



Рис. 3. Розподіл середніх деформацій за висотою перерізу дослідних балок з порушеним зчепленням арматури з бетоном

Проведені дослідження показали відсутність зв'язку між порушенням зчеплення арматури з бетоном та несучою здатністю дослідних балок. Останнє пояснюється недостатньою довжиною експериментальних балок, яка не дозволила забезпечити більшу довжину ділянки арматури з порушеним зчепленням.

Результати співставлення теоретичних даних ширини розкриття тріщин та несучої здатності експериментальних балок, розрахованими на підставі наведеної вище теорії розрахунку, з дослідними, показали задовільну їх точність (у межах 9 %) [4].

Основні висновки. Експериментальні

досліди показали, що:

Ступінь порушення зчеплення арматури з бетоном збільшує відстань між нормальними тріщинами та ширину їх розкриття;

Збільшення довжини ділянки з порушеним зчепленням практично не впливає на відстань між нормальними тріщинами в зоні чистого згину, але збільшує ширину їх розкриття;

Довжина експериментальних балок не дозволила повністю дослідити зв'язок між несучою здатністю балок та порушеним зчепленням арматури з бетоном;

Наведена методика розрахунку показала в цілому задовільну збіжність з експериментальними даними. Для оцінки її надійності щодо визначення несучої здатності реальних конструкцій, необхідні додаткові експериментальні дослідження.

Список літератури

1. Вайсфельд А.А. Исследование напряженно-деформированного состояния нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов при частичном или полном отсутствии сцепления арматуры с бетоном / А.А. Вайсфельд // Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Л., 1982. – 22 с.
2. Прокопович А.А., Филатов В.В. Оценка влияния нарушения сцепления арматуры с бетоном на прочность нормальных сечений эксплуатируемых конструкций / А.А. Прокопович, В.В. Филатов // Сб. тр. Исследование влияния качества изготовления, монтажа и эксплуатации железобетонных конструкций на их несущую способность. – М.: НИИЖБ, 1986. – С. 55-59.
3. Спрыгин Г.М. Несущая способность железобетонных рам, усиленных под нагрузкой / Г.М. Спрыгин // Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб, 1992. – 23 с.
4. Лазовский Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений / Д.Н. Лазовский. – Новополюк: Изд-во Полоцкого гос. ун-та, 1998. – 240 с.
5. Лазовский Д.Н. Авдошка А.В. Усиление балок с нарушенной анкеровкой арматуры / Д.Н. Лазовский, А.В. Авдошка // Бетон и железобетон. – 1993, №2. – С. 7-9.

Рукопись постуила в редакцию 30.03.12

УДК 621.926: 34.16

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., В.М. РАДИОНОВ, аспирант
ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ПУЛЬПЫ В ГИДРОЦИКЛОНЕ С УЧЕТОМ ЕЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Изложены принципы синтеза математической модели классификации частиц измельченной руды, лежащие в основе разработки системы автоматического управления гидроциклоном.

Ключевые слова: гидроциклон, модель гидродинамики, энергоэффективность, ультразвук.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Оптимизация качествен-

ных и количественных параметров разделительных процессов обогатительного передела - основные направления решения задачи повышения энергоэффективности производства и снижения себестоимости продукции. На стадии рудоподготовки, а также последующего обогащения, технико-экономические показатели процесса во многом зависят от качества классификации перерабатываемого сырья в гидроциклоне. Оптимизацию качественных и количественных характеристик слива гидроциклона обеспечивает автоматизированное управление технологическим процессом. Современные модели гидродинамики многофазных сред, возросшие возможности вычислительной техники, применение высокоточных и малоинерционных средств комплексного контроля состояния технологического оборудования и параметров пульпы могут быть положены в основу разработки соответствующей системы управления. Физико-механические и минералогические характеристики сырья вносят свои коррективы в процесс классификации.

Анализ исследований и публикаций. В работе [1] проведено численное исследование структуры течения и сепарационных процессов в гидроциклоне с учетом турбулентности потока и турбулентной диффузии частиц, на основе уравнений Навье-Стокса. На основе уравнений Рейнольдса в работе [2] выполнено исследование структуры течения в гидроциклоне с использованием различных моделей турбулентности.

Теоретический анализ сепарации измельченной руды в гидроциклоне при различных режимах поведения твердой фазы, исследование влияния содержания твердой фазы и ее гранулометрического состава на классификацию выполнено в работе [3]. Кроме того, исследованы нестационарные процессы, происходящие в гидроциклоне вследствие флуктуации концентрации твердой фазы на выходе из подводящего патрубка.

В работе [4] проанализированы физико-механические и минералогические особенности железной руды, обуславливающие работу аппаратов обогатительного передела. Отмечается, что основная задача управления работой гидроциклона заключается в установлении и поддержании режима разделения, обеспечивающего необходимую для эффективного раскрытия полезного компонента гранулометрическую характеристику измельченного материала.

Однако существующие модели классификации руды в гидроциклоне не в полной мере учитывают влияние турбулентного движения сильнозакрученных многофазных потоков на его сепарационные характеристики, что негативно влияет на технико-экономические показатели всего технологического процесса обогащения.

Цель исследований. Анализ и коррекция моделей гидродинамики многофазного турбулентного потока пульпы в гидроциклоне с учетом физико-механических характеристик железорудной пульпы в процессе синтеза адаптивной системы автоматизированного управления (САУ).

Изложение материала и результаты. В реальных условиях обогатительной фабрики происходят достаточно быстрые изменения свойств и состава пульпы, поступающей на классификацию, также изменяются условия протекания самого процесса. Это вызвано многими факторами: колебанием качества и количества измельчаемого сырья, характеристиками и концентрацией твердой фазы пульпы, состоянием оборудования, перепадами давления и др.

Таким образом, как для синтеза математической модели, ее параметризации, идентификации функций, так и для расчета системы автоматического регулирования, существует необходимость быстрого и точного получения и учета информации о динамике изменения физико-механических характеристик пульпы и ее движения в гидроциклоне.

Современной основой для расчетов гидроциклонов могут служить методы механики сплошных сред и вычислительной математики с привлечения полных уравнений гидромеханики (уравнений Навье-Стокса), уравнений турбулентного движения сильнозакрученных многофазных потоков, механики межфазного взаимодействия с последующей интеграцией полученных моделей в САУ.

Уравнение движения одиночной частицы в форме Буссинеска-Бассе-Озеена, как комбинация уравнения Навье-Стокса, движения несущей среды, с выражением для силы присоединенных масс и с законом движения может быть представлено в следующем виде

$$\rho V(1 + C_{vm}) \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_F + \vec{F}_S + \vec{F}_M + \vec{F}_B + (1 + C_{vm}) p_e V \frac{D\vec{v}_e}{Dt} + (p - p_e) \vec{F}_G, \quad (1)$$

где $\vec{F}_G = \rho V \vec{g}$ - сила тяжести, \vec{F}_F - сила Факсена, \vec{F}_S - сила Саффмана, \vec{F}_M - сила Магнуса, \vec{F}_{vm} - сила присоединенных масс при ускоренном движении, \vec{F}_B - сила Бассе, характеризующая

предысторию движения.

Взаимодействие частиц между собой, на основе предположений классической теории удара, с учетом импульса и частоты столкновений между собой определяется выражением

$$\rho_p \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_a + \frac{\pi\alpha}{4} (1+e) \sum_{j=1}^N (d_i + d_j)^2 \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} n_i n_j |\vec{v}_i - \vec{v}_j| (\vec{v}_i - \vec{v}_j), \quad (2)$$

где F_D - сила сопротивления, F_a - выталкивающая сила.

Проведенный анализ стохастического (диффузионного) переноса частиц вследствие ударного взаимодействия показывает, что ударное рассеяние частиц в потоке оказывает пренебрежимо малое влияние на распределение массы дисперсной фазы (порядка $10^{-9}-10^{-18}$ м⁵/кг·с). Сделан вывод, что соударения частиц существенным образом определяют их скорость осаждения в воздушной среде и практически не влияют на процесс седиментации в жидкости [6].

В гидроциклоне имеет место ударное взаимодействие частицы с его стенкой в процессе классификации рудной пульпы. Параметром, характеризующим столкновения является не число Рейнольдса, а число Стокса $Stk = \rho_p v_n d_p / \mu$, являющееся отношением силы инерции частицы к силе внутреннего трения (плотность частицы, диаметр частицы, динамическая вязкость жидкости и скорость частицы). При низких значениях Stk не происходит отскока частицы, так как упругая энергия переходит в деформацию частицы, а затем полностью рассеивается в жидкости. При значениях Stk выше некоторого критического переходного значения Stk^* частица совершает отскок от стенки. Примечательно, что Stk^* слабо зависит от упругих свойств материалов стенки и частицы. Зависимость, которую можно использовать при моделировании процесса столкновения твердых частиц в газе или жидкости при численном моделировании двухфазных потоков имеет следующий вид

$$e/e_{\max} = f(Stk) = (1 - \exp(-0.043Stk))^{3.29} \quad (4)$$

Анализируя траектории частиц после удара со стенкой гидроциклона отметим, что для частиц крупностью менее <500 мкм, движущихся в водной среде со скоростью равной скорости седиментации, первое соударение со стенкой является и последним [5]. Следует отметить, что вследствие увеличения времени пребывания частиц крупностью более 500 мкм в гидроциклоне несколько снижается его производительность по пескам за счет удлинения траектории движения этих частиц.

В сильнозакрученных потоках гидроциклона при определенных условиях возникают возмущения из-за перепадов давления, зависящих от колебаний плотности поступающей пульпы, подсоса воздуха через разгрузочные отверстия, возникновения воздушного столба в приосевой зоне и т.д. Малые возмущения, затухающие со временем, дают возможность точного решения уравнений движения вязкой жидкости при корректно сформулированных начальных и граничных условиях, которые должны формально существовать при любых числах Рейнольдса. Но когда возмущения возрастают со временем, движение жидкости становится неустойчивым и фактически не может существовать. Таким образом, потеря устойчивости течения способствует возникновению турбулентности, которая приводит к более равномерному распределению частиц всех размеров в гидроциклоне и, как следствие, ухудшению качества сепарации.

Основная проблема моделирования турбулентности связана с определением напряжений Рейнольдса, которые появляются в уравнениях движения осредненного течения. Наиболее распространенным подходом к моделированию напряжений Рейнольдса является гипотеза Буссинеска. В соответствие с этой гипотезой напряжения Рейнольдса линейным образом связаны с градиентом осредненной скорости, а в качестве коэффициента пропорциональности выступает коэффициент турбулентной вязкости [7].

Отличительная особенность турбулентных течений заключается в том, что все характеристики потока пульсируют случайным образом на фоне своих средних значений. Поэтому для математического исследования турбулентного течения его мгновенные характеристики представляют как сумму осредненного и пульсационного движения. Уравнение турбулентной диффузии частиц в этом случае

$$\frac{\partial \rho_p \langle M_p \rangle}{\partial t} + \text{div}(\rho_p \langle M_p \rangle \langle \vec{v}_p \rangle) = -\text{div}(\rho_p \langle M_p' \rangle \langle \vec{v}_p' \rangle) \quad (5)$$

где M_p - массовая концентрация, \vec{v}_p - абсолютная скорость дисперсной фазы, ρ, ρ_p - плотность несущей и дисперсной фазы,

Турбулентный диффузионный поток частиц описывается выражением [8]

$$-\rho_p \langle \vec{v}_p' M_p' \rangle = \rho_p \psi \langle \vec{v}_p' \otimes \vec{v}_p' \rangle \frac{k}{\varepsilon} \text{grad} \langle M_p \rangle, \quad (6)$$

где k/ε - период турбулентной пульсации (отношение кинетической энергии к скорости ее диссипации); ψ - фактор отображающий инерционность частиц, зависящий от масштаба турбулентности (размера энергосодержащего вихря) $L = k^{3/2}/\varepsilon$, турбулентного числа Рейнольдса $Re_t = \rho \sqrt{k} d_p / \mu$, размера частиц и режима обтекания.

В случае турбулентного режима течения уравнение сохранения массы дисперсной среды после осреднения по Рейнольдсу приобретает вид уравнения диффузии

$$\frac{\partial \rho_p \langle M_p \rangle}{\partial t} + \text{div}(\rho_p \langle M_p \rangle \langle \vec{v}_p \rangle) = -\text{div}(\rho_p \psi D_t \text{grad} \langle M_p \rangle), \quad (7)$$

Это уравнение описывает конвективный перенос частиц осредненным потоком и турбулентную диффузию (стохастическое движение частиц вследствие турбулентных пульсаций). Результаты численных расчетов показывают, что коэффициент турбулентной диффузии для мелких частиц достаточно высок и частицы переносятся турбулентным потоком также, как и жидкость, малые турбулентные пульсации приводят в движение лишь мелкие частицы, однако с увеличением Re_t в движение приходят все более крупные частицы. С дальнейшим увеличением размера частиц их подвижность резко ослабевает. Если размеры частиц превышают размеры энергосодержащих вихрей $d_p > L$, то частицы не переносятся потоком. Таким образом, крупные частицы не могут диффундировать, несмотря на высокий уровень турбулентности.

Совокупные уравнения сепарации (закон сохранения и баланс сил) рудной пульпы в гидроциклоне имеют вид [9]

$$\begin{aligned} \partial(m\gamma) / dt &= -\partial(m\gamma v_x) / dx; \\ a_u [\rho - \bar{\rho}] - \alpha_{conp}(l)(v_x - v_{cp}) - k_{grad}(l)\gamma^{-1} \partial\gamma / \partial x &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где $m = m(x, t)$ - доля твердого в пульпе в точке (x) , $m \approx \text{const}$; $\gamma = \gamma(l, \rho, x, t)$ - функция фракционного состава в точке (x, t) ; $v_x = v_x(l, \rho, x, t)$ - средняя скорость частицы (l, ρ) в точке (x, t) в направлении сепарации x , м/с; $a_u \rho = v_{окр}^2 R^{-1} \rho = F_{цб}$ - центробежная сила, Н/м³; $-\bar{a}\bar{\rho} = F_{ц\bar{a}}$ - центробежно-архимедова сила, Н/м³; $\bar{\rho} = (1 - m)\rho_{cp} + m \int_D \rho \gamma d\rho dt$ - средняя плотность постели в точке (x, t) , т/м³; $\alpha_{conp}(l) \approx \alpha_c / l^2$ - коэффициент внутреннего трения (сопротивления), с/м²; $v_{cp} = Q_{исх} / S$ - средняя радиальная скорость оттока от стенки пульпы, м/с, равная отношению объемного потока пульпы в гидроциклон $Q_{исх}$ (м³/с) к площади боковой поверхности S (м²); $k_{град}(l)$ - коэффициент градиентной силы, Н/м².

Решение при достаточно большом времени сепарации T , которое характеризует фракционный состав по глубине постели к моменту окончания сепарации, имеет вид

$$\gamma_{пред}(l, \rho, x, T) = AD^{-1} h \gamma_{исх}(l, \rho) \exp(AD^{-1}x) : [\exp(AD^{-1}x_{дно}) - \exp(AD^{-1}x_{верх})], \quad (9)$$

где $A = -v_{cp} + a_u(\rho - \rho_{пульпы}) / (\alpha_{conp}(l))$ - коэффициент «сноса», м/с, зависящий от l и ρ частиц и равный скорости частиц в отсутствие градиентной силы $k_{град} = 0$; $h = x_{дно} - x_{верх}$ - толщина постели, м; $D = k_{град}(l) / \alpha_{conp}(l)$ - коэффициент диффузии, м³/с.

Сепарационная характеристика гидроциклона при этих допущениях получается в виде [9]

$$\begin{aligned} \varepsilon_{сл}(l, \rho) &= \int_{x_{верх}}^{x_p} \gamma(l, \rho, x, T) dx \Big/ \int_{x_{верх}}^{x_{дно}} \gamma(l, \rho, x, T) dx = \\ &= [\exp(AD^{-1}x_p) - \exp(AD^{-1}x_{верх})] / [\exp(AD^{-1}x_{дно}) - \exp(AD^{-1}x_{верх})]. \end{aligned} \quad (10)$$

Величина x_p определяется отношением потоков слива $Q_{сл}$ и песков $Q_{пес}$

$$x_p \approx x_{верх} + (x_{дно} - x_{верх}) Q_{сл} / (Q_{пес} + Q_{сл}). \quad (11)$$

В частном случае сырьё с частицами постоянной плотности $\rho = \rho_0 = \text{const}$ гидроциклон работает как классификатор по крупности l . Одномерная сепарационная характеристика при Stokesовом сопротивлении и x_p в середине постели принимает вид

$$\varepsilon_{cl}(l) = 0,5 - 0,5th \left\{ h(4D)^{-1} \left[a_y (\rho - \rho_{\text{пульпы}}) \right]^2 / \alpha_c - v_{cp} \right\} = 0,5 - 0,5th \left[hbl^2 (4D)^{-1} (l^2 - l_p^2) \right], \quad (12)$$

где $b = a_y(\rho_0 - \rho_{\text{пульпы}}) / \alpha_c$; $l_p = \sqrt{v_{cp}^2 / b}$ - крупность разделения.

В другом случае узкоклассифицированного питания $l = l_0 = \text{const}$ гидроциклон работает как сепаратор по плотности с характеристикой

$$\varepsilon_{cl}(l) = 0,5 - 0,5th \left\{ h(4D)^{-1} \left[a_y (\rho - \rho_{\text{пульпы}}) \right]^2 / \alpha_c - v_{cp} \right\} = 0,5 - 0,5th \left[ha_y l_0^2 (\rho - \rho_p) / \alpha_c \right], \quad (13)$$

где $\rho_p = -\rho_{\text{пульпы}} + v_{cp} \alpha_c / (a_y l_0^2)$ - плотность разделения.

Величины крупности разделения l_p и плотности разделения ρ_p в двух последних для ε_{cl} формулах найдены для частного случая $Q_{cl} = Q_{\text{пес}}$, т.е. x_p находится в середине постели [9].

В работе [4] показано, что действие радиационного давления высокоэнергетического ультразвука на поток рудной пульпы подобно действию центробежной силы, что позволяет выполнить моделирование поведения частиц твердой фазы в гидроциклоне.

Сила радиационного давления, представленная через полные и дифференциальные сечения рассеяния и поглощения ультразвуковой волны на частицах определяется выражением

$$\Phi = I / c (\sigma_p + \sigma_s \mu), \quad (14)$$

где I - интенсивность падающей волны; c - скорость ее распространения;

$$\mu = \frac{2\pi}{\sigma_s - 1} \int d \cos v \frac{d\sigma}{d\Omega} (\cos v) (1 - \cos v).$$

Для сферических частиц радиуса r дифференциальное эффективное сечение рассеяния имеет вид

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} (\cos v) = \frac{r^2}{9} (kr)^4 \left(a_1 - \frac{3}{2} a_2 \cos v \right)^2, \quad (15)$$

где $a_1 = 1 - rc^2 (\rho_T c_T^2)^{-1}$; $a_2 = (2\rho_T - \rho)(2\rho_T + \rho)^{-1}$; ρ_T, c_T - плотность частицы и скорость ультразвука в материале частицы; ρ, c - плотность среды и скорость ультразвука в ней.

На высоких частотах $\sigma_p \ll \sigma_s$, поэтому

$$\Phi = 0,44\pi r^2 (kr)^4 (a_1^2 + a_1 a_2 + 0,75 a_2^2) \frac{I}{c}. \quad (16)$$

Характер изменения концентрации частиц и распределения их по крупности в поле высокоэнергетического ультразвука зависит от плотности самих частиц, частоты и интенсивности воздействующего излучения [4]. Концентрация частиц $n_r(Z, t)$ радиуса r на глубине Z в момент времени t

$$\frac{\partial n_r(Z, t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial Z} [V_r(Z, t) n_r(Z, t)]. \quad (17)$$

В этом уравнении $V_r(Z, t)$ - скорость смещения частицы радиуса r с координатой Z в ультразвуковом поле. Скорость направлена вдоль оси z , т.е. перпендикулярна потоку пульпы. Интенсивность ультразвуковой волны I изменяется по экспоненциальному закону (первоначальное значение I_0), коэффициент ее затухания α зависит от частоты ультразвука ν_0 . С учетом анализа, выполненного в работе [4], концентрация частиц $n_r(Z, t)$ определяется по формуле

$$n_r(Z, t) = n_0 \frac{e^{\alpha z}}{e^{\alpha z} - \alpha \beta t} St(e^{\alpha z} - 1 - \alpha \beta t), \quad (18)$$

где $n_r(Z, 0) = n_0$, $n_r(0, t) = 0$ - начальные и граничные условия;

$$St(X) = \begin{cases} 0, & X < 0 \\ 1, & X \geq 0; \end{cases} \quad \beta = \frac{2r(kr)^4}{27\eta c} I_0 (a_1^2 + a_1 a_2 + \frac{3}{4} a_2^2); \quad a_1 = 1 - \frac{rc^2}{\rho c_{\square}^2}; \quad a_2 = 2 \frac{\rho_{\square} - \rho}{2\rho_{\square} + \rho};$$

ρ_T, c_T - плотность частицы и скорость ультразвука в материале частицы; ρ, c - плотность среды и скорость ультразвука в ней.

Приведенные выражения были использованы при моделировании процесса классификации

частиц измельченной руды в гидроциклоне и вычисления его сепарационной характеристики. Полученные модели гидродинамики и сепарационных характеристик дают достаточно точное представление о процессах происходящих в многофазных, сильнозакрученных, быстроизменяющихся потоках гидроциклона. Применение данных моделирования при расчете параметров гидроциклонов позволяет выполнить оптимизацию характеристик технологического оборудования и предоставляет возможность перехода на качественно более высокий уровень в разработке систем управления процессом классификации. Следует также отметить, что для такого моделирования вводится ряд допущений для упрощения расчетов в определенной мере идеализирующие процесс.

Выводы. Коррекция моделей гидродинамики многофазного турбулентного потока гидроциклона с учетом особенностей гранулометрического состава и других свойств железорудной пульпы способствует получению более точного решения задачи. Для синтеза математической модели гидроциклона, ее параметризации и эффективного использования в системе автоматического регулирования, существует необходимость быстрого и точного получения информации о динамике изменения гранулометрического состава твердой фазы пульпы с оценкой степени раскрытия полезного компонента.

Перспективы использования силы радиационного давления высокоэнергетического ультразвука для построения модели классификации измельченной руды в гидроциклоне, обусловлены требованием формирования адекватного по быстрдействию и точности управляющего воздействия с учетом времени пребывания частиц в гидроциклоне, а также определенной аналогией пространственного разделения частиц твердой фазы пульпы в поле центробежных сил гидроциклона с их поведением под действием сил радиационного давления мощного ультразвука.

Список литературы

1. Дик И.Г., Матвиенко О.В., Неессе Т. Моделирование гидродинамики и сепарации в гидроциклоне // Теоретические основы химической технологии, 2000. - Том 34. - № 5. - С. 478-488.
2. Матвиенко О.В. Анализ моделей турбулентности и исследование структуры течения в гидроциклоне // Инженерно-физический журнал, 2004. - Т. 77. - № 2. - С. 58-64.
3. Матвиенко О.В., Дик И.Г. Численное исследование сепарационных характеристик гидроциклона при различных режимах загрузки твердой фазы // Теоретические основы химической технологии, 2006. - Том 40. - № 2. - С. 219-224.
4. Моркун В.С. Ультразвуковой контроль характеристик измельченных материалов и адаптивное управление процессами измельчения-классификации руд на его базе: дисс. доктора техн. наук: 0.5.13.07 / Моркун Владимир Станиславович - Кривой Рог, 1999.
5. Матвиенко О.В., Евтюшкин Е.В. Движение частицы в сдвиговом потоке и ее взаимодействие со стенкой // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Доклады пятой всероссийской научной конференции. Томск 2-4 октября 2006, С. 30-31. 54.
6. Матвиенко О.В., Евтюшкин Е.В. Исследование осаждения частиц с учетом их ударного взаимодействия // XIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», 26-30 марта 2007 г Труды в 3-х т. Томск: Изд-во ТПУ, 2007- Т.3. - С. 203-204.
7. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1974. - 712 с.
8. Матвиенко О.В., Ушаков В.М., Евтюшкин Е.В. Математическое моделирование турбулентного переноса дисперсной фазы в турбулентном потоке // Вестник Томского Государственного педагогического университета. Сер. Естественные и точные науки. - Выпуск 6(43), 2004. - С. 50-54.
9. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. - М.: Недра, 1984. - 208 с.

Рукопись поступила в редакцию 22.03.12

УДК 222:271

С.А. ФЕДОРЕНКО, ст. препод., С.В. ТКАЛИЧЕНКО, канд. эконом. наук, доц.,
С.А. ЖУКОВ, д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

КОНЦЕПЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ОДНОКАНАЛЬНЫХ ДВУХПРОДУКТОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Предложен теоретический подход к частному решению транспортной задачи оптимизации карьерных грузопотоков при вовлечении попутно добываемого сырья в транспортный канал главных конвейерных трактов циклично-поточной технологии.

Ключевые слова: карьерный грузопоток, циклично-поточная технология, внутрикарьерное складирование, перегрузочные пункты.