. При этом учитывается перемещение элементов под действием результирующего ускорения G , которое возникает от действия силы тяжести, Архимедовой (расположения) силы, демпфирующей силы или силы сопротивления среды и от влияния смежных соседей. В течение каждого цикла смежные частицы проверяются на условия когезии и адгезии.

Для моделирования процесса истечения жидкости (фильтрата), содержащей наиболее тонкие частицы, были введены специальные блоки частиц, которые создавались как группа элементов с определенными заданными одинаковыми свойствами. Были использованы подходы, изложенные в работах [9, 10], когда жидкость заменялась более мелкими элементами и перемещалась в пространстве между крупными, моделирующими осадок. Исходное состояние модели показано на рис. 1,б. Для имитационных экспериментов приняты осадки плотной и рыхлой структуры с гексагональной упаковкой одномерных частиц, зажатые стенками сосуда и расположенные в нем относительно свободно (не зажатые стенками). Моделирование выполнялось в течение 160000 циклов, что соответствовало 8с времени эксперимента.

На рис. 2 показаны отдельные фрагменты состояния осадков в различные моменты времени, которые изображаются программой в виде анимаций на мониторе на каждом цикле счета. Темным цветом выделен слой элементов, к которому был приложен сдвиг с различной скоростью – низкой и высокой. Далее сдвиг с низкой скоростью обозначен как медленный сдвиг (МС), а с высокой скоростью – как быстрый (БС). Зависимости, полученные для осадков без приложения сдвига, обозначены без дополнительных комментариев.

Анализ анимаций без приложения сдвига показывает, что для рыхлых осадков процесс вытекания фильтрата начинается с 0,7с. После 4с счета практически вся вода удалена, остаточная влага представлена тремя мелкими элементами, зажатыми между частицами осадка. В случае плотного осадка до момента времени 2,5с ни один из мелких элементов не был удален. За период от 0 до 2,5с «частицы» воды раздвигают частицы осадка, формируя каналы для протекания вниз, после чего начинается удаление влаги. По окончании времени счета количество условной остаточной влаги, защемленной в плотном осадке, составило 8 элементов, что вдвое больше, чем для рыхлого осадка.

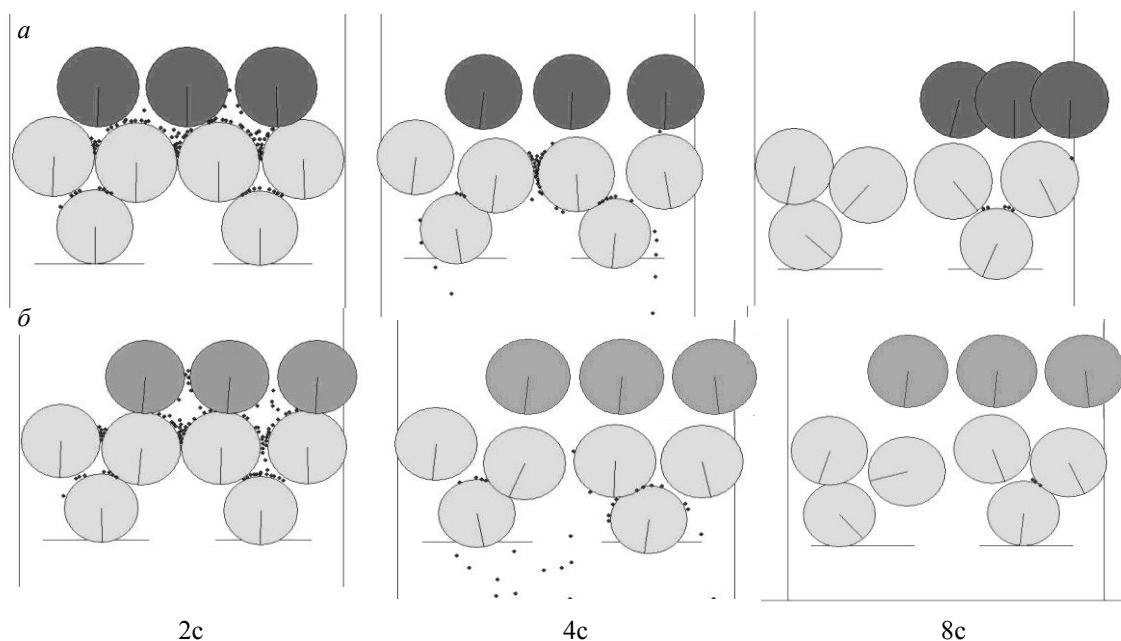


Рис. 2. Состояние плотного зажатого стенками сосуда осадка в различные моменты времени: *a* – при сдвиге с низкой скоростью (МС), *б* – при сдвиге с высокой скоростью (БС)

Модель дает возможность качественно сравнивать процессы, протекающие в осадке при разных условиях. По полученным изображениям условное количество фильтрата определялось как число мелких частиц, выпавших из осадка, затем была рассчитана скорость фильтрации. Результаты представлены на рис. 3.

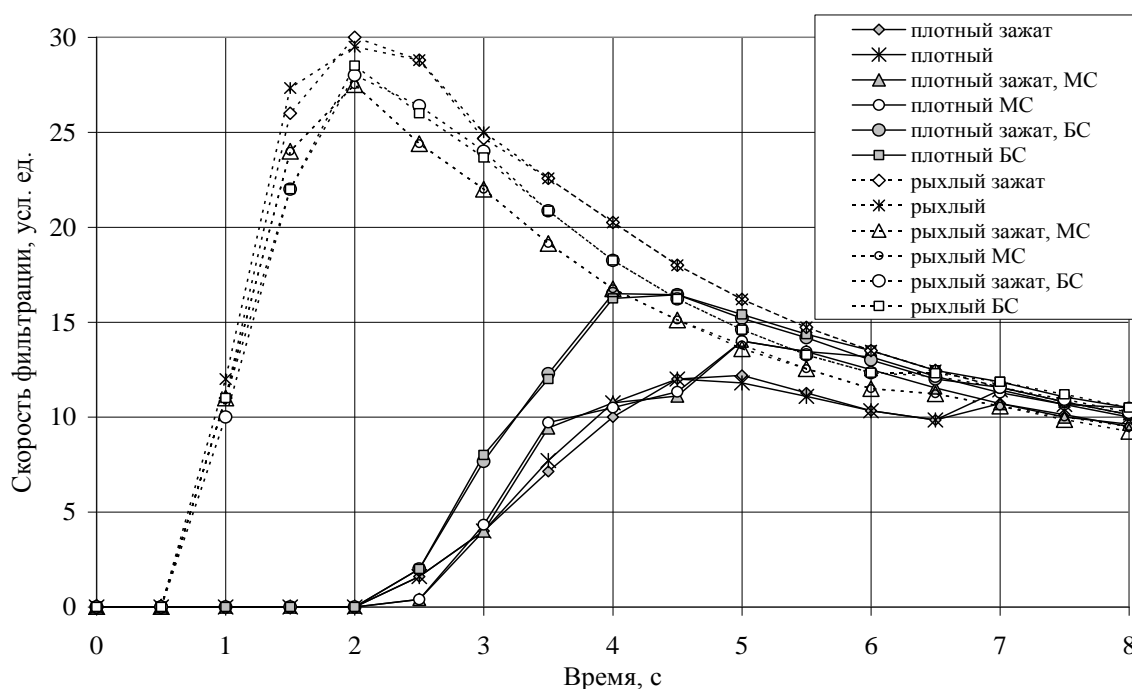


Рис. 3. Скорость фильтрации при разном механическом состоянии осадка

Данные рис. 3 позволяют сделать следующие основные выводы. Рыхлые осадки обеспечивают высокую скорость фильтрации и без приложения механических воздействий, максимальное значение достигается на второй секунде от начала процесса при всех состояниях осадка. При наложении сдвига с низкой скоростью (МС на рис. 3) скорость фильтрации снижается за счет возникновения уплотнения осадка под влиянием сдвига. При использовании сдвига с высокой скоростью (БС) максимальное значение скорости фильтрации составляет 28,5 усл. ед., что выше,

чем при медленном сдвиге - 27,5 усл. ед. Но это значение меньше достигаемого в свободном состоянии осадка, равном 30 усл. ед.

Для плотных осадков характерно наличие некоторого периода времени, необходимого жидкости для нахождения пути продвижения в каналах осадка. Осадок обладает определенной инерционностью из-за плотной упаковки частиц. При фильтровании без приложения сдвига скорость фильтрования гораздо ниже, чем у рыхлых осадков. Ее максимальное значение составляет 12 усл. ед. в момент времени 4,5с. При медленном сдвиге (МС) максимальная скорость фильтрования имеет большее значение, достигается на 5с от начала моделирования и составляет 14 усл. ед. Начальное значение скорости фильтрации при этом ниже, чем в состоянии без приложения сдвига. Это позволяет заключить, что медленный сдвиг приводит к некоторому уплотнению осадка в начальный период, однако затем, при развитии сдвига способствует увеличению скорости удаления влаги.

Приложение к плотному осадку сдвига с высокой скоростью (БС на рис. 3) обеспечивает рост скорости фильтрования сразу же после инерционного периода. При этом время достижения максимального значения скорости уменьшается до 4с (1,5с от начала истечения). Максимальная скорость удаления влаги составляет 16,25 усл. ед. и удерживается еще 0,5с. Таким образом, для плотных осадков создание сдвига с высокой скоростью позволяет повысить скорость удаления влаги из осадка.

Количество остаточной влаги в осадке так же оценивалось по числу заземленных или оставшихся в осадке мелких частиц, имитирующих жидкость. Результаты определений представлены на рис. 4.

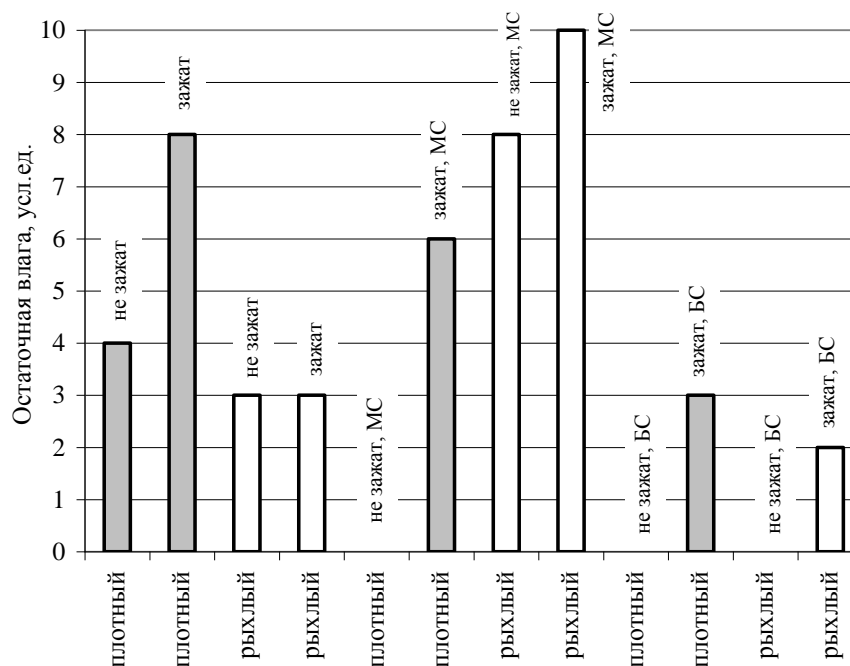


Рис. 4. Количество остаточной влаги в осадках разного типа в зависимости от механического воздействия на них

Из данных рис. 4 следует, что без приложения механического воздействия к рыхлому осадку в виде сдвига остаточная влага составляет 3 усл.ед., что более чем в 2 раза ниже по сравнению с плотным осадком. Медленный сдвиг в рыхлом осадке увеличивает количество заземленной влаги почти в 3 раза и приводит к удержанию 8-10 частиц. При использовании быстрого сдвига для рыхлых осадков количество остаточной влаги снижается до 0-3 усл. ед.

В плотных осадках без приложения сдвига количество остаточной влаги составляет 4-8 усл. ед. в зависимости от его уплотнения стенками сосуда. Скорость сдвига при его наложении к плотному осадку, не зажатому стенками сосуда, не влияет на количество остаточной влаги – она отсутствует. Для зажатого стенками плотного осадка характерно снижение количества остаточной влаги в 2 раза при быстром сдвиге по сравнению с медленным сдвигом в таком же осадке. И это количество почти в 2,6 раза ниже, чем без приложения сдвига, но превышает таковое для рыхлого осадка при быстром сдвиге. По сравнению с медленным сдвигом в рыхлом осадке приложение

быстрого сдвига к зажатому плотному осадку позволяет снизить количество остаточной влаги с 10 до 3 усл. ед. Таким образом, быстрый сдвиг способствует снижению влажности осадков в любом первоначальном состоянии осадка.

Выводы и направления дальнейших исследований. Проведенное моделирование процесса истечения влаги из одноразмерных тонкодисперсных осадков при их гексагональной упаковке позволило сделать следующие основные выводы.

Приложением сдвига с низкой скоростью способствует уплотнению рыхлого осадка, что приводит к снижению скорости фильтрации по сравнению со свободным состоянием осадка. Использование быстрого сдвига для рыхлых осадков повышает скорость удаления влаги, но она остается более низкой, чем в случае отсутствия сдвига. При медленном сдвиге количество остаточной влаги в осадке выше, чем при его отсутствии. Быстрый сдвиг способствует ее значительному снижению. Медленный сдвиг приводит к уплотнению рыхлого осадка.

Для плотных осадков характерен определенный инерционный период времени до начала удаления влаги из осадка. Этот период почти в 5 раз превышает аналогичный для рыхлых осадков и составляет 2,5с. При фильтровании без приложения сдвига скорость фильтрования гораздо ниже, чем у рыхлых осадков, ее максимальное значение составляет 12 усл. ед. (30 для рыхлых). При медленном сдвиге максимальная скорость фильтрования составляет 14 усл. ед. Приложение к плотному осадку сдвига с высокой скоростью обеспечивает рост скорости фильтрования сразу же после инерционного периода и снижение времени достижения ее максимального значения. Максимальная скорость удаления влаги составляет 16,25 усл. ед. и удерживается еще 0,5с. Для плотного осадка характерно снижение количества остаточной влаги в 2 раза при быстром сдвиге по сравнению с медленным. Это количество ниже, чем без приложения сдвига.

Таким образом, быстрый сдвиг способствует снижению влажности осадков в любом первоначальном состоянии осадка.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на проведение физических экспериментов в условиях, аналогичных использованным при компьютерном моделировании.

Список литературы

1. Вилкул Ю.Г. Современное состояние проблемы оперативного контроля и управления качеством минерального сырья / Ю.Г. Вилкул, А.А. Азарян // Качество минерального сырья. – Кривой Рог. – Минерал. – 2005. – С. 11-23.
2. Вода в дисперсных системах / [Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, Ф.Д. Овчаренко]. – М.: Химия. – 1989. – 288 с.
3. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. - М.: Химия. – 1980. – 412 с.
4. Yang G. Object-Oriented Analysis of Network Flows at Por and Reservoir Scales / G. Yang, L.R. Myer // *ISRM International Symposium 36th U.S. Rock Mechanics Symposium June 29 – July 2, 1997. New York.*
5. Пейчев И.Д. Исследование теоретических закономерностей течения жидкости через пористую среду // Обогащение полезных ископаемых. Днепропетровск. – 2004. – Вып. 20 (61). – С. 99-104.
6. Гарковенко Е.Е. Взаимодействие фаз при обезвоживании тонких классов углей. Настройка модели // Збагачення корисних копалин. – 2001. - №13(54). - С. 116-121.
7. Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов / [Е.Е. Гарковенко, Е.И. Назимко, А.И. Самойлов, Ю.Л. Папушин]. – Донецк: ООО «Норд Компьютер», 2002. – 266 с.
8. Cundall P.A. A discrete numerical Model for granular assemblies / P.A. Cundall, O.D.L. Strack // *Geotechnique*, 29, # 1, pp. 47-65 (1974).
9. Bruno M.S. et al. Some influences of saturation and fluid flow on sand production: Laboratory and Discrete Element Model Investigations. SPE 36534, // *Proc. 1996 SPE Ann. Tech. Conf., Denver, Colorado, 6–9 October, 1996. p. 447–461.*
10. O'Connor P.M. et al. Discrete Element Modeling of Sand Production // *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 1998. **34:3–4**, Paper No. 231.