

ОБ УСРЕДНЕНИИ СОСТАВА РУДЫ НА ПРОМЕЖУТОЧНОМ СКЛАДЕ

Варламова С.А.,

к.т.н., доцент кафедры АТП Березниковского филиала (БФ)

Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ).

s.a.varlamova@gmail.com

Затонский А.В.,

д.т.н., заведующий кафедрой АТП БФ ПНИПУ.

a.v.zaton@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема усреднения состава калийной руды. Предложено использовать для усреднения состава руды с высоким содержанием нерастворимого остатка специальный алгоритм заполнения усреднительного склада. Метод гидродинамики сглаженных частиц использован для решения задачи моделирования заполнения склада с учетом пересыпания зерен руды и их сегрегации. Основанное на нем программное обеспечение позволяет моделировать высоту руды, рассыпаемой в складе, с последующим уточнением путем анализа видеоряда. Предложен метод управления рассыпкой, позволяющий в дальнейшем обоснованно определять точку выемки порции руды. Рассмотрены случаи равномерного и неравномерного статистического распределения содержания полезного компонента и нерастворимого остатка в руде. Смоделирована выемка руды грейферным краном с учетом пересыпания зерен руды в образовавшиеся пустоты.

Ключевые слова: калийная промышленность, усреднение состава руды, моделирование, автоматизация управления.

ABOUT THE HOMOGENIZATION OF AN ORE COMPOSITION IN THE INTERMEDIATE WAREHOUSE

Varlamova S.A.,

candidate of technical science, assoc. prof. on automation department
in Berezniki branch of Perm national polytechnic research university.

Zatonskiy A.V.,

doctor of technical science, head of automation department
in Berezniki branch of Perm national polytechnic research university.

Abstract. The article is about of the problem of averaging of potash ore. Using a special algorithm of filling warehouse to average composition of the ore with a high content of insoluble residue is proposed. Smoothed particle hydrodynamics method used to solve the problem of simulating a warehouse filled with the oversleeping ore with grain segregation. The software based on this method allows to simulate the height of the ore which could be subsequently clarified by analyzing the video from the stock at last. We propose a method of controlling of filling, allowing further determine rationally point to get portions of the ore. The cases of uniform and non-uniform statistical distribution of the content of useful component and the insoluble residue in ore are described. The excavation of ore with grabbing crane is simulated taking into account the scattering of ore grains.

Keywords: potash industry, ore homogenization, modeling, automation control

Одним из важных параметров эффективной работы горнодобывающего предприятия является стабильность качества руды, поступающей с карьера или рудника в переработку.

Усреднение качества включает в себя как технологические мероприятия горного производства, обеспечивающие благоприятные условия для смешивания и усреднения качества в процессе добычи, так и орга-

низационно-управляющие действия. Процесс усреднения качества начинается с перспективного и текущего планирования горных работ и продолжается при оперативном управлении добычей. При планировании в соответствии с плановыми объемами и качеством полезных ископаемых устанавливаются направление развития горных работ и конкретные участки и блоки месторождения, подлежащие отработке в планируе-

мые календарные сроки. На этапе оперативного управления регулируется нагрузка на забой в зависимости от достигнутого объема и качества полезных ископаемых в участковых и общерудничных грузопотоках и фактического качества руды в забоях. Третья фаза усреднения осуществляется в процессе формирования транспортных потоков и смешивания полезных ископаемых в участковых и общерудничном звеньях. Четвертый и наиболее эффективный этап – перегрузка руд на складах [1]. Задачей усреднительного склада является сглаживание неравномерностей качества и технологических особенностей руды.

Руды основных мировых калийных месторождений (Россия – Верхнекамское, Беларусь – Старобинское, Канада – Саскачеванское) содержат значительное количество нерастворимых силикатно-карбонатных примесей (до 12%), шламуемых в процессе измельчения руды. В планируемом к разработке с 2016 г. уральском месторождении ОАО МХК «Еврохим» ожидается содержание нерастворимых остатков (НО) до 17% [1]. Колебания содержания НО оказывают отрицательное влияние на процессы флотации сильвина (KCl). В то же время в готовом продукте должно содержаться очень незначительное количество НО (табл. 1.).

Целью данной работы является разработка математической и имитационной модели процесса усреднения руды на складе калийного предприятия, для отработки на ее базе алгоритмов управления содержанием НО.

1. Построение модели склада

Исходными данными являются размеры склада в метрах: X – ширина, Y – длина, Z – высота. Разобьем склад на кубические участки (ячейки) с заданным шагом $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$, положив $\Delta = 1$ м (рис. 1). Это позволит для моделирования заполнения склада использовать в программе трехмерный массив чисел с плавающей точкой, в котором хранятся доли заполнения ячеек рудой, а также содержание полезного компонента (KCl) и НО в данной ячейке.

2. Заполнение и разгрузка склада

Склад заполняется непрерывным потоком либо дискретными порциями руды, поступающими через транспортерную систему. Обозначим $M(t)$ – массовый расход руды, транспортированной по конвейеру за период времени t , кг/с,

Таблица 1

Характеристики готового продукта – хлорида калия технического

Показатели	Технический		Для сельского хозяйства	
	1 сорт	2 сорт	1 сорт	2 сорт
Содержание в пересчете на сухое вещество KCl, не менее	98	95±1	95±1	91±1
нерастворимый в воде остаток, не более	0,2	Не нормируется		

Экспериментально установлено, что после размолла содержание калия в крупных фракциях (0,2...5 мм) значительно выше, чем в мелких (0...0,2 мм). Поэтому важным представляется учет процессов сегрегации руды как при загрузке в склад, так и вследствие вибраций разного происхождения, так как вследствие них распределение полезного компонента в складе несколько изменяется.

в т.ч. массовый расход хлорида калия – $H(t)$, нерастворимого остатка – $N(t)$. Очевидно, что $H(t) + N(t) \leq M(t)$, за счет других компонентов руды, кроме хлорида калия и НО. Будем считать известными возможные максимальные и минимальные значения $H_{\max}(t) \geq H(t) \geq H_{\min}(t)$ и $N_{\max}(t) \geq N(t) \geq N_{\min}(t)$, а также значения $H(t)$ и $N(t)$ в каждый конкретный момент времени.

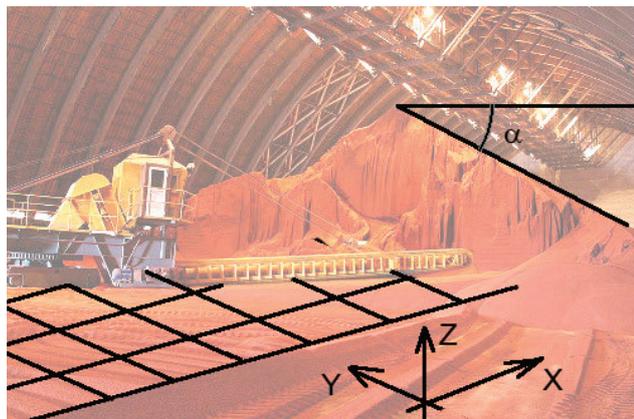


Рис. 1. Дискретизация пространства склада

Для усреднения состава руды предлагается следующий подход.

Будем заполнять склад рудой таким образом, чтобы состав руды в каждой точке склада был известен. Тогда появится возможность выбрать руду на переработку, например, с помощью грейферного крана с объемом d^3 , m^3 , таким образом, чтобы поток учитываемых компонентов оставался стабильным при допустимых отклонениях в исходной руде. При использовании одного или двух кратцер-кранов, перемещающихся вдоль склада, стрелой будут захватываться несколько ячеек, расположенных на одной прямой, сразу, что осложняет процесс управления, но не делает его невозможным. В данной работе сосредоточимся на процессе грейферной разгрузки.

Для осуществления моделирования загрузки и разгрузки склада применим алгоритмы *Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)*, разделив всю массы руды на множество взаимодействующих частиц [1]. Моделирование, в конечном итоге, сводится к расчету этих взаимодействий путем решения систем дифференциальных уравнений для каждой частицы. Основная идея *SPH* в том, что каждая частица в некоторой степени «заимствует» физические характеристики у своих ближайших соседей [4]:

$$A(r_i) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} \Omega(r_i - r_j), \quad (1)$$

где $A(r_i)$ – скалярная функция или проекция векторной функции (скорости, например) i -й частицы, в том числе, A_j – ее значение для j -й частицы из заданной окрестности i -й частицы, m_j – масса, ρ_j – плотность, r_j – вектор положения j -й частицы, $\Omega(\cdot)$ – функция сглаживания (или функция ядра), определяющая, какое количество конкретной величины нужно позаимствовать у частицы, находящейся на расстоянии r_j от интересующей нас точки с вектором положения r_i . Градиент и лапласиан, соответственно, вычисляются как

$$\nabla A(r_i) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} \nabla \Omega(r_i - r_j)$$

и

$$\Delta A(r_i) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} \Delta \Omega(r_i - r_j).$$

Как правило [6], окрестность i -й частицы определяется пропорционально наперед заданной длине сглаживания h :

$$\Omega_i = \{r_j : |r_j - r_i| \leq k_h \cdot h\},$$

где коэффициент пропорциональности k_h определяется соответственно функции сглаживания. Функция сглаживания $\Omega(\cdot)$ должна удовлетворять ограничениям

$$\begin{cases} \int_{\Omega_i} \Omega(r_i - r_j) dr_j = 1 \\ \lim_{h \rightarrow 0} \Omega(r_i - r_j) = \delta(|r_i - r_j|) \\ \Omega(r_i - r_j) \equiv 0 \Leftrightarrow r_j \notin \Omega_i \end{cases}$$

где $\delta(\cdot)$ – дельта-функция.

В [8] предлагается следующая функция сглаживания с $k_h = 2$:

$$\Omega(R) = \begin{cases} k_i \left(\frac{2}{3} - \frac{9R^2}{8} + \frac{19R^3}{24} - \frac{5R^4}{32} \right) : 0 \leq R \leq 2 \\ 0 \end{cases}$$

где параметр k_i зависит от размерности задачи D и длины сглаживания:

$$k_i = \begin{cases} 15\pi/7h^2 : D = 2 \\ 305\pi/208h^2 : D = 3 \end{cases},$$

хотя могут быть применены и другие, удовлетворяющие вышеприведенным ограничениям.

Для несжимаемой жидкости любой реологии (в том числе, и неньютоновской сыпучей смеси) уравнение (1) примет вид

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \Delta \vec{v}, \quad (2)$$

где $\rho = \frac{\sum_j m_j}{\sum_j V_j^*}$ – усредненная плотность частиц в j -й окрестности частицы, $\vec{v}_j = d\vec{r}_j/dt$ для всех частиц в окрестности, μ – усредненная вязкость, приведенный объем частицы $V_j^* = V_j + V_j^0$, где V_j – собственно объем частицы, V_j^0 – объем пустот вокруг частицы, обычно выражаемый через коэффициент пористости $k_p = \frac{\sum_j V_j^0}{\sum_j V_j}$, давление вычисляется по формуле для плотности силы давления

$$f_i^p = \nabla p = -\sum_j m_j \frac{p_i + p_j}{2\rho_j} \nabla \Omega(r_i - r_j),$$

где градиент берется от давления, пропорционального разности между действительной и «остаточной» плотностью ρ_0 :

$$p_i = k(\rho_i - \rho_0).$$

С точки зрения математики, добавление константы ρ_0 в уравнение не несет никакой нагрузки, так как при вычислении градиента она сокращается. Однако она влияет на градиент, вычисленный по формулам SPH, увеличивая устойчивость расчетов.

Плотность силы вязкости вычисляется по формуле

$$f_i^v = \mu \Delta v = \mu \sum_j m_j \frac{v_i + v_j}{\rho_j} \nabla \Omega(r_i - r_j).$$

Следовательно, конечное ускорение каждой частицы

$$\frac{d^2 r_i}{dt^2} = \frac{dv_i}{dt} = \frac{f_i^p + f_i^v}{\rho_i} + \frac{f_i^e}{m_i}, \quad (3)$$

где f_i^e – сумма всех внешних сил (а не плотностей сил), действующих на i -ю частицу, включая силу гравитации.

Задача моделирования в конечном итоге сводится к расчету сил в (3) в соответствии с алгоритмом (рис. 2). Аналогичный алгоритм работает и во время процедуры разгрузки склада, только шаги «Генерация частицы» и «Падение частицы» заменяются одномоментной выемкой грейфером заданного объема.

Для дополнения модели процессом сегрегации руды необходимо учитывать параметр размера частиц в интервале от r_1 до r_2 , m и экспериментальную зависимость содержания КСІ в зернах руды от их размера. Также для работы модели использована информация о физических свойствах компонент: p_H – насыпная плотность хлорида калия (кг/м³), p_N – плотность нерастворимого остатка (кг/м³), m_H – масса частицы хлорида калия (кг), m_N – масса частицы нерастворимого остатка (кг), α – угол осыпания руды (рад.), через который определяется коэффициент трения между частицами и, значит, коэффициент вязкости μ в (2) и т.д.



Рис. 2. Алгоритм обработки информации для моделирования заполнения склада

Вышеописанный алгоритм реализован в программе, написанной в среде Delphi. В результате ее работы моделируется заполнение склада (массива ячеек) значениями в диапазоне от 0 до 1, которые отражают долю заполнения каждой ячейки. Заполненный массив значений позволяет определить уровни заполнения склада в каждой точке и значение показателей хлорида калия и нерастворимого остатка. В дальнейшем возможна корректировка уровней заполнения, например, по показаниям камер, установленных неподвижно на потолке склада либо подвижной камере на грейферном кране.

3. Выбор точки сброса руды

Точка сброса руды выбирается в зависимости от состава рудной массы. Основная идея алгоритма управления точкой сброса заключается в том, что в зависимости от статистических распределений содержания хлорида калия $H(t)$ и нерастворимого остатка $N(t)$ можно выбрать точку с координатами (x, y) , где $0 \leq x \leq X$, $0 \leq y \leq Y$, X – ширина склада, м, Y – длина склада, м, таким образом, что в дальнейшем, управляя краном, можно будет загрузить в бункер руду с известным содержанием КС1 и НО.

В первом приближении предполагается, что статистическое распределение обоих компонент линейное с $H_{\max} \geq H(t) \geq H_{\min} \forall t \geq 0$ и $N_{\max} \geq N(t) \geq N_{\min} \forall t \geq 0$. Тогда точку y можно рассчитать из соотношения $\frac{y}{Y} = \frac{H(t) - H_{\min}}{H_{\max} - H_{\min}}$. Аналогично можно рассчитать и точку $x = X \frac{N(t) - N_{\min}}{N_{\max} - N_{\min}}$.

При накоплении статистической информации о фактических значениях $H(t)$ распределение вероятностей может стать нелинейной функцией, которую можно определить статистическими методами. Тогда с помощью статистического анализа можно рассчитать вероятность распределения $f(H(t))$ и определить координату точки сброса руды по формуле:

$$y = f(H(t)) \cdot Y : \begin{cases} f(H(t) < H_{\min}) = 0; \\ f(H(t) \leq H_{\max}) = 1. \end{cases}$$

Полученная функция распределения должна периодически уточняться, например, во время бездействия склада, когда руда на склад не поступает и со склада не извлекается. Аналогично уточняется и используется функция $f(N(t))$.

Общий алгоритм работы имитационной модели заполнения склада представлен на рис. 3. В начале работы алгоритма склад пустой.

ШАГ 1. Ввод начальных значений: характеристик склада, физических параметров рудной массы, а также допущений, необходимых для работы SPH-алгоритмов заполнения склада.

ШАГ 2. Если склад заполнен более чем на 80%, алгоритм прекращает работу, иначе переходим к шагу 3.

ШАГ 3. Генерация в течение времени $0..t$ порции рудной массы $M(t)$ со случайными показателями массы хлорида калия ($H(t)$) и нерастворимого остатка ($N(t)$) в пределах возможных значений. Этот шаг при фактическом использовании будет заменен на ввод данных о поступившей порции руды.

ШАГ 4. Выбор точки сброса руды с координатами (x, y) . Алгоритм выбора точки сброса руды описан выше.

ШАГ 5. Для установленных координат (x, y) проверяем значение высоты (z), полученное при работе SPH-алгоритма (3). При первом проходе программы все значения высот 0. Далее они вычисляются в процессе работы SPH-алгоритма заполнения и разгрузки склада. Если значение высоты в выбранной точке более 80% от максимально возможного (Z), то переход на ШАГ 6, иначе переход на ШАГ 8.

ШАГ 6. Выбрать соседнюю точку. Соседняя точка выбирается с применением восьмисвязного обхода соседей в окрестности Ω_j . Первой выбирается точка, находящаяся правее соседней, и так далее пока не будет найдена подходящая или не будут просмотрены все соседи. Если среди восьмисвязных точек не найдена подходящая, то рекурсивно рассматриваются восьмисвязные соседи для последней рассмотренной и так далее.

ШАГ 7. Проверяем значение высоты (z) для соседней точки. Если значение высоты в выбранной

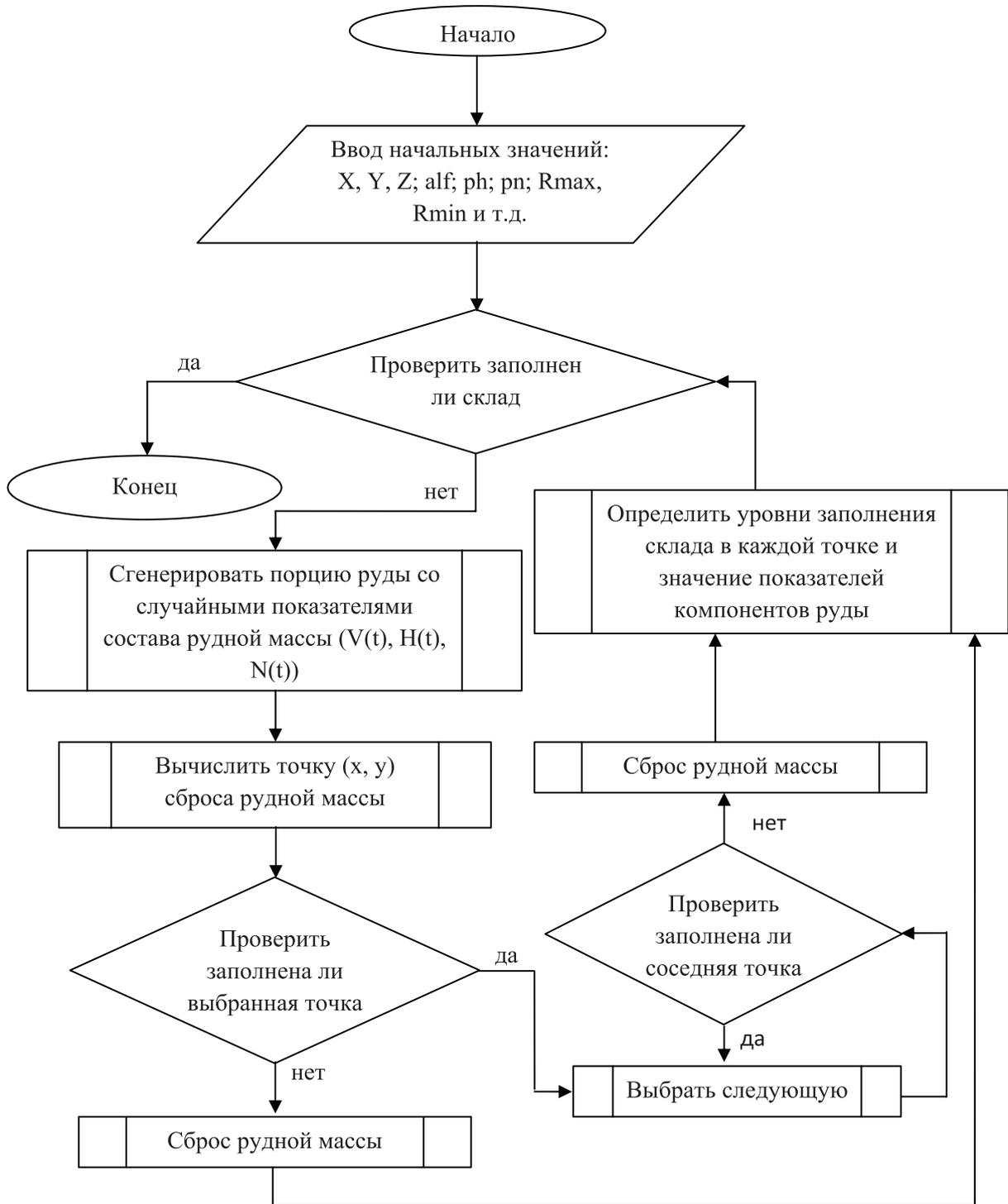


Рис. 3. Общий алгоритм работы модели заполнения склада

точке более 80% от максимально возможного (Z), то возвращаемся на шаг 7, иначе переход на шаг 9.

ШАГ 8. Сброс руды. Работает процедура моделирования заполнения склада (описана выше) с учетом сегрегации при рассыпании порции руды по ранее заполненным ячейкам.

ШАГ 9. Пересчитываем показатели руды и высоты заполнения склада в каждой точке по окончании рассыпания и возвращаемся на шаг 2.

Алгоритм для моделирования разгрузки склада грейфером выглядит следующим образом:

ШАГ 1. Определить точку для разгрузки по необходимым параметрам рудной массы.

ШАГ 2. Если достаточное количество руды (соответствующее объему грейфера) в выбранной точке есть, то переход на шаг 4, иначе на шаг 3.

ШАГ 3. Выбрать соседнюю точку из соседних восьмисвязных. Повторять рекуррентно, пока не будет найдена точка с достаточным количеством руды.

ШАГ 4. Процедура извлечения руды с применением SPH-алгоритмов (3).

ШАГ 5. Пересчитываем показатели руды и высоты заполнения склада в каждой точке с учетом рассыпания руды после выемки и сегрегационных процессов и возвращаемся на шаг 1.

Недостатком изложенных алгоритмов является то, что в них не учитываются сегрегационные процессы вследствие вибрации, вызванной погружением ковша грейферного крана, сбросом руды в соседних точках, работой кратцер-крана и т.п. Вследствие сложности моделирования распространения вибраций в сыпучих средах, этот вопрос требует дополнительного объемного исследования.

Предложенный алгоритм позволяет осуществлять управление сбросом и выемкой калийной руды с усреднительного склада. Его эффективность зависит от конкретных значений $\{H, N\}_{\max}$ и $\{H, N\}_{\min}$ для обоих компонентов, их статистических распределений и геометрических размеров склада.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Усольский калийный комбинат – для будущих поколений // Промышленная безопасность, 2013.– №5: анонс. [Электронный ресурс] режим доступа <http://pbperm.ru/anonsy/1188-----5-2013--.html>.
2. M. Mueller, D. Charypar, M. Gross. Particle-Based Fluid Simulation for Interactive Applications // Eurographics/SIGGRAPH Symposium on Computer Animation (2003) [Электронный ресурс] режим доступа <http://www.matthiasmuller.info/publications/sca03.pdf>.
3. Лобко В.В. Автоматизированная система управления стабилизацией качества и количества руды, обогащаемой при производстве минеральных удобрений // Доклады БГУИР.– 2005.– №1.
4. Симонов Л. Моделирование жидкости в 2D с использованием GPU [Электронный ресурс] режим доступа <http://www.uraldev.ru/articles/29>.
5. Стаценко Л.Г. Разработка модуля “Усреднительный склад” информационной системы стабилизации качества полезного ископаемого в карьере // «Инновации в науке»: материалы XIX международной заочной научно-практической конференции. (22 апреля 2013 г.).– Новосибирск: СибАК, 2013.
6. Суравикин А.Ю. Реализация метода SPH на CUDA для моделирования несжимаемых жидкостей // Наука и образование.– 2012.– №7. [Электронный ресурс] режим доступа <http://technomag.edu.ru/file/out/505350>
7. Усреднение качества. Горная энциклопедия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – URL: <http://www.mining-enc.ru/u/usrednenie-kachestva/>.
8. Liu M., Liu G. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): An overview and recent developments. Archives of Computational Methods in Engineering, 2010, vol. 17, no. 1, pp. 25-76.