

УДК 622.794.2:622.765

А.С. ГОЛИКОВ, ассистент, (+38 062) 301-07-47

В.Г. НАУМЕНКО, ассистент, (+38 062) 301-07-47

С.О. ФЕДОСЕЕВА, научн. сотр., (+38 062) 301-07-47

Е.И. НАЗИМКО, д-р техн. наук, профессор, ele-nazimko@ukr.net

Донецкий национальный технический университет, Украина

A.S. GOLIKOV, assistant, (+38 062) 301-07-47

V.G. NAUMENKO, assistant, (+38 062) 301-07-47

S.O. FEDOSEEVA, scientist, (+38 062) 301-07-47

L.I. NAZIMKO, PhD in eng. sc., professor, ele-nazimko@ukr.net

Donetsk National Technical University, Ukraine

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВОДНО-ШЛАМОВОЙ СИСТЕМЫ, ПРОЦЕССОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ И ФЛОТАЦИИ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ

Представлены результаты моделирования процессов накопления шламов в замкнутых технологических циклах углеобогащительных фабрик и взаимодействия фаз при обезвоживании тонкодисперсных осадков в различном механическом состоянии осадка и флотации угольных шламов.

Ключевые слова: моделирование, уголь, накопление шламов, фильтрование, скорость, сдвиг, флотация.

SIMULATION OF WATER-SLIME FLOWSHEET WORK, DEWATERING AND FLOTATION PROCESSES DURING COAL PREPARATION

Some results of slime accumulation simulation in circuit flowsheet of coal preparation plants and phase's interaction during coal sediment dewatering in it different mechanical state and flotation are presented.

Key words: simulation, coal, slime accumulation, filtration, speed, shear, flotation.

Водно-шламовая система (ВШС) углеобогащительных фабрик представляет собой сложный комплекс, включающий классификацию частиц по крупности, осветление шламовых вод для их повторного использования, сгущение и обезвоживание шламов, обезвоживание и складирование продуктов обогащения [1]. В таких системах действует множество аппаратов разного назначения, соединенных транспортными магистралями. При этом показатели работы одного аппарата зависят от показателей работы остальных.

В связи с этим особую актуальность приобретает исследование поведения замкнутых технологических циклов, к которым относятся и ВШС. В момент запуска системы установки функционируют в нестационарном режиме, что существенно влияет на изменение сепарационных характеристик сгустителей в сторону увеличения граничного зерна разделения и среднего вероятного отклонения [2-4]. При циркуляции потоков накапливается тонкий шлам и как следствие повышается плотность и вязкость воды, что отрицательно сказывается на показателях работы гравитационного оборудования, осаждения, флотации, фильтрования.

Изменение равновесной концентрации шламов в системе и продолжительность нестационарного режима ее работы можно проследить, исследуя скорость накопления шлама в оборотной воде с учетом задержки порции шлама в каждом аппарате системы (инерционности аппарата T_a) и запаздывания подачи порции шлама по трубопроводам (транспортного запаздывания $T_{тр.}$), которые в сумме составляют общее запаздывание T . Инерционность аппарата T_a зависит от его конструктивных и технологических особенностей и принята по данным практики. Транспортное запаздывание поступления порций питания разных аппаратов рассчитано по формуле:

$$T_{\text{тр.}} = L S 3600 n / W, \quad (1)$$

где L – длина трубопровода, м; S – площадь поперечного сечения потока, м^2 ; W – количество пульпы, проходящей по трубопроводу, $\text{м}^3/\text{час}$; n – количество трубопроводов.

ВШС представляется графом, в котором каждый узел (аппарат) связан с другими узлами дугами (трубопроводами) [3]. Анализ работы систем осветления оборотных вод выполнен путем имитационного численного моделирования с применением компьютерных технологий [4]. Исходной информацией служат коэффициенты распределения шлама в узлах и потоках, определенные на основе опробования и анализа продуктов ВШС, а также запаздывание потоков и топология системы (порядок связи и взаимодействия аппаратов). Количество шлама, поступающего с рядовым углем, принято за единицу, расчеты для потоков проводятся в относительных единицах (долях). ВШС в виде укрупненных блоков и результаты моделирования накопления шлама в питании флотации представлены на рис. 1. На рис. 1, а введены следующие обозначения: 1 – поступление рядового угля, ГО – гравитационное обогащение, РС – радиальный сгуститель, МВС – мокрая винтовая сепарация, ГВЧ – грохот высокочастотный, Ф – флотация, фильтрование и флокуляция, КП – конечные продукты.

Изменяемыми параметрами приняты транспортные задержки порций шлама $T_{\text{тр.}}$ для коммуникаций, выделенных на рис. 1, а жирными стрелками.

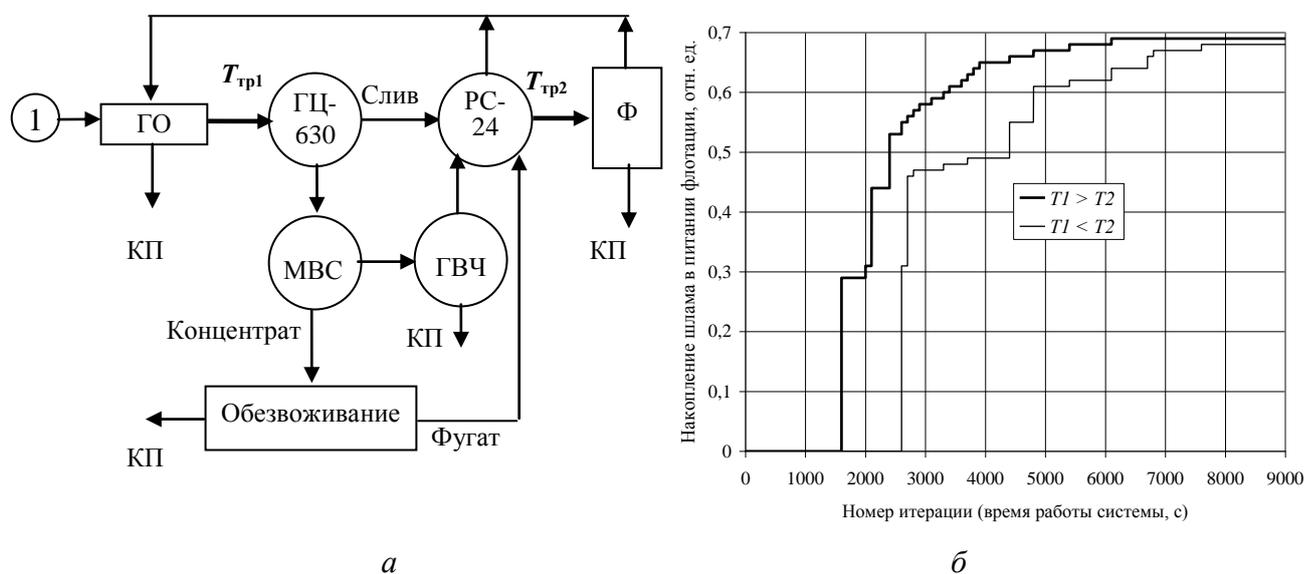


Рис. 1. Водно-шламовая система в блочном изображении (а) и накопление шлама в системе (б)

Моделирование проводилось для случаев, когда $T_{\text{тр1}} > T_{\text{тр2}}$ и $T_{\text{тр1}} < T_{\text{тр2}}$, его результаты показаны в графической форме на рис. 1, б. Анализ полученных данных, показал, что путем изменения сочетания транспортных задержек потоков системы можно ускорить достижение равновесной концентрации шлама, а также достичь эффекта сглаживания приращений (скачков) его количества в потоках.

Количество таких приращений при $T_{\text{тр1}} > T_{\text{тр2}}$ (жирная линия на рис. 1, б) больше, чем для $T_{\text{тр1}} < T_{\text{тр2}}$ при близком равновесном содержании шлама 0,68-0,69 долей ед. В этом случае преобладают маршруты вывода шлама с низкими транспортными задержками, стабилизация его накопления происходит быстрее. При использовании маршрутов с высокой задержкой выводящих потоков равновесная концентрация достигается позже. Преобладание быстрых маршрутов вывода шлама предпочтительнее, т.к. в узлах системы происходит множество незначительных изменений его концентрации в потоках. Все сгустительно-осветлительные аппараты будут плавно реагировать на эти изменения, и их работа будет более устойчивой.

Полученные результаты помогут разработать технологические рекомендации к построению замкнутых циклов с низкой продолжительностью переходных процессов, что способствует повышению эффективности работы ВШС в целом.

Технологические операции обезвоживания продуктов обогащения играют важную роль не только в работе ВШС, но и всего предприятия. Одним из процессов механического обезвоживания является фильтрование, которое исследовалось достаточно широко в различные годы. Исследование физических процессов, сопровождающих формирование определенных состояний осадков и свойств их микроструктуры, позволяет найти резервы снижения влажности осадков [5].

Взаимодействие фаз при обезвоживании тонких осадков представляет значительную трудность для изучения, т.к. является динамичным, находится под влиянием большого количества факторов и происходит в маленьком масштабе. Для численного моделирования сложных процессов, протекающих при фильтровании углесодержащих осадков, разработана компьютерная модель, позволяющая исследовать кинетику взаимодействия фаз. Модель базируется на методе дискретных элементов (МДЭ) [6-9].

В модели приняты сферические частицы радиусами R_1 и R_2 , которые движутся под действием сил F_1 и F_2 и вращаются в прямоугольной системе координат X - Y при действии моментов M_1 и M_2 (рис. 2). Движение частиц и их взаимодействие рассматривается в дискретные периоды времени. В компьютерной реализации эти периоды моделируются как циклы счета. Координаты центров тяжести частиц X_1 , Y_1 и X_2 , Y_2 , скорости и силы рассчитываются на каждом цикле работы программы.

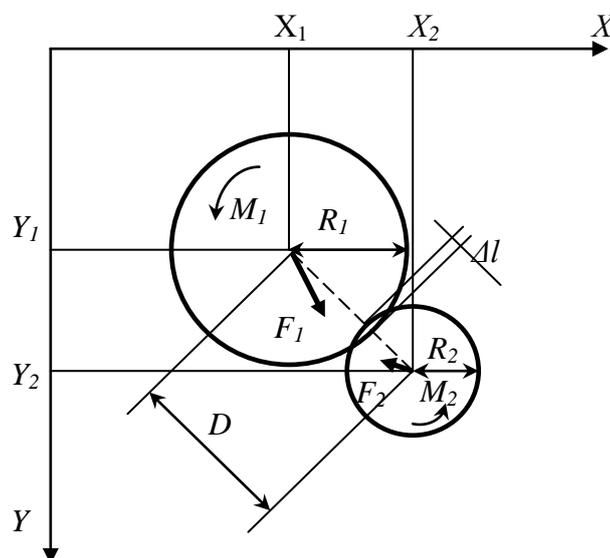


Рис. 2. Взаимодействие двух элементов (исходная схема МДЭ)

Работа компьютерной программы основана на фундаментальных законах - использованы второй и третий законы Ньютона и закон Гука. Достоверность результатов моделирования обеспечивается соблюдением динамического, кинетического и геометрического подобия.

В исходном файле задаются начальные скорости элемента вдоль осей, начальная скорость вращения, ускорения. Кроме того, вводится целый ряд коэффициентов, отражающих свойства среды и элементов: коэффициенты трения качения и скольжения, вязкостного сопротивления, сопротивления кручению, касательной и нормальной жесткости и др. [5-7].

В ходе имитационного исследования циклически выполняется перебор параметров всех элементов. Вычисляются силы, их моменты, поворачивающие элементы, определяются скорости и ускорения. Затем элементы перемещаются на новые позиции в соответствии с действующими на них силами.

Для исследования поведения многих сложных систем, к которым относятся и тонкодисперсные осадки, используют идеализированные среды в виде частиц правильной формы, обычно сферической. Пористость зернистых сред зависит не только от гранулометрического состава, но также от способа укладки частиц. Крайними случаями

укладки являются кубическая (ортогональная) и гексагональная. Для исследования изменения свойств осадков при механическом воздействии на частицы рассмотрены различные варианты их упаковки. Наиболее низкую пористость имеют разноразмерные осадки с гексагональной упаковкой. В механике горных пород такие осадки относятся к переконсолидированным. Осадки с ортогональным расположением частиц рассматриваются как недоконсолидированные, т.е. уплотненные. При механическом воздействии на осадок в виде сдвига происходит переформирование структуры осадка и изменение сети каналов в его объеме. При этом тупиковые каналы становятся проводящими, и влага может удаляться более полно.

Из численного моделирования следует, что при приложении сдвига недоконсолидированные осадки уплотняются. Разноразмерные осадки, т.е. переконсолидированные, имеющие поровую структуру с более низкой пористостью по сравнению с одноразмерными, несколько разуплотняются. Установлено положительное влияние сдвига на переконсолидированные осадки, которое приводит к увеличению каналов между частицами. Необходимо определить, как влияет скорость сдвига на скорость фильтрации.

Для моделирования истечения жидкости (фильтрата), содержащей наиболее тонкие частицы, создана модель, в которой в дополнение к элементам, имитирующим частицы осадка, введены блоки очень мелких частиц [7]. Выполнены исследования без наложения сдвига и со сдвигом с различной скоростью, отличающейся на несколько порядков. На основе полученных данных количество фильтрата определено по числу выделившихся из осадка мелких «частиц» жидкости для всех типов осадков в условных единицах без механического воздействия, при медленном и быстром сдвиге, а также средняя скорость фильтрации (рис. 3).

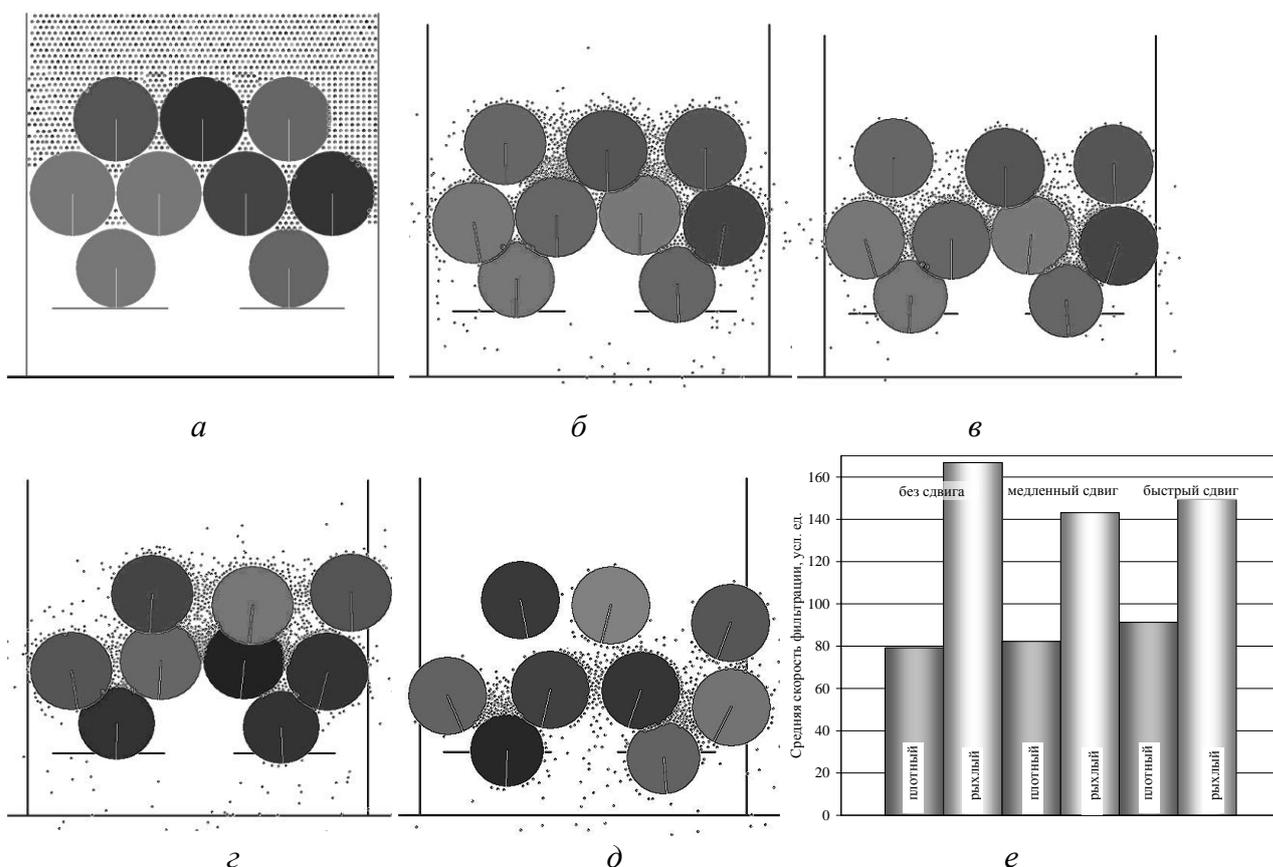


Рис. 3. Состояние модели: *a* – исходное; *б, в* – при развитии медленного сдвига во времени 2 и 4с; *г, д* – при развитии быстрого сдвига во времени 2 и 4с; *е* – средняя скорость фильтрации за весь период моделирования

Установлено, что для недоконсолидированных (рыхлых) осадков скорость удаления влаги мало зависит от механического воздействия на осадок. Тем не менее, при медленном сдвиге рыхлый осадок уплотняется, и скорость фильтрации снижается. Быстрый сдвиг

повышает скорость удаления влаги, но она более низкая, чем при отсутствии сдвига [9]. Для плотных осадков скорость фильтрования без приложения сдвига гораздо ниже, чем у рыхлых осадков, ее максимальное значение составляет 79 усл. ед. (рис. 3, *e*). Приложение к плотному переконсолидированному осадку сдвига с высокой скоростью обеспечивает рост средней скорости фильтрования на 10-15%.

Отсюда следует, что скорость фильтрации зависит от скорости приложения сдвигающих усилий и от механического состояния осадка. Быстрый сдвиг способствует снижению влажности осадков в любом первоначальном состоянии поровой структуры осадка.

Проведенные физические эксперименты для тонкодисперсных углесодержащих осадков подтвердили качественные результаты, полученные при имитационном исследовании. Это позволило определить рациональный момент механического воздействия на осадок в зависимости от его состояния и типа.

Описанная выше модель (рис. 2) настроена для изучения взаимодействия воздушного пузырька и угольной частицы при различной степени окисленности ее поверхности. Углекислотными исследованиями установлено отрицательное влияние окисленности на адсорбцию различных веществ на поверхности твердой фазы из-за значительного количества кислородсодержащих групп, их активного взаимодействия с водой, повышения количества пор и трещин выветривания и в итоге снижения природной гидрофобности угля. При высокой окисленности количество собирателя на поверхности недостаточно для эффективного закрепления частицы на пузырьке, вязкость слоя собирателя низкая. Поэтому именно этот параметр варьировался при имитационном исследовании.

В ходе моделирования установлено, что при высоких значениях окисленности от 28 до 24% угольная частица скользит по пузырьку, не закрепляясь на нем. На рис. 4 показано изменение траекторий движения частицы относительно пузырька при снижении окисленности поверхности с 17 до 13% и времени нахождения фаз в контакте.

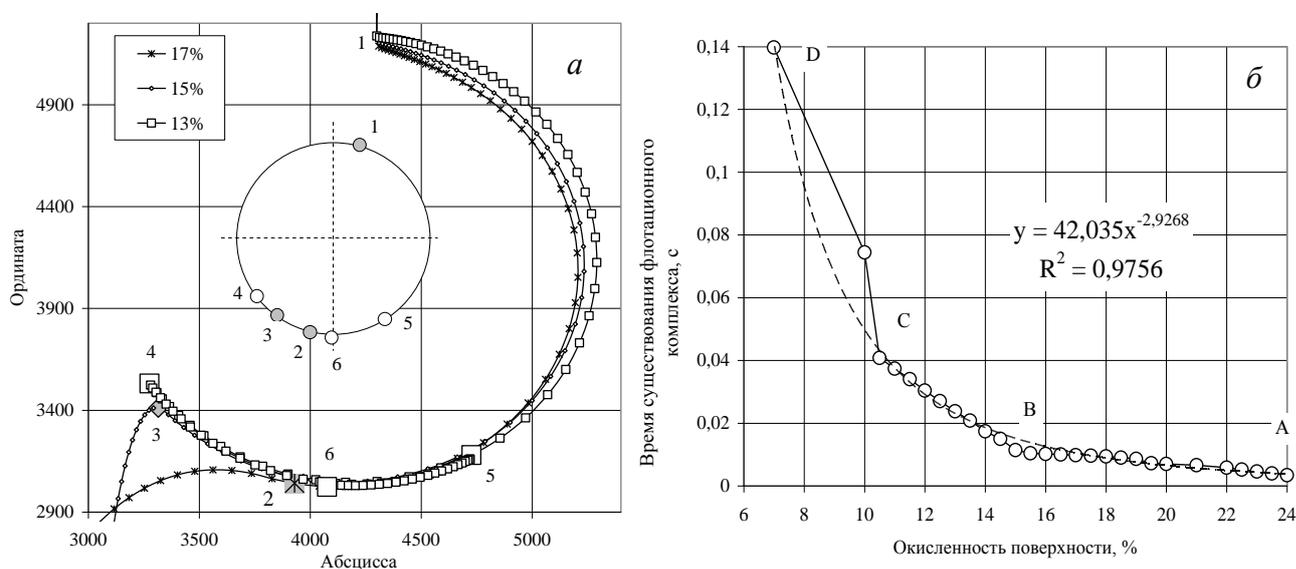


Рис. 4. Траектория движения частицы в координатах пузырька (*a*) и зависимость времени нахождения фаз в контакте от степени окисленности поверхности угольной частицы (*б*)

Траектория движения частицы в координатах пузырька начинается в точке 1 при контакте фаз (рис. 4, *a*). При движении по верхней полусфере пузырька частица разгоняется и при окисленности поверхности 17% отрывается от поверхности пузырька в точке 2, отмеченной темным маркером. Снижение окисленности до 15% способствует торможению и частица успевает подняться по нижней полусфере пузырька до точки 3, что увеличивает время нахождения фаз в контакте и вероятность удержания частицы на пузырьке. Однако снижение скорости в результате повышения вязкости поверхностных слоев оказывается недостаточным и

флотокомплекс разрушается. При снижении окисленности до 13% частица поднимается на нижней полусфере пузырька до точки 4, отмеченной крупным белым маркером. Затем скользит, ускоряясь, и поднимается на правой части полусферы до точки 5, отсюда опускается вниз и закрепляется на пузырьке в точке 6. Изменение траектории относительного перемещения частицы свидетельствует о том, что окисленность поверхности, равная 15%, является критической. При этом значении частица движется по поверхности пузырька и быстро отрывается от него. Снижение окисленности менее 15% приводит к образованию флотационного комплекса, о чем свидетельствуют и данные рис. 4, б.

На графике можно выделить три участка: 1) при высокой окисленности поверхности от 15 до 24% (участок АВ) время нахождения частицы на поверхности пузырька незначительное; 2) снижение окисленности от 15 до 11% (участок ВС) способствует росту времени контакта элементов и повышению вероятности закрепления частицы; 3) при окисленности менее 11% (участок CD) наиболее вероятно надежное закрепление частицы на пузырьке и длительное существование комплекса.

Имитационное исследование подчеркнуло необходимость применения наиболее активных реагентов и создания специальных конструкций флотомашин для возможности сепарации трудно флотируемых угольных частиц [10].

Таким образом, современный метод численного моделирования позволяет исследовать взаимодействие фаз при обогащении полезных ископаемых на микроуровне и находить рациональные условия ведения процессов разделения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обратное водоснабжение углеобогажительных фабрик / И.С. Благов, М.А. Борц, Б.И. Вахрамеев, Е.Г. Тресков. М.: Недра, 1980. 215 с.
2. Назимко Е.И. Совершенствование работы систем осветления оборотных вод углеобогажительных фабрик / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко. Днепропетровск: Полиграфист, 2000. 174 с.
3. Nazimko L.I. A Simulation of Slime Circulation and the Effect of Circuit Design / L.I. Nazimko, V.V. Nazimko // *Coal preparation*. 1996. V 17. № 3-4. P. 215-232.
4. Назимко Е.И. Исследование работы водно-шламовых систем углеобогажительных фабрик в нестационарном режиме / Е.И. Назимко, А.С. Голиков, К.А. Лифенко // Вісник Криворізького технічного університету. 2005. Вып. 6. С. 158-161.
5. Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов / Е.Е. Гарковенко, Е.И. Назимко, А.И. Самойлов, Ю.Л. Папушин. Донецк: Норд-Пресс. 2002. 266 с.
6. Cundall P.A. A discrete numerical Model for granular assemblies / P.A. Cundall, O.D.L Strack // *Geotechnique*. 1974. 29, N 1, p. 47-65.
7. Гарковенко Е.Е. Моделирование процесса вакуумного фильтрования угольных шламов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва. 2004. №1. С. 317-319.
8. 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.
9. Назимко Е.И. Моделирование процесса удаления влаги из углесодержащих осадков / Е.И. Назимко, В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин. Днепропетровск. 2011. Вып. 45(86). С. 153-158.
10. Kurchenko I.P. New Coal Flotation Technology Regulated by the Intake Degree of the Air and Reagents / I.P. Kurchenko, Yu.N. Filippenko, G.A. Mavrenko, S.O. Fedoseeva // *Proceedings of XVI International Congress of Coal Preparation*. USA. 2010. P. 471-478.

Коротко об авторах:

Голиков Алексей Сергеевич – ассистент кафедры «Обогащение полезных ископаемых» Донецкого национального технического университета (ДонНТУ, бывший ДПИ), г. Донецк, Украина. Закончил обучение в аспирантуре в 2009 г., готовится к защите диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тема работы связана с водно-шламовыми схемами углеобогатительных фабрик. Автор 11 статей в научно-технических сборниках Украины по специальности.

Науменко Виктория Георгиевна - ассистент кафедры «Обогащение полезных ископаемых» ДонНТУ, г. Донецк, Украина. Закончила обучение в аспирантуре без отрыва от производства в 2010 г., готовится к защите диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тема работы связана с проблемами обезвоживания тонкодисперсных угольных шламов. Автор 8 статей в научно-технических сборниках Украины по специальности.

Федосеева Светлана Олеговна – научный сотрудник института УкрНИИУглеобогащение, г. Луганск, обучается в аспирантуре без отрыва от производства по кафедре «Обогащение полезных ископаемых» ДонНТУ, г. Донецк, Украина. Готовит к защите диссертационную работу на соискание ученой степени кандидата технических наук. Тема работы связана с флотацией трудно флотируемых углей. Автор 12 статей в научно-технических сборниках Украины по специальности и 3 патентов.

Назимко Елена Ивановна – зав. кафедрой «Обогащение полезных ископаемых» ДонНТУ, г. Донецк, Украина, д.т.н., профессор, научный руководитель указанных выше авторов статьи.

Уважаемая редколлегия,

творческий коллектив просит опубликовать данную статью и готов оплатить расходы на внеочередное издание, т.к. к защите соискателям необходимо иметь статью в наукометрической базе, куда входит Ваш Информационно-аналитический бюллетень. На Украине таких изданий гораздо меньше.

В 2003 г. Назимко Е.И. принимала участие в работе Форума Горняков МГГУ, в сборнике №1 за 2004г. было опубликовано 2 статьи соискателей, за что огромное спасибо. Возможности принимать более активное участие в работе Форума не предвидится пока.

Переписку прошу вести на мой электронный адрес

ele-nazimko@ukr.net

С уважением, Е. Назимко