

УДК 622.331.3.6

ПАРУСНОСТЬ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ КАЛИЙНОЙ РУДЫ И ПРОДУКТОВ ЕЕ ОБОГАЩЕНИЯ

Кислов Н.В., Цыбуленко П.В. (УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск, Беларусь)

Приводятся результаты экспериментального исследования аэродинамических свойств измельченной калийной руды и продуктов ее переработки, выполнена оценка коэффициентов сопротивления, формы и парусности частиц, определены приведенные скорости витания полидисперсных смесей сырья и продуктов обогащения калийной руды, установлены показатели, характеризующие величину приведенной скорости витания, необходимой для обоснования минимально допустимой скорости несущей среды в системах пневмотранспорта, сепарации и улавливания, применяемых в процессах добычи и переработки калийной руды.

Введение

Расчет установок пневмотранспорта, сепарации и улавливания сыпучих сред сводится к нахождению рабочих режимов их перемещения под воздействием воздушного потока. Основным фактором, от которого зависит надежность и экономичность пневмотранспортных систем, является скорость несущей среды. Выбор необходимой скорости воздуха для обеспечения устойчивого пневмотранспортирования измельченных материалов основывается на оценке парусности частиц, характеризуемой их аэродинамическими свойствами. Эти свойства наиболее полно отражает скорость витания \mathcal{G}_s , представляющая собой скорость восходящего потока, при которой частицы определенного размера находятся в состоянии динамического равновесия. По величине скоростей витания \mathcal{G}_s частиц сыпучих сред определяются коэффициенты парусности k и оценивается величина скорости \mathcal{G} несущей среды. Для выбора этой скорости предварительно проводится математическое изучение процесса с целью определения степени влияния определяющих факторов [1, 2].

В общем случае движение образца измельченного материала в восходящем потоке воздуха может быть представлено уравнением:

$$m \cdot \frac{d\mathcal{G}}{dt} = P_a + P_g - G, \quad (1)$$

где $P = m \cdot \frac{d\mathcal{G}}{dt}$ – движущая сила;

$P_a = 0,5c_n F \rho_v (\mathcal{G} - U)^2$ – сила воздействия воздушного потока на образец;

c_n – коэффициент лобового сопротивления образца;

F – площадь миделевого сечения образца;

ρ_v – плотность несущей среды, кг/м³;

\mathcal{G} – скорость воздуха;

U – скорость образца;

t – время;

m – масса образца;

$P_6 = 0,5\lambda \cdot S \cdot \rho_b (\vartheta - U)^2$ – сила трения воздуха о боковую поверхность образца при обтекании его воздушным потоком;

λ – коэффициент трения воздуха о поверхность образца;

S – площадь поверхности обтекания;

$G = V \rho g = mg$ – вес образца;

V – его объем;

$g = 9,8$ – ускорение свободного падения, м/с²;

ρ – плотность образца.

Для тел с шероховатой поверхностью $\lambda = 0,0082$ [2]. Определение боковой поверхности S образцов при их перемещении в восходящем потоке представляет значительные трудности. По данным ряда авторов [1] произведение $0,5\lambda \cdot \rho_b \leq 0,0005$, а коэффициент сопротивления c_d частиц измельченных материалов не превышает 0,8. Поэтому в уравнении (1) силой P_6 можно пренебречь. Если $G = P_a$, то теоретически скорость образца в восходящем потоке $U = 0$. В действительности образец, находясь в струе воздушного потока, колеблется около некоторого равновесного положения (находится в состоянии динамического равновесия) в зависимости от состояния потока, шероховатости образца и его положения по отношению к потоку. В этом случае скорость потока называют, как уже отмечалось, скоростью витания ϑ_s и которая на основании уравнения (1) может быть представлена следующим образом:

$$\vartheta_s = \sqrt{2G/c_d \rho_b F}. \quad (2)$$

Для шара диаметром $d_{ш}$ и плотностью $\rho_{ш}$ эта формула принимает вид:

$$\vartheta_s = \sqrt{\frac{4g}{3c} \sqrt{\frac{\rho_{ш}}{\rho_b}} d_{ш}} = \frac{3,62}{\sqrt{c}} \sqrt{\frac{\rho_{ш}}{c}} d_{ш}, \quad (3)$$

где $c = f(Re_s)$ – коэффициент сопротивления шара;

$Re_s = \vartheta_s \cdot d_{ш} / \nu$ – число Рейнольдса;

ν – кинематическая вязкость несущей среды.

Однозначно определить скорости витания шаровых частиц по формуле (3) невозможно, так как их коэффициент сопротивления c является функцией искомых величин. Поэтому скорости витания частиц правильной и произвольной формы устанавливают экспериментально.

В расчетные зависимости процессов сепарации измельченных материалов, их сушки в псевдооживленном состоянии и сжигания, аспирации, пневмотранспорта и выделения из потока аэроземеси входит так называемый коэффициент парусности k , определяющий способность частиц оказывать сопротивление потоку заданной скорости. Поэтому представляет интерес взаимосвязь между коэффициентами парусности k и скорости витания ϑ_s измельченных материалов. Для этого условно закрепляют образец в восходящем потоке. Сила, с которой поток будет действовать на образец в этом случае:

$$P_a = 0,5c_d \rho_b F \vartheta^2. \quad (4)$$

Реакция опоры P будет противоположна по направлению этой силе и выразится следующим образом:

$$P = P_a - G = m \frac{d\vartheta}{dt}. \quad (5)$$

Ускорение, которое могла бы сообщить образцу эта сила,

$$a = \frac{P_a - G}{m} = \frac{P_a}{m} - g. \quad (6)$$

Подставив (4) в формулу (6), получим:

$$a = 0,5c_n \frac{F}{m} \rho_b \vartheta^2 - g = k\vartheta^2 - g, \quad (7)$$

где $k = 0,5c_n \frac{F}{m} \rho_b$ – коэффициент парусности.

Лишим образец его опоры. Тогда движущая сила $P_a - G$ будет противостоять силе инерции образца:

$$I = ma = m(k\vartheta^2 - g). \quad (8)$$

В случае $P_a = G$ изменения движения не будет, т.е. $k \cdot \vartheta^2 - g = 0$, откуда:

$$k = g/\vartheta_s^2. \quad (9)$$

Таким образом, по результатам экспериментального определения скорости витания частиц отдельных фракций измельченных материалов оцениваются их коэффициенты парусности. Эти данные служат основой при выборе скорости несущей среды в системах пневмотранспорта, сепарации и пылеулавливания, применяемых в различных процессах при добыче и переработке калийной руды.

Результаты исследования

Эксперименты по определению скоростей витания и коэффициентов парусности были выполнены с образцами измельченной калийной руды проходческо-очистным комбайном Урал-10КС и продуктами обогащения этой руды (сульфат калия K_2SO_4 и хлоркалий KCl).

С целью обобщения экспериментальных данных за характерный размер частиц отдельных фракций принимается диаметр d_3 эквивалентного по объему и массе шара, а изменение коэффициентов c_n сопротивления реальных частиц по сравнению с коэффициентами c сопротивления эквивалентных шаров учитывается коэффициентами формы $k_\phi = c_n/c$. Тогда для частиц произвольной формы, которые заменены эквивалентными по массе и объему шарами, скорость витания определяется по формуле:

$$g_s = \sqrt{\frac{4g}{3k_\phi \cdot c}} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_b}} d_s = \frac{3,62}{\sqrt{k_\phi \cdot c}} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_b}} d_s = A \sqrt{\frac{\rho}{\rho_b}} d_s, \quad (10)$$

где ρ – плотность частиц определенной фракции измельченного материала, кг/м^3 ;

ρ_b – плотность несущей среды, кг/м^3 ;

$d_s = k_s \cdot d$ – эквивалентный диаметр частиц отдельной фракции измельченного материала, м;

k_s – коэффициент, учитывающий изменение диаметра d_s эквивалентного шара по сравнению со средним d размером частиц отдельной фракции;

$k_\phi = c_n/c$ – коэффициент формы частиц;

c_n – коэффициент сопротивления частиц произвольной формы;

c – коэффициент сопротивления эквивалентного шара;

A – параметр формулы.

В случае, когда частицы имеют округлую форму, что характерно для измельченной бермовыми фрезами калийной руды при размере фракций $d \leq 2$ мм, коэффициент $k_s = (0,7 \div 0,9)d$. Если $d > 2$ мм, то фракции представлены пластинчатыми частицами, для которых k_s составляет в среднем $0,5d$ и изменяется в пределах $0,4 \div 0,6$.

В общем случае, как уже отмечалось, коэффициент сопротивления c витающих шаров является функцией числа Рейнольдса Re . Для витающих частиц произвольной формы:

$$Re_s = \frac{g_s \cdot d_s}{\nu}, \quad (11)$$

где ν – кинематическая вязкость несущей среды, $\text{м}^2/\text{с}$.

Если $Re_s < 1$, $c = 24/Re_s$ (формула Стокса), при $Re_s = 1 \div 1000$ наиболее приемлема формула Л.С. Клячко [3]:

$$c = \frac{24}{Re_s} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re_s}}. \quad (12)$$

Коэффициент сопротивления витающих шаров в случае $d_s \geq 2$ мм, что соответствует $Re_s > 1000$, не зависит от Re_s и составляет в среднем $\sim 0,3$ [1].

Коэффициент c_n сопротивления реальных частиц показывает, какая часть кинетической энергии расходуется на сопротивление. Величина c_n зависит от характера обтекания, формы и состояния поверхности частиц. На основании формулы (10) зависимость для определения коэффициента c_n может быть представлена в виде:

$$c_n = 13,1 \frac{\rho d_s}{\rho_b \cdot g_s^2} = \frac{13,1}{A^2}. \quad (13)$$

Тогда в случае $Re_s > 1000$, что соответствует $d_s \geq 2$ мм, коэффициент формы

частиц $k_{\phi} = c_{\eta} / c = c_{\eta} / 0,3$. Из последних рассуждений следует, что функциональной четкой зависимости c_{η} от числа Re_s не наблюдается в случае $d_s \geq 2$ мм. Это не случайно, так как гидродинамическое воздействие потока на взвешенные частицы произвольной формы определяется не только числом Рейнольдса, но также формой и шероховатостью частиц, их ориентацией по отношению к направлению потока, а также наличием или отсутствием вращения частиц в потоке и соударений их друг с другом и со стенками воздуховода. Вследствие этого коэффициент сопротивления частиц произвольной формы при $d_s \geq 2$ мм не остается постоянным, как это имеет место для неподвижных шаров и по мере увеличения d_s в большинстве случаев возрастает [3]. Последнее еще раз свидетельствует, что с увеличением размера частиц измельченных материалов форма их все более отличается от шарообразной.

Измельченный материал представляет собой смесь частиц, отличающихся, как правило, размерами, формой и плотностью. Отдельным фракциям соответствуют определенные значения скоростей витания. В связи с этим выбор режимов работы систем пневмотранспорта целесообразно проводить по приведенной скорости витания, которая вычисляется, как скорость витания определяющей фракции полидисперсной смеси частиц. Скорость \mathcal{V} воздушного потока, найденная по приведенной скорости витания $\mathcal{V}_{\text{сп}}$, обеспечивает при пневмотранспорте устойчивое перемещение всей массы частиц полидисперсной смеси. Было установлено [1, 4], что приведенная скорость витания $\mathcal{V}_{\text{сп}}$ определяется по размеру частиц d_{10} , соответствующему суммарному их выходу по плюсу $P_{\text{в}} = 10\%$. Так, например, для диапазона фракций сульфата калия $d = 0,315 - 5,0$ мм зависимость $P_{\text{в}} = f(d)$ имеет вид:

$$P_{\text{в}} = 100 \cdot 10^{-(d/d_{10})^n}, \quad (14)$$

где $n = 0,52$ – параметр однородности частиц по фракциям;

$d_{10} = 2$ мм – размер частиц, суммарный выход которых по плюсу составляет 10 %, т.е. в полидисперсной смеси содержится 10 % частиц, размеры которых $d \geq 2$ мм.

В общем случае для определения размера d_{10} частиц необходимо оценить гранулометрический состав полидисперсной смеси частиц и установить параметры формулы (14). Величина d_{10} может быть также определена при наличии данных о суммарных выходах двух фракций P_1 и P_2 с достаточно большим различием в значениях их наименьших размеров d_1 и d_2 . Для этого необходимо предварительно вычислить параметр n однородности частиц по фракциям как угловой коэффициент прямой, характеризующей зависимость $P_{\text{в}} = f(d)$ в координатах $\lg \left(\lg \frac{100}{P_{\text{в}}} \right) - \lg d$ [4]. Тогда искомое значение размера d_{10} частиц выразится следующим образом:

$$d_{10} = d_1 / \sqrt[n]{2 - \lg P_1} = d_2 / \sqrt[n]{2 - \lg P_2}. \quad (15)$$

Значения размера d_{10} частиц определяют собой их плотность $\rho_{10} = \rho_1 (d_{10}/d_1)^{-a}$, где ρ_1 в кг/м^3 – плотность частиц размером $d_1 = 1$ мм, a – параметр интенсивности

уменьшения плотности частиц по мере увеличения их размера, эквивалентный диаметр частиц $d_{\text{э10}} = (0,5 \div 0,9) d_{10}$ и коэффициент их формы $k_{\phi} = c_n/c$. Величины ρ_{10} и $d_{\text{э10}}$ необходимы для вычисления приведенной скорости $\mathcal{G}_{\text{ст}}$ витания измельченной калийной руды и продуктов ее переработки по обобщенной формуле (10), которая в рассматриваемом случае имеет вид:

$$\mathcal{G}_{\text{ст}} = \frac{3,62}{\sqrt{k_{\phi} \cdot c}} \sqrt{\frac{\rho_{10}}{\rho_{\text{в}}}} d_{\text{э10}}. \quad (16)$$

Таким образом, для оценки аэродинамических свойств измельченной калийной руды необходимо проведение экспериментов по определению скоростей витания ее отдельных фракций. На этой основе определяются величины коэффициентов c_n сопротивления частиц потоку несущей среды (формула 13), коэффициентов k_{ϕ} формы частиц с $d_p \geq 2 \text{ мм}$ ($k_{\phi} = c_n/c$), параметры A формулы (10) и устанавливаются значения приведенных скоростей витания $\mathcal{G}_{\text{ст}}$ полидисперсных смесей измельченной калийной руды и продуктов ее переработки. Ввиду того, что гранулометрический состав измельченной калийной руды и продуктов ее обогащения весьма неоднороден, а размеры их частиц изменяются в широких пределах, скорости витания отдельных фракций определялись в опытах на двух установках. Кроме этого, значения скоростей витания частиц хлористого калия и сульфата натрия заимствованы из работы [5], что позволило расширить диапазон оценки аэродинамических свойств исследованных материалов.

Для частиц, размер которых больше 2 мм, скорость витания определялась на установке, представляющей собой прозрачную коническую трубу с углом конусности 3° [1]. Установленный в верхней части трубы осевой вентилятор создавал в трубе восходящий поток воздуха. Скорость воздуха регулировалась изменением частоты вращения колеса вентилятора.

Методика проведения опытов заключалась в следующем. Из пробы определенной фракции частиц отбиралась навеска. Включался вентилятор и частицы переводились в трубу. Постепенным увеличением скорости восходящего потока устанавливался такой расход воздуха, когда частицы начинали совершать колебательное и вращательное движения в пространстве, ограниченном трубой. По шкале, установленной за прозрачным конусом, отмечался уровень, ниже которого частицы не опускались. Одновременно фиксировалось показание тягонапоромера, соединенного шлангами с установленной по оси трубы пневмометрической трубкой, являющейся приемником динамического давления. Отмечались барометрическое давление и температура воздуха. Полученные данные использовались для определения скорости воздушного потока, при которой частицы находятся в состоянии динамического равновесия – скорости витания.

С каждой фракцией частиц опыты повторялись три раза.

Скорость витания определялась по формуле:

$$\mathcal{G}_s = K_n \cdot K_n \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_d}{\rho_0}}, \quad (17)$$

где K_n – коэффициент, учитывающий геометрические размеры прозрачного конуса (определялся по данным работы [1] в зависимости от уровня, занимаемого частицами

при витании в трубе);

K_n – коэффициент скоростного поля для сечения, в котором установлена пневмометрическая трубка;

p_d – динамическое давление, фиксируемое тягонапоромером, Па;

ρ_0 – плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях (барометрическом давлении $B = 760$ мм рт. ст., температуре $t = 20$ °С, относительной влажности $\varphi = 50$ %);

Δ – поправка на барометрическое давление B и температуру t воздуха,

$$\Delta = \frac{B \cdot 293}{760(273 + t)}.$$

При обработке результатов по определению скоростей витания определялись следующие величины:

- среднее значение скорости витания частиц определенной фракции:

$$g_{sc} = \frac{\sum_{i=1}^N g_{si}}{N},$$

где g_{si} – значение скорости витания, полученное в отдельном опыте, м/с;

N – число опытов;

- абсолютные отклонения величин скоростей витания от среднего значения:

$$\Delta g_{si} = g_{si} - g_{sc};$$

- среднее квадратическое отклонение полученных результатов от среднего значения скорости витания:

$$\Delta g_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta g_{si}^2}{N-1}};$$

- относительное отклонение величины скорости витания, полученной в отдельном опыте, $\Delta g_s / g_{sc}$.

Скорость витания частиц размером менее 2 мм определялась на установке, ранее использованной в работах [6]. Установка имеет конической формы корпус, выполненный из органического стекла. Внутри корпуса пропущена прозрачная труба с внутренним диаметром 51 мм. В нижней части корпуса и трубы к отверстиям присоединяются с помощью пружин воздухопроницаемые в днище стаканы. Днище выполнено из сетки. Сетка покрыта хлопчатобумажной тканью. В верхней части корпуса имеется патрубок, соединенный с трубопроводом воздуходувки. К выхлопному патрубку воздуходувки присоединен трубопровод, где установлена диафрагма, по перепаду давления на которой определяется с помощью микроманометра расход воздуха.

Скорости витания определялись следующим образом. Навеска определенной фракции массой до 3 г равномерным слоем насыпалась на воздухопроницаемое днище

стакана, включалась воздуходувка и начиналась продувка стакана воздухом. Путем открытия дроссельной заслонки воздуходувки увеличивался расход воздуха до полного выноса частиц из стакана. За минимальную скорость витания $\mathcal{G}_{s\min}$ принималась скорость, определяемая как отношение расхода воздуха к площади поперечного сечения трубы в случае, когда во второй стакан попадала хотя бы одна частица. За максимальную скорость витания $\mathcal{G}_{s\max}$ принималась скорость воздуха в трубе, когда в первом стакане не оставалось ни одной частицы. Опыты с отдельной фракцией повторялись несколько раз.

Скорость витания определялась по формуле:

$$\mathcal{G}_s = 3,22 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_d}} \cdot \frac{P_d}{\rho_{вс}}, \text{ м/с}, \quad (18)$$

где Δp – перепад давления на диафрагме, фиксируемый по ММН микроманометру, Н/м²;

$$\rho_d = 0,465 \cdot \left[\left(B + \frac{P_d}{13,6} \right) / (273 + t) \right], \text{ кг/м}^3 \text{ – плотность воздуха перед диафрагмой;}$$

B – барометрическое давление, мм рт.ст.;

t – температура воздуха перед диафрагмой, °С;

P_d – избыточное давление перед диафрагмой, фиксируемое U-образным манометром, мм вод. ст.;

$$\rho_{вс} = 0,465B / (273 + t_{вс}), \text{ кг/м}^3 \text{ – плотность воздуха у входа в первый стакан;}$$

$t_{вс}$ – температура воздуха у входа в первый стакан, °С.

Результаты опытов и расчетов по определению аэродинамических свойств различных фракций измельченной калийной руды представлены в таблице и изображены в виде обобщающей функции на рисунке 1.

Таблица – Аэродинамические свойства измельченной калийной руды

№	$d_n \div d_{n-1}$, мм	d_s , мм	ρ , г/см ³	\mathcal{G}_s , м/с	k , 1/м	A	c_n	k_ϕ	\mathcal{G}_{sn} , м/с	k , 1/м
1	30-20	12,5	1,974	20,6	0,023	4,55	0,630	2,104	21,6	0,021
2	20-10	7,5	2,060	18,3	0,029	5,11	0,50	1,669	17,1	0,034
3	10-7	4,25	2,052	14,5	0,047	5,39	0,50	1,426	12,8	0,060
4	7-5	3,0	2,085	12,6	0,062	5,53	0,428	2,111	10,9	0,082
5	5-3	2,0	2,108	8,5	0,136	4,54	0,633	-	8,9	0,124
6	3-2	1,25	2,166	7,5	0,174	5,00	0,522	-	7,2	0,189
7	2-1	1,2	2,140	5,4	0,336	5,14	0,496	-	7,0	0,200
8	1-0,63	0,652	2,126	4,2	0,556	3,92	0,852	-	5,1	0,377
9	0,63-0,5	0,452	2,174	3,62	0,749	4,01	0,814	-	4,3	0,530
10	0,5-0,25	0,3	2,225	2,81	1,242	3,78	0,918	-	3,5	0,801
11	< 0,25	0,1	2,317	1,58	3,930	3,60	1,007	-	2,1	2,224

Из полученных результатов можно заключить, что весь диапазон данных разделяется на две зоны. Первая зона характерна для частиц с $d_s < 2$ мм, которые имеют относительно округлую форму. В этом случае скорость \mathcal{G}_s витания составляет

1,58 ÷ 7,5 м/с, коэффициент лобового сопротивления c_n частиц при уменьшении d_s увеличивается и составляет 0,496 ÷ 1,007, а параметр A формулы (10) лежит в пределах 3,60 ÷ 5,14. Для второй зоны, представленной плоскими частицами ($d_s \geq 2$ мм), коэффициент формы $k_\phi = 1,426 \div 2,111$, $\mathcal{G}_s = 8,5 \div 20,6$ м/с, $c_n = 0,50 \div 0,63$ и $A = 4,54 \div 5,53$.

Согласно формуле (10) весь диапазон полученных значений скорости витания можно представить в виде функции $\mathcal{G}_s = f(\sqrt{\rho d_s / \rho_a})$. В этом случае опытные значения \mathcal{G}_s располагаются практически на прямой линии (рисунок 1) с угловым коэффициентом A_p , то есть:

$$\mathcal{G}_s = A_p \sqrt{\frac{\rho}{\rho_a} d_s}. \quad (19)$$

В результате математической обработки опытных данных оказалось, что обобщенные значения параметров формул (10) и (19) составляют $A_p = 4,77$, $c_n = 0,58$ и $k_\phi = 1,92$ (для $d_s \geq 2$ мм). В этом случае среднеквадратическое отклонение расчетных значений \mathcal{G}_s от опытных $\sigma = \pm 1,1$ м/с, а коэффициент парусности k лежит в пределах $(0,023 \div 0,174) \cdot 1/\text{м}$.

Аналогичным образом были обработаны опытные данные, полученные для хлоркалия KCl и сульфата калия K₂SO₄. В этом случае для полидисперсной смеси частиц KCl $A_p = 5,25$, $c_n = 0,47$ и $k_\phi = 1,5$, $\sigma = \pm 0,82$ и для K₂SO₄ $A_p = 4,79$, $c_n = 0,57$ и $k_\phi = 1,90$, $\sigma = \pm 0,67$.

Если сгруппировать все опытные значения скоростей витания \mathcal{G}_s (рисунок 2), то обобщенная зависимость (19) для KCl и K₂SO₄ принимает вид:

$$\mathcal{G}_s = 5,04 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_a} d_s} \pm 0,8, \text{ м/с}. \quad (20)$$

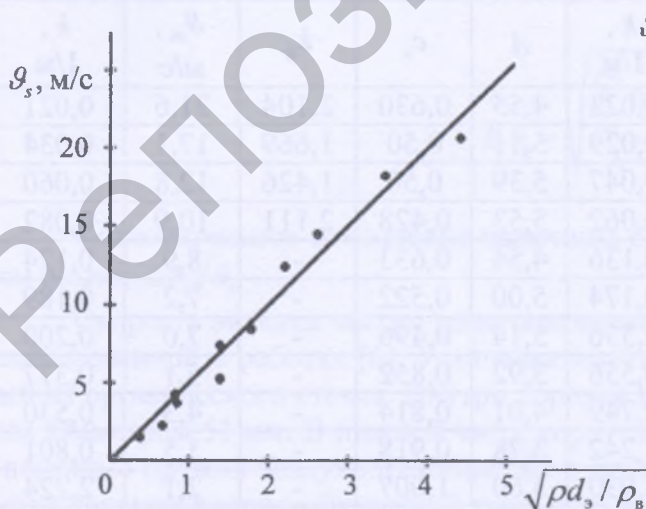


Рисунок 1 – Зависимость $\mathcal{G}_s = A_p \cdot \sqrt{\rho d_s / \rho_a}$ для измельченной калийной руды, $A_p = 4,77$

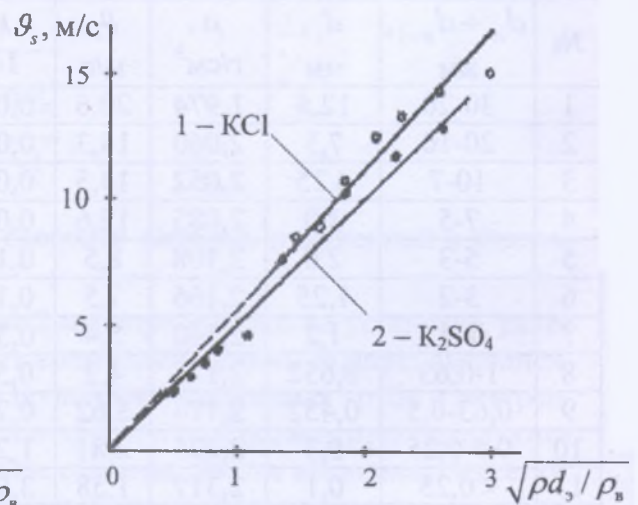


Рисунок 2 – Зависимость $\mathcal{G}_s = A_p \cdot \sqrt{\rho d_s / \rho_a}$: 1 – KCl, $A_p = 5,25$; 2 – K₂SO₄, $A_p = 4,79$

Основываясь на полученных результатах по определению скоростей витания измельченной калийной руды и продуктов ее переработки, выполним расчет приведенных скоростей витания $g_{\text{пр}}$. При этом определяющим является средний размер d_{10} фракции, суммарный выход по плюсу которой $P_{\text{в}} = 10\%$. Согласно расчету по формулам (15) $d_{10} = 28,7$ мм.

Фракции измельченной калийной руды в случае $d > 2$ мм представлены пластинчатыми частицами, эквивалентный диаметр которых $d_{\text{э}} = (0,4 \div 0,6) d$. Суммарный выход P фракций размером $d_i = 30-20$ мм составляет 12,22 % [4]. Коэффициент однородности размеров этих частиц очень мал ($n = 0,35$). В связи с этим средний расчетный размер частиц d_{10} , соответствующий выходу $P_{\text{в}} = 10\%$, получается больше среднего размера фракции $d_i = 30 \div 20$ мм. Поэтому эквивалентный диаметр этой фракции превышает ее средний размер и составляет $d_{\text{э}10} = 0,5 \cdot d = 14,35$ мм. Коэффициент формы частиц в этом случае $k_{\text{ф}} = 2,104$ (таблица).

Расчетное значение плотности ρ частиц измельченной калийной руды в случае $d_{10} = 28,7$ мм

$$\rho_{10} = \rho_1 \cdot (d/d_1)^{-a} = 2193 \cdot (28,7/1)^{-0,03} = 1983 \text{ кг/м}^3.$$

Согласно формуле (16) приведенная скорость витания измельченной калийной руды:

$$g_{\text{пр}} = \frac{3,62}{\sqrt{k_{\text{ф}} \cdot c}} \sqrt{\frac{\rho_{10}}{\rho_{\text{в}}}} d_{\text{э}10} = \frac{3,62}{\sqrt{2,104 \cdot 0,3}} \sqrt{\frac{1983 \cdot 0,01435}{1,205}} = 22,1 \text{ м/с},$$

которой соответствует коэффициент парусности $k = 0,02$.

Обобщенная зависимость (19) также может быть использована для определения приведенной скорости витания. В этом случае $g_{\text{пр}} = 23,2$ м/с.

Ранее было установлено (14), что для K_2SO_4 размер d_{10} частиц при $P_{\text{в}} = 10\%$ составляет 2 мм. В этом случае эквивалентный диаметр частиц $d_{\text{э}10} = 0,8 \cdot 2 = 1,6$ мм, а плотность этих частиц $\rho_{10} = 2262 d_{10}^{-0,06} = 2170 \text{ кг/м}^3$.

Тогда по обобщенной формуле (19) приведенная скорость витания $g_{\text{пр}} = 8,5$ м/с, а по формуле (16) – 8,4 м/с.

Для KCl при $P = 10\%$, $d_{10} = 4,3$ мм, $d_{\text{э}10} = 2,15$ мм, $\rho_{10} = 2275 d_{10}^{-0,08} = 2024 \text{ кг/м}^3$ приведенная скорость витания по формуле (19) $g_{\text{пр}} = 9,6$ м/с, а по формуле (16) – 10,1 м/с.

Полученные значения приведенных скоростей витания служат основой для определения скорости несущей среды при пневмотранспорте и сепарации измельченной калийной руды и продуктов ее переработки.

Заключение

Выполнена оценка аэродинамических свойств фракций отбитой калийной руды и продуктов ее переработки, определены величины коэффициентов сопротивления частиц потоку несущей среды, коэффициентов парусности и формы частиц, установлены

значения приведенных скоростей витания полидисперсных смесей частиц измельченной руды и продуктов ее обогащения, разработаны методики экспериментального определения аэродинамических свойств сыпучих материалов и расчета показателей, характеризующих эти свойства.

Список использованных источников

1. Кислов, Н.В. Аэродинамика измельченного торфа / Н.В. Кислов; под ред. И.И. Лиштвана. – Минск: Наука и техника, 1987. – 175 с.
2. Швыдкий, В.С. Очистка газов / В.С. Швыдкий, М.Н. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.
3. Клячко, Л.С. Пневматический транспорт сыпучих материалов / Л.С. Клячко, Э.Х. Одельский, Б.М. Хрусталева. – Минск: Наука и техника, 1983. – 216 с.
4. Кислов, Н.В. Исчисление параметров гранулометрических характеристик продуктов переработки калийной руды / Н.В. Кислов, П.В. Цыбуленко // Горная механика. – 2009. – № 3. – С. 33-46.
5. Исследование, обоснование и выбор режимов процесса транспортирования продуктов сырья и обогащения ПО «Беларуськалий»: Отчет о НИР (заключ.) / Бел. политехн. ин-т; рук. темы Н.В. Кислов. – Мн.: 1984. – 84 с. (ч. 1), 43 с. (ч. 2). - № ГР 0182.5014474.
6. Кислов, Н.В. Размерно-плотностные и аэродинамические свойства пылей при выполнении технологических операций в машиностроении / Н.В. Кислов, В.Я. Щерба, П.В. Цыбуленко // Горная механика. – 2008. – № 2. – С. 69-77.

Kislov N.V., Tsybulenko P.V.

Wind resistance of ground potash ore and its enrichment products

The results of experimental research of ground potash ore aerodynamic qualities and its enrichment products are presented, as well as estimation of resistance coefficients, particles shape and particles wind resistance is carried out. The indicated wandering speeds of polydispersed raw material mixtures and products of potash ore enrichment are determined. Factors characterizing the indicated wandering speed which is necessary for validation of minimum allowable speed of carrying medium in the pneumatic conveying system, as well as in the separating and recovery system, used for potash ore mining and treatment were specified.

Поступила в редакцию 19.04.2011 г.