

Национальный горный университет, г. Днепропетровск

## ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КЛАССИФИКАТОРА ПУТЕМ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ С ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

**Введение.** Разделение мелкозернистых материалов традиционно выполняется в гравитационных аппаратах с горизонтальным движением несущего потока: горизонтальных классификаторах, дешламаторах, спиральных классификаторах, декантаторах, горизонтальных отстойниках и др. Исследования, выполненные в работе, позволили получить аналитическую зависимость для определения пройденного твердой частицей пути с возможностью построения траектории движения и обоснования конструктивных параметров горизонтального классификатора.

**Постановка задачи.** Выполнить теоретические исследования взаимодействия твердой частицы с несущим горизонтальным потоком при ламинарном обтекании и получить аналитическую зависимость для определения длины пути, пройденного твердой частицей в условиях гравитационного осаждения, учитывающую возможные сценарии относительного движения твердой частицы и жидкости.

**Результаты работы.** Характерными режимами движения твердых частиц в горизонтальном потоке пульпы являются:

- движение частицы с замедлением относительно несущего потока при постоянной и увеличивающейся скоростях его движения;
- движение частицы с ускорением относительно несущего потока при уменьшении скорости его движения;
- движение частицы со скоростью несущего потока.

Рассмотрим процесс перемещения элементарной частицы жидкости в составе горизонтального потока. В соответствии с методом Лагранжа текущая координата частицы является функцией исходной координаты и времени [1] (рис.1). Траектория движения

частицы жидкости при плоском движении описывается системой уравнений

$$\begin{aligned}x &= f_1(x_0, y_0, t); \\y &= f_2(x_0, y_0, t).\end{aligned}$$

Известный метод рассматривает движение частицы жидкости за единицу времени  $dt$  со скоростью

$$\begin{aligned}U_x &= \frac{dx}{dt}; \\U_y &= \frac{dy}{dt}.\end{aligned}$$

Проекция текущей координаты частицы жидкости на оси  $x$ ,  $y$  описывается системой уравнений в виде

$$\begin{aligned}dx &= U_x dt; \\dy &= U_y dt.\end{aligned}$$

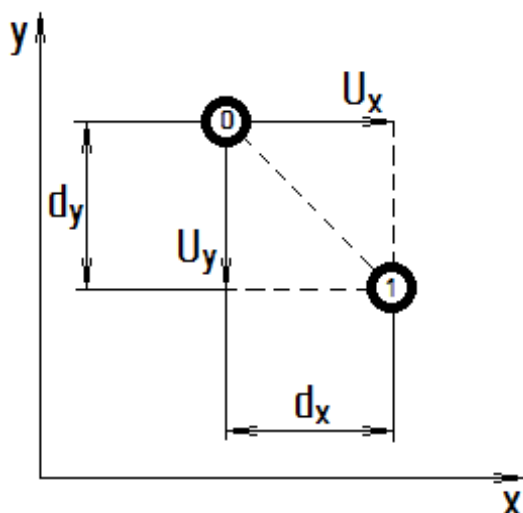


Рисунок 1 – Схема процесса движения частицы жидкости под действием горизонтального потока

Решая приведенную систему на плоскости, получим

$$dt = \frac{dx}{U_x} = \frac{dy}{U_y},$$

откуда общий вид зависимости для определения координаты точки на плоскости примет вид

$$x = \int \frac{U_x}{U_y} dy + C. \quad (1)$$

Применим метод Лагранжа для описания процесса движения твердых частиц, взвешенных в жидкости, движущейся горизонтально (рис.2). Пусть твердая частица движется под действием горизонтального ограниченного потока жидкости попутно ему. Горизонтальная проекция вектора скорости твердой частицы направлена попутно движению жидкости. Горизонтальное движение твердой частицы характеризуется ее массой в жидкости  $m$ , возбуждающей силой скоростного напора  $F_{ск}$  при скорости движения несущей среды  $U_x$  и силой сопротивления  $P$  при скорости движения твердой частицы относительно потока несущей среды  $v_x$  (рис.2):

$$m \frac{dU_x^4}{dt} = F_{ск} - P.$$

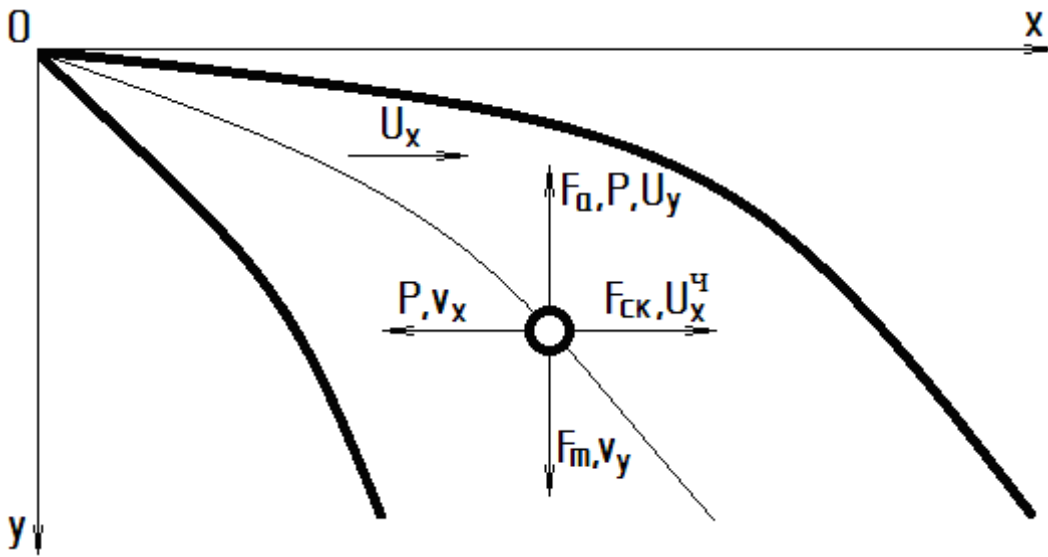


Рисунок 2 – Схема процесса движения твердой частицы в горизонтальном потоке жидкости

Уравнение горизонтального движения твердой частицы примет вид

$$(\rho_m - \rho_n) \frac{\pi d^3}{6} g \frac{dU_x^4}{dt} = C_\phi \frac{\pi d^2}{4} \rho_n \frac{U_x^2}{2} - C_\phi \frac{\pi d^2}{4} \rho_n \frac{v_x^2}{2}.$$

После преобразований уравнение движения примет вид

$$U_x^4 = \left( \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_m - \rho_n} \cdot \frac{C_\phi}{dg} \right) \int (U_x^2 - v_x^2) dt + C. \quad (2)$$

Постоянная интегрирования  $C$  определяется как начальная скорость движения твердой частицы  $U_{x0}^y$ .

Проанализируем полученную зависимость и рассмотрим три режима движения твердой частицы относительно несущей среды.

Пусть твердая частицы неподвижна, то есть  $U_x^y = 0$ . В этом случае скорость движения жидкости относительно твердой частицы  $U_x$  равна скорости перемещения твердой частицы относительно жидкости  $v_x$ :

$$U_x = v_x. \quad (3)$$

Попутное движение твердой частицы и несущего потока может протекать в диапазоне  $U_x > v_x \geq 0$ , при этом уравнение движения (2) примет вид:

$$U_x^y = \left( \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_m - \rho_n} \cdot \frac{C\phi}{dg} \right) \int (U_x^2 - v_x^2) dt + C \quad \text{при } U_x^y < U_x;$$

$$U_x^y = \left( \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_m - \rho_n} \cdot \frac{C\phi}{dg} \right) \int (U_x^2 + v_x^2) dt + C \quad \text{при } U_x^y > U_x; \quad (4)$$

$$U_x^y = \left( \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_m - \rho_n} \cdot \frac{C\phi}{dg} \right) \int (U_x^2) dt + C \quad \text{при } U_x^y = U_x, v_x = 0.$$

Встречное движение твердой частицы и несущего потока характеризуется режимом движения  $U_x < v_x$ , при этом уравнение движения сохранит вид (2).

Графическое представление данного процесса при отсутствии относительного движения несущего потока и твердой частицы в исходном сечении, то есть  $U_{x0}^y = U_{x0}, v_{x0} = 0$ , изображено на рис.3.

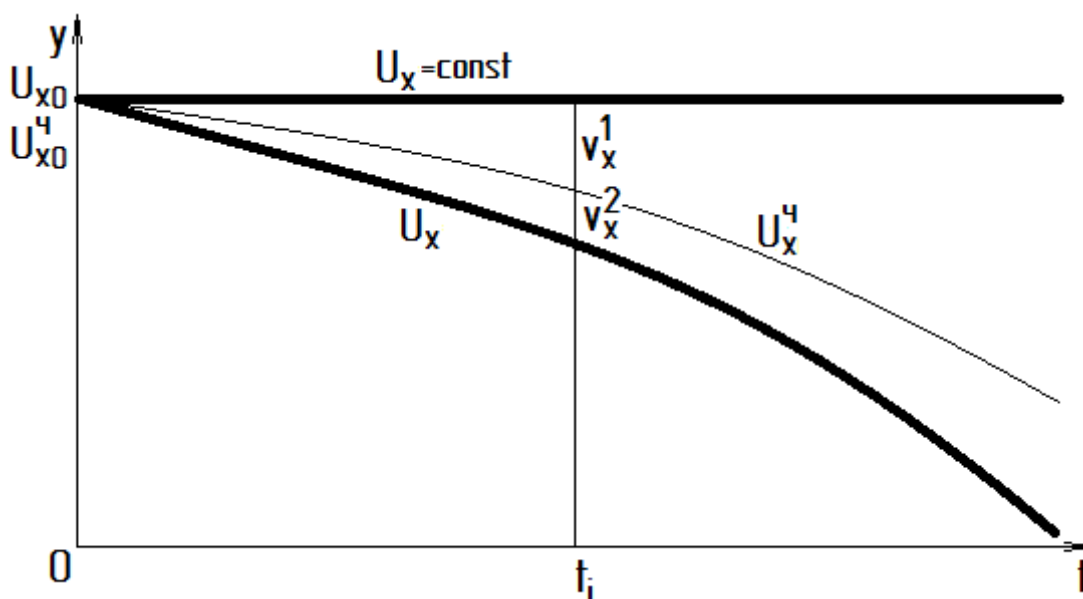


Рисунок 3 – Схема процесса попутного движения твердой частицы и горизонтального потока жидкости

Анализ процесса показывает, что в пределах времени  $t$  функция  $U_x^u$  ограничена функциями  $U_x = const$  и  $U_x$ . Скорость движения твердой частицы в  $i$ -том сечении относительно горизонтального потока несущей среды, движущегося с постоянной скоростью, принята в виде  $v_{xi}^1$ , а относительно замедляющегося потока –  $v_{xi}^2$  (рис.3).

Графическое представление данного процесса построено на базе следующей гипотезы. Несущий поток движется в ламинарном режиме. На участке времени  $t$  при постоянной скорости несущей среды твердая частица может двигаться с относительным замедлением, то есть  $U_x = const \geq U_{xi}^u$ . При замедлении несущего потока твердая частица может двигаться с относительным ускорением  $U_{xi}^u \geq U_{xi}$ , то есть функция скорости твердой частицы находится в пределах  $U_x = const \geq U_{xi}^u \geq U_{xi}$ .

Теоретическое обоснование процесса взаимного перемещения твердых частиц и несущего горизонтального потока весьма затруднительно. Рациональным и более информативным методом моделирования процесса, в узкой обозначенной области, можно считать экспериментальное изучение, которое позволит определить значения относительных скоростей  $v_{xi}^1, v_{xi}^2$ .

Одним из важных факторов, оказывающим влияние на процесс относительного движения твердой частицы в несущем потоке, является форма частицы. Однако в обозначенной области скоростей движения и крупностей, характеризуемых числом  $Re$ , наблюдается режим движения твердой частицы, близкий к ламинарному, при котором в соответствии с диаграммами Релея [2] форма частицы оказывает несущественное влияние на ее движение.

Вертикальная проекция вектора скорости твердой частицы характеризуется процессом осаждения и определяется абсолютной величиной веса частицы в жидкой среде и силой сопротивления среды, направленной в сторону, противоположную направлению движения (рис.2):

$$F_m - F_A = P,$$

где  $F_m$  – сила тяжести, Н;

$F_A$  – сила Архимеда, Н;

$P$  – сила сопротивления, Н.

Известно, что процесс равномерного падения твердой частицы в жидкости описывается уравнением

$$(\rho_{тв} - \rho_{жс}) \frac{\pi d^3}{6} g = C_{\phi} \frac{\pi d^2}{4} \rho_{жс} \frac{v_y^2}{2},$$

где  $\rho_{тв}$  – плотность твердой частицы, кг/м<sup>3</sup>;

$d$  – диаметр твердой частицы, м

$\rho_{жс}$  – плотность жидкости (пульпы), кг/м<sup>3</sup>;

$C_{\phi}$  – коэффициент лобового сопротивления твердой частицы;

$v_y$  – вертикальная составляющая скорости движения твердой частицы относительно жидкости, м/с.

Скорость вертикального движения частицы можно определить по известной формуле

$$v_y = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{C_{\phi}} \frac{(\rho_{тв} - \rho_{жс})}{\rho_{жс}} g d}.$$

Ввиду традиционности применения сырья с большим содержанием окатанных частиц кварца (рудные и нерудные пески) исследуемая область крупности  $0,15 < d < 5$  мм оказалась наиболее изученной экспериментально. В литературных источниках приводятся данные разных авторов, получивших экспериментальные значения скорости свободного падения частиц кварца [2, 3]. Таким образом, ввиду наличия достаточного количества экспериментального материала в дальнейших исследованиях конечная скорость падения частиц кварца будет приниматься по известным в литературе экспериментальным данным. Следует также отметить, что при обозначенных скоростях движения несущего потока время процесса осаждения намного превышает время неустановившегося движения твердой частицы, поэтому этот фактор в модели не учитывается.

При учете относительного перемещения твердой частицы, движимой горизонтальным потоком несущей среды, в горизонтальном и вертикальном направлениях формула (1) приобретет вид

$$x = \int \frac{U_x \pm v_x}{U_y - v_y} dy + C.$$

Заменим параметр, учитывающий относительное вертикальное перемещение, экспериментальным значением скорости падения твердой частицы в воде

$$U_y - v_y = \omega,$$

где  $\omega$  – экспериментальное значение скорости свободного падения твердой частицы, м/с.

Постоянная интегрирования  $C$  характеризует начальные условия движения твердой частицы, и при расположении начала координат в начальном положении твердой частицы постоянная  $C = 0$ .

Предположим, что движение жидкости и твердой частицы протекает без взаимного перемещения, то есть  $v_x = 0$ . Таким образом, упростим рассмотрение процесса и приравняем горизонтальную проекцию скорости твердой частицы и скорость жидкости  $U_x^y = U_x$ . Тогда уравнение движения твердой частицы под действием горизонтального потока примет вид

$$x = \frac{U_x}{\omega} y.$$

**Выводы.** Результаты проведенных исследований взаимодействия твердой частицы с несущим горизонтальным потоком при ламинарном обтекании позволяют сделать следующие выводы:

1. Основой для теоретического описания гравитационного осаждения твердой частицы при ее попутном и встречном движении относительно горизонтального потока несущей среды явился метод Лагранжа.

2. При скорости движения жидкости  $U_x$ , а скорости перемещения твердой частицы относительно жидкости  $v_x$  абсолютная скорость твердой частицы  $U_x^y$  при попутном движении с несущим потоком может находиться в диапазонах: 1 –  $U_x^y < U_x$ ; 2 –  $U_x^y > U_x$ ; 3 –  $U_x^y = U_x, v_x = 0$ .

3. Получена зависимость для определения пути, пройденного твердой частицей в условиях гравитационного осаждения под действием горизонтального несущего потока, которая учитывает возможные сценарии относительного движения твердой частицы и жидкости.

4. При условии отсутствия взаимного перемещения твердой частицы и горизонтального потока полученная зависимость может быть использована для построения

траектории движения и обоснования конструктивных параметров горизонтального классификатора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гейер В.Г. Гидравлика и гидропривод: учебник для вузов / В.Г.Гейер, В.С.Дулин, А.Н.Заря: – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1991. – 331с.
2. Лященко П.В. Гравитационные методы обогащения / Лященко П.В. – М.-Л.: Гос-топтехиздат, 1940.
3. Справочник по горнорудному делу. Т. 1. Открытые работы. – М.: Гос. научно-техн. издат. литерат. по горному делу, 1960.–926с.

Поступила в редколлегию 27.06.2013.

УДК (620.9 + 553.982.2):66(063):005:53

ТУЧИН В.Т., инженер  
ДОЛГОПОЛОВ И.С., к.т.н., доцент  
САДОВОЙ А.В., д.т.н., профессор  
ТИЩЕНКО Н.Т.,\* директор  
БЕЗШТАНЬКО Р.В. аспирант

Днепродзержинский государственный технический университет  
\*ООО Научно инновационное предприятие “ДІЯ”, г. Днепродзержинск

### СТРАТЕГИЯ И ТАКТИКА СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОБЛЕМЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ (ЧАСТЬ 1)

**Введение.** Решение проблемы энергоресурсосбережения неразрывно связано с проблемой повышения энергоэффективности. При этом стратегической концепцией энергоресурсосбережения является концепция системного анализа проблемы на разных иерархических уровнях: нано-, микро-, мезо-, макро- и мегамишмасштабе [1-4].

В предлагаемой работе рассматриваются результаты исследований по обобщению и развитию системного подхода и топологических методов в моделировании современных систем с целью получения комплексной (параметрической, эксергетической и эксергоэкономической) картины процессов преобразования вещества и энергии в них при стационарных и динамических режимах.

**Постановка задачи.** Основными задачами работы являются: формулирование теоретических основ, стратегических и методологических принципов системного анализа энергоресурсосбережения физико-технологических систем (ФТС); разработка критериев эксергетической эффективности ФТС, позволяющих провести анализ энергетической эффективности технологий и оборудования; качественный анализ физико-технологической системы и разработка её обобщенной эксергодиссипативной функции; введение в систему фундаментальных уравнений ФТС эксергетического и экономического аспектов; разработка формализма топологическo-эксергетического и топологическo-экономического подхода при моделировании ФТС; представление функциональных операторов ФТС; определение устойчивости и идентификация ФТС; выбор термодинамических принципов управления энергоресурсосбережением ФТС. Методология решения этих задач рассмотрена в двух частях работы.

**Результаты работы.** В основе разрабатываемого метода повышения энергетической эффективности и энергоресурсосбережения в технических системах лежит прин-