

**Е.И. НАЗИМКО**, д-р техн. наук, **В.Г. НАУМЕНКО**

(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ ИЗ ОСАДКОВ**

*Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.* Уголь еще долгое время будет являться одной из основных составляющих частей топливно-энергетического комплекса Украины. С увеличением содержания тонких и глинистых фракций в добываемом угле определяющее значение приобретает обогащение и обезвоживание шламовых продуктов. Совершенствование технологии обезвоживания, снижающей влажность осадков, позволит экономить топливо, расходуемое на сушильных установках. Одним из процессов механического обезвоживания является фильтрование, которое исследовалось достаточно широко в различные годы. В результате этих исследований разработаны основы гидродинамики и физики процесса. С увеличением содержания тонких классов в шламовых водах углеобогащительных фабрик возникает необходимость решения новых теоретических и практических вопросов, таких как применение при фильтровании специальных приемов, изменение соотношения между фазами процесса, применение химических средств обработки поверхности частиц, рациональное формирование осадка.

*Анализ исследований и публикаций.* Скорость удаления влаги определяется приложенным перепадом давлений и сопротивлением осадка, капиллярными явлениями, параметрами взаимодействия фаз, микроструктурой порового пространства. Структура порового пространства осадка зависит в свою очередь от физических параметров осадка (формы и размера частиц, пористости и удельной поверхности). Ко второй группе параметров, приобретающих особое значение при высоком содержании тонких классов или при использовании поверхностно-активных веществ [1] и флокулянтов, следует отнести такой физико-химический процесс, как флокуляция суспензии [2], поверхностные явления на границе раздела твердой и жидкой фаз [3] и др.

Для определения характеристик микроструктуры осадка изучались количественные характеристики топологии, плотности распределения и размеров пор на шлифах, проводились лабораторные эксперименты по фильтрованию угольных суспензий, а также осуществлялось моделирование поровой среды. Методы микроскопического исследования и полученные результаты более детально описаны в работе [4].

*Постановка задачи.* Целью данной работы является моделирование процесса удаления влаги из осадков на базе метода дискретных элементов.

*Изложение материала и результаты.* Процессы взаимодействия поверхности твердой фазы с водой при обезвоживании тонкого угля представляют большую трудность для исследования, т.к. они находятся под влиянием большого массива физических и химических факторов и происходят в маленьком

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

масштабе. Одним из вариантов решения этой проблемы является численное моделирование, которое сочетает в себе динамику, точность и рассмотрение широкого спектра деталей. На базе алгоритма, предложенного в работе [5], разработана компьютерная программа для моделирования кинетики взаимодействия фаз, которая базируется на дискретных элементах. В ходе моделирования использованы подходы и методика, детально описанные в работах [6, 7].

Базой для численного моделирования является рассмотрение взаимодействия пары сферических элементов, показанное на рис. 1.

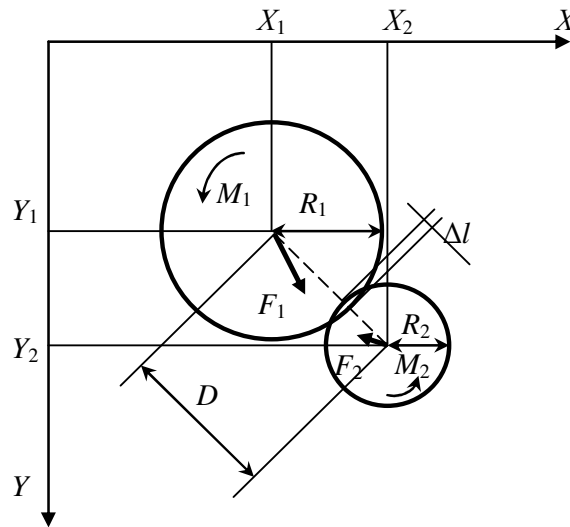


Рис. 1. Взаимодействие пары элементов

Частицы имеют шарообразную форму с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ , перемещаются под действием сил  $F_1$  и  $F_2$ , вращаются в соответствии с законом Ньютона в прямоугольной системе координат  $X$ - $Y$ , если при взаимодействии возникают моменты  $M_1$  и  $M_2$ . Движения элементов рассматриваются в дискретные периоды времени. В компьютерной реализации эти периоды моделируются как циклы. Координаты центров тяжести  $X_1$ ,  $Y_1$  и  $X_2$ ,  $Y_2$ , скорости  $V_1$  и  $V_2$ , а также силы являются постоянными в пределах цикла счета и пересчитываются на каждом другом цикле.

Все частицы движутся 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. В данной работе использованы подходы, изложенные в публикациях [8, 9], когда жидкость заменяется наиболее мелкими элементами и перемещается в пространстве между крупными, моделирующими частицы осадка.

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

Для имитационных экспериментов моделировались осадки плотной и рыхлой структуры с гексагональной упаковкой одноразмерных частиц, зажатые стенками сосуда и расположенные в нем относительно свободно (не зажатые стенками). Моделирование фильтрования через слой осадка выполнялось в течение 1600000 циклов, что соответствовало 8с времени эксперимента. На рис. 2 показаны отдельные фрагменты состояния осадков в различные моменты, которые изображаются программой в виде анимаций на мониторе на каждом цикле счета. Взаимодействие со стенками сосуда не задавалось.

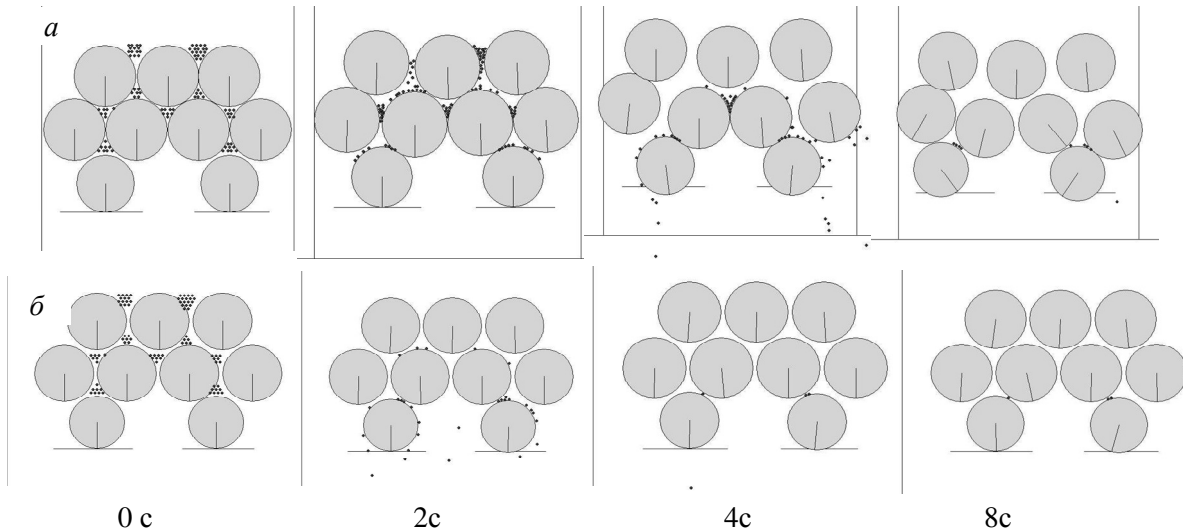


Рис. 2. Анимационные фрагменты состояния осадка без наложения сдвига:  
*a* – плотный зажатый стенками осадок; *б* – рыхлый не зажатый

Из изображений рис. 2 следует, что осадок, имеющий промежутки между элементами (рыхлый) даже при гексагональной упаковке, значительно быстрее освобождается от мелких частиц, имитирующих воду. После 4с счета практически вся вода удалена, и дальнейшее увеличение времени обезвоживания смысла не имеет. Остаточная влага представлена тремя мелкими элементами, зажатыми между частицами осадка (рис. 2*б*, 4 и 8с).

Для плотного осадка собственно удаление влаги начинается после 2с, а до этого "частицы" воды раздвигают частицы осадка, формируя каналы для протекания вниз. До момента времени 2с ни один из мелких элементов не выпал из слоя осадка (рис. 2*а*, 2с). По окончании времени счета количество условной остаточной влаги, защемленной в осадке, составило 8 элементов, т.е. вдвое больше, чем для рыхлого осадка.

Из полученных результатов обработки данных имитационного эксперимента можно сделать вывод об адекватном отображении моделью процессов, происходящих при удалении влаги из осадков.

Далее были выполнены исследования с наложением и без наложения сдвига. Кроме того, изменялась скорость сдвига – сдвиг с низкой скоростью (мед-

### **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

ленний) обозначен как МС, сдвиг с высокой скоростью (быстрый) – как БС. Фрагменты анимаций представлены на рис. 3 и 4.

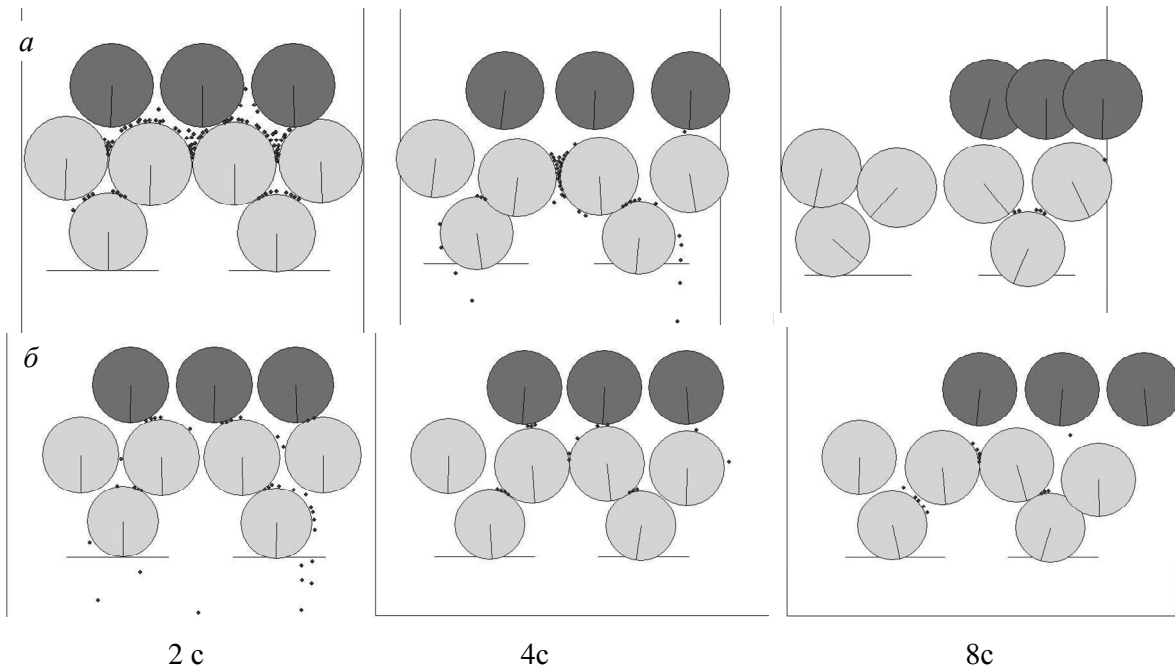


Рис. 3. Анимационные фрагменты состояния осадка с наложением сдвига с низкой скоростью (МС):  
*a* – плотный зажатый стенками осадок; *б* – рыхлый не зажатый

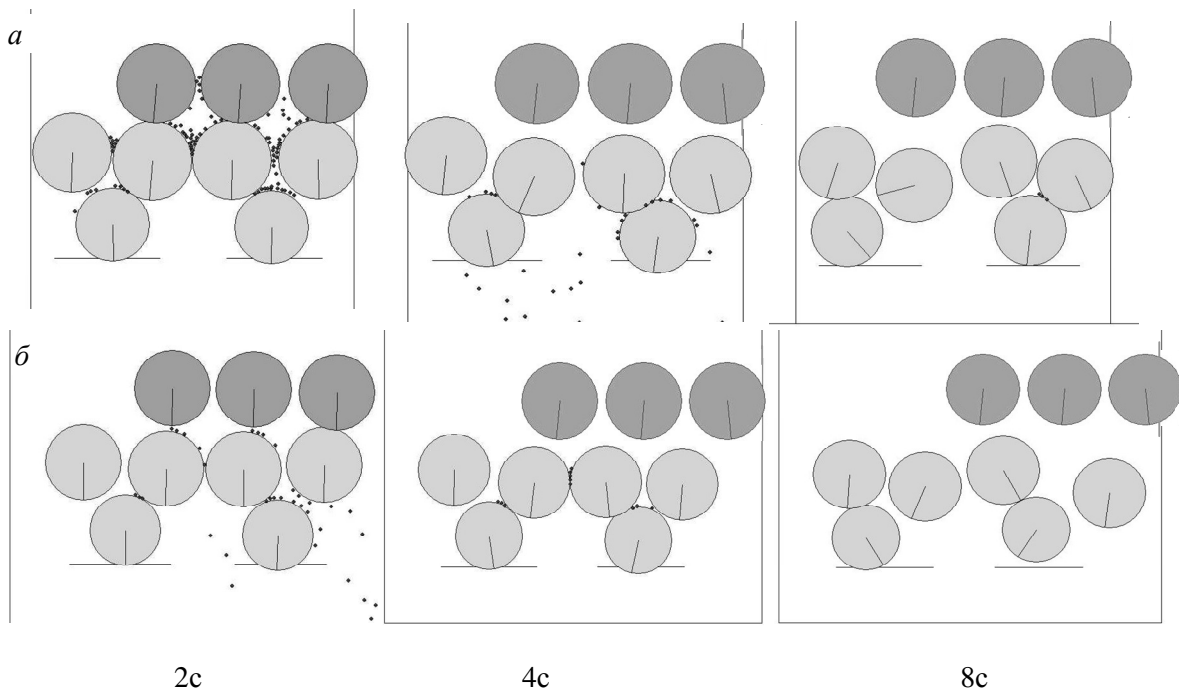


Рис. 4. Анимационные фрагменты состояния осадка с наложением сдвига с высокой скоростью (БС):  
*a* – плотный зажатый стенками осадок; *б* – рыхлый не зажатый

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

На рис. 3 и 4 более темный цветом выделен слой осадка, к которому прикладывался сдвиг, исходное состояние осадка такое же как показано на рис. 2. Из анимаций следует вывод о том, что при низкой скорости сдвига (МС) процесс происходит быстрее в рыхлом осадке. При этом в рыхлом осадке условное количество остаточной влаги выше, чем в плотном на 33% (8 и 6 единиц, соответственно). Последнее объясняется уплотнением рыхлого осадка при медленном сдвиге. При сдвиге с высокой скоростью (БС) в рыхлом осадке не остается условной влаги (число частиц равно 0), а в плотном остается 3 единицы, что составляет 4% от исходного количества (рис. 4а, б). И это значение остаточной влаги вдвое ниже, чем при медленном сдвиге.

На основе данных имитационного моделирования определено количество выделившегося фильтрата в условных единицах для всех типов осадков (рис. 5). Изменение объема фильтрата определялось по количеству выделившихся из осадка мелких "частиц" жидкости. Установлено, что для начала фильтрования плотных осадков необходимо время для развития сдвига в осадке, которое составляет 2,35с, которое в 3 раза больше, чем для рыхлых осадков. Для удобства сравнения данные для плотных осадков смещены на начало выделения фильтрата в случае рыхлых осадков. Графики для осадков без приложения сдвига обозначены на рис. 5 без дополнительных комментариев.

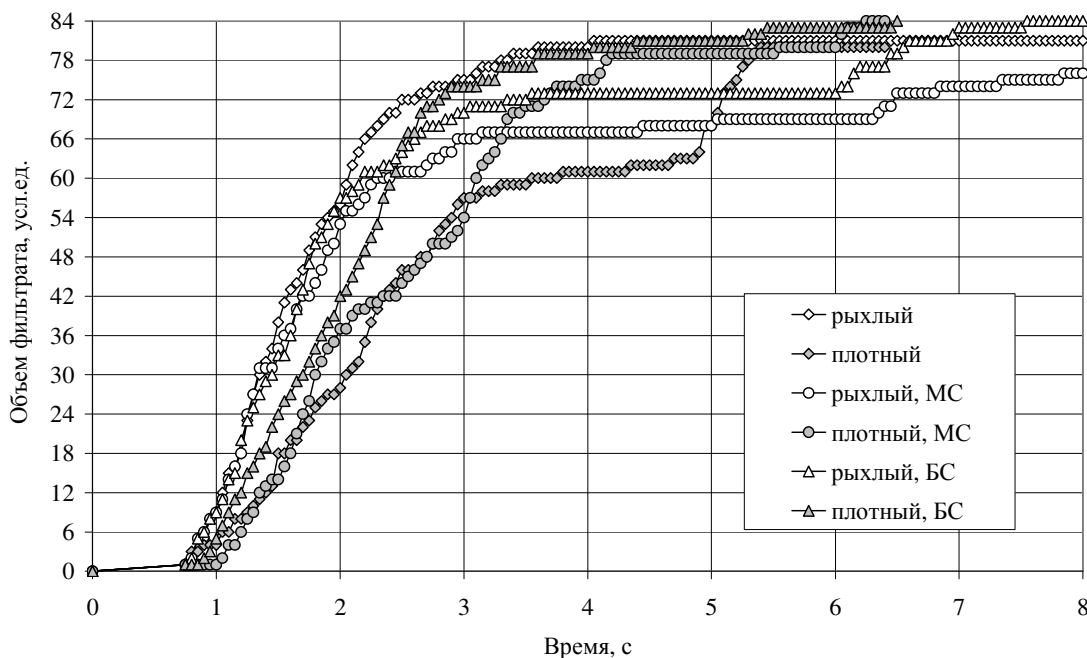


Рис. 5. Объем фильтрата, выделившегося из осадков при разных режимах

Из графиков, приведенных на рис. 5, следует, что для рыхлых осадков в начальной стадии фильтрования количество фильтрата не зависит от механического воздействия на осадок. До момента времени равного 2с графики совпадают. При наложении сдвига с низкой скоростью (МС) процесс замедляется из-за уплотнения рыхлого осадка. При сдвиге с высокой скоростью (БС) достигается максимальное удаление влаги в конечной стадии процесса – количество

**Збагачення корисних копалин, 2011. – Вип. 45(86)**

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

оставшихся в осадке мелких частиц равно нулю.

Для плотных осадков медленный сдвиг начинает сказываться положительно после 3с от начала выделения фильтрата и обеспечивает остаточную влагу в количестве 6 единиц, что на 33% ниже, чем при отсутствии сдвига (8 единиц для зажатых плотных осадков). Наложение сдвига с высокой скоростью (БС) ускоряет процесс выделения фильтрата с самого начала и позволяет снизить количество остаточной влаги до 3 единиц. Это в 2,5 раза ниже, чем без приложения сдвига, и на 50% ниже, чем при быстром сдвиге на рыхлом осадке.

*Выводы и направления дальнейших исследований.* Проведенные имитационные исследования на модели с использованием метода дискретных элементов позволили установить положительное влияние воздействия сдвига на осадки, особенно сдвиг с высокой скоростью и в применении к плотным осадкам. Медленный сдвиг в приложении к рыхлым осадкам приводит к их уплотнению и замедлению выделения фильтрата из осадка. Полученные на модели выводы необходимо подтвердить в ходе физического эксперимента.

Моделирование и исследование сложных процессов взаимодействия фаз при обезвоживании тонких классов углей при различных способах воздействия на них позволяет определить пути повышения эффективности использования шламов в топливно-энергетическом комплексе Украины.

### **Список литературы**

1. **Бейлин М.И.** Теоретические основы процессов обезвоживания углей. – М.: Недра, 1969. – 240 с.
2. **Bourgeois F., Lyman G.** Morphological Analysis and Modelling of Fine Coal Filter Cake Microstructure, Chemical Engineering Science, 52/7, pp. 1151-1162 (1997) .
3. **Жужиков В.А.** Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. М.: Химия. – 1980. – 398с.
4. **Назимко Е.И.** Исследование микроструктуры кека методами фрактальной геометрии // Наукові праці ДонДТУ. Вип. 27, серія гірничо-електромеханічна. – 2001. – С. 283-288.
5. **Cundall P.A., Strack O.D.L.** A discrete numerical Model for granular assemblies // Geotechnique, 29, # 1, pp. 47-65 (1974).
6. **Nazimko L.I., Garkovenko E.E., Corchevsky A.N., Druts I.N.** Kinetics of Phases Interaction during Mineral Processing Simulation // Proceedings of XV International Congress of Coal Preparation. China. 2006. p. 785-798.
7. **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.
8. **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.
9. **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.

© Назимко Е.И., Науменко В.Г., 2011

*Надійшла до редколегії 27.03.2011 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*