

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-73-83

**Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Шишкин С.Ф.*

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

**E-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru*

РАЗДЕЛЕНИЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ПОПЕРЕЧНО-ПОТОЧНОМ КЛАССИФИКАТОРЕ С ЖАЛЮЗИЙНОЙ РЕШЕТКОЙ

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования и показана возможность применения поперечно-поточного классификатора с жалюзийной решеткой для эффективного разделения сыпучих материалов по крупности частиц в диапазоне $0,1 \dots 1,0$ мм. Опыты проводились на кварцевых песках Таулинского и Сухринского карьеров. При проектировании жалюзийной решетки расчет ее элементов производился с помощью CFD моделирования. Для расчета камеры осаждения классификатора решалась система дифференциальных уравнений движения частиц методом прогноза и коррекции. Результаты расчета согласуются с экспериментальными данными, что позволяет использовать данные методы для создания промышленных аппаратов. Особенностью жалюзийного классификатора является организация каскадного принципа разделения за счет многократной пересортировки крупного продукта, который сыпается сверху вниз по жалюзийной решетке. В результате достигается высокая эффективность, что позволяет использовать данный классификатор в промышленности для разделения различных сыпучих материалов пневматическим способом. При этом расход воздуха на процесс пневмокласификации соизмерим с расходом воздуха на аспирацию грохота. Граница разделения может регулироваться в широких пределах за счет изменения расхода воздуха. Классификатор с жалюзийной решеткой имеет низкое аэродинамическое сопротивление, и как следствие низкие удельные затраты электроэнергии, потребляемые вентилятором.

Ключевые слова: сыпучие материалы, песок, гранулометрический состав, граница и эффективность разделения, кривая фракционного разделения.

Введение. В различных отраслях промышленности, таких как огнеупорная, керамическая, стекольная, литейная и др., широко используются различные дисперсные сыпучие материалы. Отраслевые стандарты предъявляют жесткие требования к гранулометрическому составу используемых дисперсных материалов. Например, для формовочных песков содержание тонких классов крупности $0 \dots 63$ мкм или $0 \dots 100$ мкм не должно превышать 0,5 %. Повышенное содержание тонких классов снижает газопроницаемость литейных форм. Стекольные пески не должны содержать пылевые фракции менее 100 мкм, так как они выносятся потоком газа и забивают регенератор печи [1–3]. Кроме этого, мелкие частицы часто имеют другой минералогический состав и повышенное содержание вредных примесей. Например, в литейных формовочных песках во фракциях менее 0,1 мм содержится глинистая составляющая [4, 5]. Чтобы удалить мелкие и крупные частицы обычно применяется рассев на грохотах. Однако сетки с размерами мелких ячеек подвержены быстрому износу и забивке материалом, а производительность существенно уменьшается с уменьшением размера ячеек. Кроме этого, чтобы исключить пыление грохот должен иметь эффективную систему аспирации. Пластины жалюзийной решетки классификатора

имеют достаточно большую толщину и изготавливаются из износостойкой стали, поэтому их срок службы на порядок превышает срок службы сеток грохота.

Цель работы. На основе экспериментальных данных и примеров промышленного использования показана возможность использования поперечно-поточного классификатора для задач разделения по мелким и крупным границам.

Основная часть. Поперечно-поточные классификаторы относятся к гравитационным пневматическим классификаторам. К настоящему времени разработано большое количество конструкций данных аппаратов и получен опыт промышленной эксплуатации [6–8].

На рисунке 1 представлены фотографии классификатора с жалюзийной решеткой, а на рисунке 2 показана схема экспериментальной установки. Производительность данного лабораторного пневмокласификатора составляет до 500 кг/ч.

Работа классификатора осуществляется следующим образом. Навеска исходного материала поступает на верхнюю часть жалюзийной решетки 10. Материал двигается вниз по решетке под действием силы тяжести и продувается поперечным потоком воздуха. Мелкие частицы выносятся потоком воздуха и осаждаются в камере 4 и циклоне 5. Обеспыленный крупный материал

поступает в поддон 3. Таким образом крупный продукт многократно продувается воздухом во время движения по жалюзийной решетке 10. Регулировка границы разделения осуществляется за счет изменения скорости поперечного воздушного потока. При этом отсутствует пылевыведе-

ние, так как установка находится под разрежением. Концентрация материала определяется отношением расхода материала к расходу воздуха и может регулироваться в широких пределах. Рабочий диапазон расходной концентрации для данного типа аппаратов обычно лежит в пределах от 1,0 до 3,0 кг/м³.



Рис. 1. Лабораторный поперечно-поточный классификатор с жалюзийной решеткой

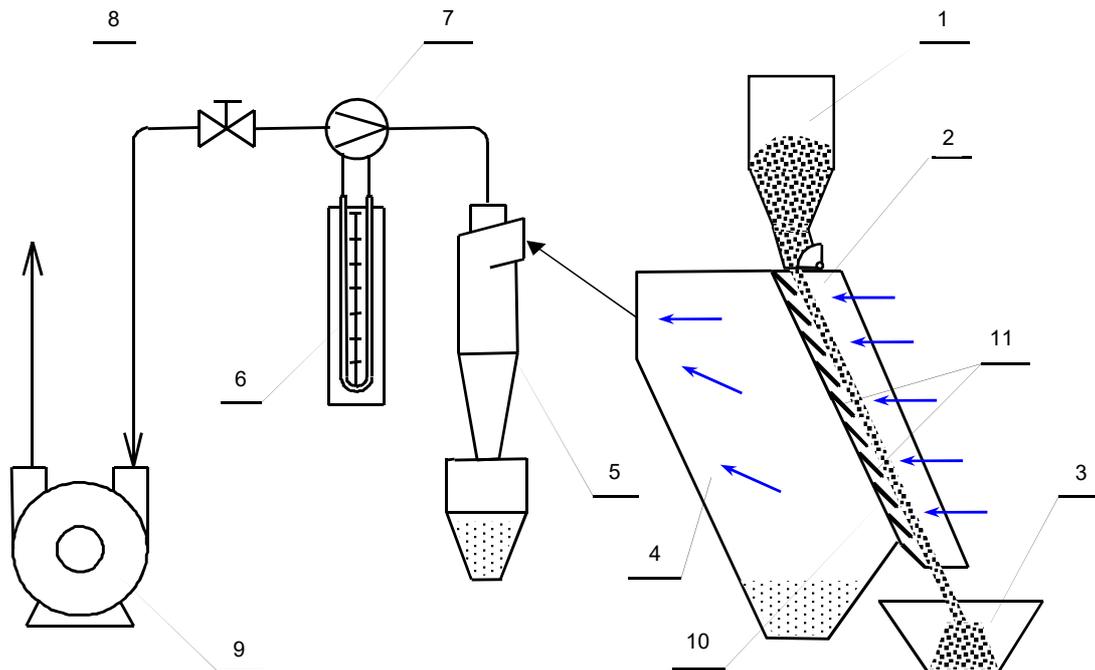


Рис. 2. Схема стенда для испытания классификатора с жалюзийной решеткой

1 – питатель, 2 – классификатор, 3 – поддон крупного продукта, 4 – осадительная камера, 5 – циклон с бункером, 6 – U-образный водяной манометр, 7 – диафрагма, 8 – вентиль, 9 – вакуум-насос ВВН-12, 10 – жалюзийная решетка, 11 – пластины жалюзийной решетки

Особенностью данного классификатора является организация каскадного принципа разделения за счет многократной пересортировки крупного продукта, который сыпается сверху вниз по жалюзийной решетке. На промышленных классификаторах длина решетки может достигать 2 метра и более, а число щелей между

пластинами существенно больше, чем в лабораторном классификаторе. Поэтому, как показывает опыт эксплуатации, эффективность разделения промышленных классификаторов обычно выше, чем лабораторных.

Для примера в табл. 1 представлены результаты разделения кварцевого песка Ташлинского ГОКа в лабораторном классификаторе. Была поставлена задача отделения частиц менее 200 мкм. Для этого подбиралась скорость поперечного воздушного потока, которая составила $w = 0,8$ м/с на полное сечение жалюзий-

ной решетки. Производительность по исходному питанию составила $\Pi = 213,9$ кг/ч; расход воздуха – $Q = 62,4$ м³/ч; расходная концентрация материала – $\mu = 3,42$ кг/м³. Выход крупного продукта разделения по массе составил $G_k = 76,5$ %, а мелкого $G_m = 23,5$ %. Сопротивление классификатора составило $\Delta P = 0,1$ кПа.

Таблица 1

Результаты разделения песка Ташлинского ГОКа при $w = 0,8$ м/с*

№ i	Размер сит, мкм		Гранулометрический состав продуктов, %						Степень фракционного извлечения, %	
			Исходный		Мелкий		Крупный			
	x_i	$x_{ср}$	R_i	r_i	$R_{им}$	$r_{им}$	$R_{ик}$	$r_{ик}$	$\Phi_{им}$	$\Phi_{има}$
1	1000	1500,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	630	815,0	0,46	0,46	0,00	0,00	0,60	0,60	0,00	0,00
3	400	515,0	15,68	15,22	0,00	0,00	20,50	19,90	0,00	0,18
4	315	357,5	40,72	25,04	2,41	2,41	52,50	32,00	2,27	3,41
5	200	257,5	95,05	54,33	80,90	78,49	99,40	46,90	33,99	33,64
6	160	180,0	99,53	4,48	97,99	17,09	100,00	0,60	89,75	90,28
7	100	130,0	99,98	0,45	99,90	1,91	100,00	0,00	100,00	99,24
8	63	81,5	100,00	0,02	100,00	0,10	100,00	0,00	100,00	99,98
9	0	31,5	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	100,00

*В таблице приняты следующие обозначения: $x_i, x_{ср}$ – соответственно размер ячеек сит и средний размер узких классов крупности, мкм; $R_i, R_{им}, R_{ик}$ – соответственно полные остатки на i -ой сетке исходного, мелкого и крупного продуктов разделения, %; $r_i, r_{им}, r_{ик}$ – соответственно частные остатки на i -ой сетке исходного, мелкого и крупного продуктов разделения; $\Phi_{им}$ – экспериментальные значения степени фракционного извлечения узких классов крупности в мелкий продукт, %; $\Phi_{има}$ – аппроксимация степени фракционного извлечения узких классов крупности в мелкий продукт функцией Плита.

Для определения границы разделения экспериментальные значения степени фракционного извлечения были аппроксимированы двухпараметрической функцией Плита [9]

$$\Phi_{има}(x_i) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{x_{50}}\right)^p}. \quad (1)$$

В качестве параметров в функции (1) Плита используются x_{50} – граница разделения и p – параметр эффективности разделения, который связан с критерием эффективности разделения Едера–Майера $E = 100 \cdot x_{75}/x_{25}$ зависимостью

$$E = 100 \left(\frac{1}{9}\right)^{1/p}. \quad (2)$$

Подбор параметров аппроксимации производился с помощью встроенного в *Excel* метода «Поиск решения». Минимизировалось среднеквадратичное отклонение экспериментальных и расчетных данных:

$$\sum_{i=1}^n (\Phi_{им} - \Phi_{има})^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Как показали расчеты, выполненные по приведенным зависимостям, граница разделения со-

ставляла $x_{50} = 236,8$ мкм. Эффективность разделения при этом высокая и по показателю Едера–Майера составляет $E = 100 \cdot x_{75}/x_{25} = 76,3$ %. На рисунке 3 поз. 1 представлена кривая фракционного разделения – степень фракционного извлечения в мелкий продукт.

В качестве другого примера в табл. 2 представлены результаты разделения песков Сухринского карьера по крупной границе с целью отделения гальки [10]. Производительность по исходному питанию составила $\Pi = 490,9$ кг/ч, расход воздуха – $Q = 212$ м³/ч, расходная концентрация материала – $\mu = 2,32$ кг/м³, скорость воздушного потока на полное сечение жалюзийной решетки – $w = 3,0$ м/с; выход мелкого (готового) продукта разделения составил $G_m = 90,79$ %, выход крупного продукта разделения (отсев) – $G_k = 9,21$ %. Сопротивление классификатора составило $\Delta P = 0,3$ кПа. Из представленных данных следует, что граница разделения составляет $x_{50} = 875,2$ мкм, эффективность разделения при этом высокая и по показателю Едера–Майера составляет $E = 100 \cdot x_{75}/x_{25} = 72,0$ %. Построена кривая фракционного разделения узких фракций в мелкий продукт (см. рисунок 3 поз. 2). На рисунке 4 приведена фотография крупного и мелкого продуктов разделения песка Сухринского карьера [10].

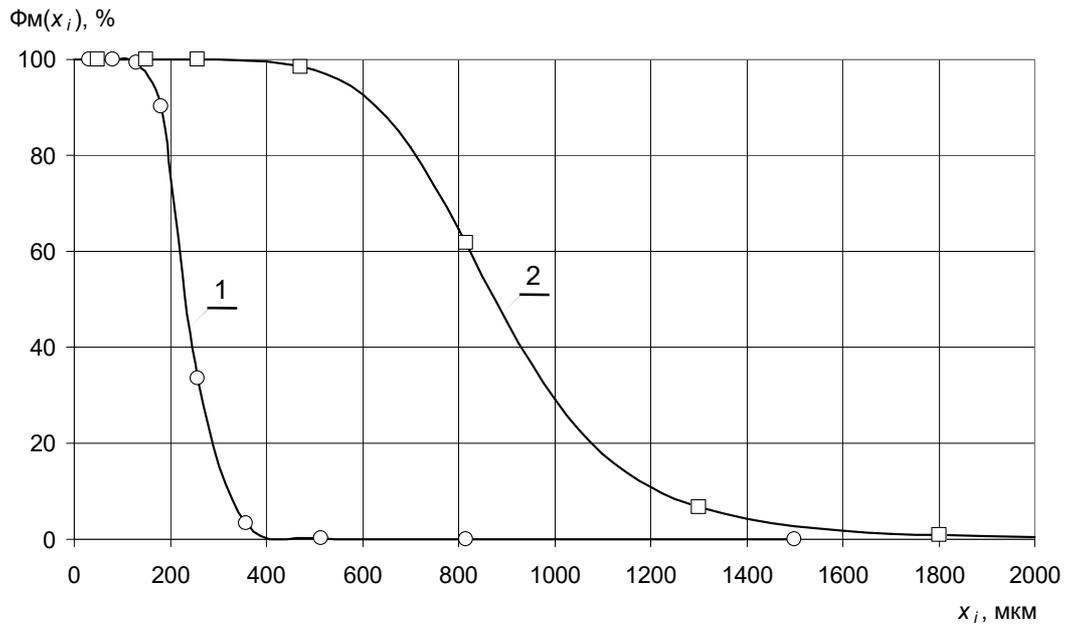


Рис. 3. Степень фракционного извлечения в мелкий продукт

Таблица 2

Результаты разделения песка Сухринского карьера по крупной границе разделения

№ i	Размер сит, мкм		Гранулометрический состав продуктов, %						Степень фракционного извлечения, %	
			Исходный		Мелкий		Крупный			
	x_i	$x_{иср}$	R_i	r_i	$R_{им}$	$r_{им}$	$R_{ик}$	$r_{ик}$	$\Phi_{им}$	$\Phi_{има}$
1	2500	3125,0	1,62	1,62	0,00	0,00	0,00	17,54	0,00	0,02
2	2000	2250,0	2,21	0,59	0,00	0,00	23,95	6,41	0,00	0,18
3	1600	1800,0	2,90	0,69	0,00	0,00	31,46	7,52	0,00	0,80
4	1000	1300,0	5,65	2,75	0,20	0,20	59,32	27,86	6,61	6,63
5	630	815,0	14,17	8,52	6,00	5,80	94,69	35,37	61,78	61,70
6	315	472,5	33,21	19,05	26,50	20,50	99,40	4,71	97,72	98,41
7	200	257,5	53,92	20,71	49,30	22,80	99,50	0,10	99,96	99,97
8	100	150,0	90,36	36,43	89,40	40,10	99,80	0,30	99,92	100,00
9	0	50,0	100,00	9,64	100,00	10,60	100,00	0,20	99,81	100,00



Рис. 4. Продукты разделения песка Сухринского карьера по крупной границе [10]

Расчетные модели. Расчет жалюзийной решетки. Единичный акт разделения происходит при проходе частиц материала через зазор между пластинами решетки. Необходимо, чтобы этот единичный акт разделения протекал эффективно, а скорость поперечного воздушного потока соответствовала заданной границе разделения. Для этого необходимо как расчетным, так и экспериментальным способом подобрать геометрические параметры решетки.

В настоящее время для расчета двухфазных потоков используются специальные программы вычислительной гидромеханики CFD (*Computational Fluid Dynamics: SolidWorks Flow Simulation, ANSYS CFX, FlowVision, KompasFlow, CADFlo* и др.) [11, 12].

Для проверки геометрии элементов решетки промышленного аппарата был выполнен расчет траекторий частиц с помощью программного комплекса *SolidWorks FlowSimulation* на основе метода конечных элементов (МКЭ) [13]. Проектирование промышленного классификатора производилось с целью удаления частиц размером менее 200 мкм – наиболее загрязненной части песка по заданию Ташлинского ГОКа.

Расчет проводился для различных конструктивных параметров жалюзийных решеток. Варьировались длина пластин и зазор между ними. В результате расчета была выбрана оптимальная конструкция. Жалюзийная решетка должна быть беспровальной, т. е. даже при отсутствии потока воздуха материал должен скатываться по решетке вниз и не проваливаться под решетку. Угол наклона жалюзийной решетки не должен быть слишком маленьким, чтобы обеспечить движение в условиях прижимного воздействия

потока воздуха. Например, если материал достаточно мелкий, или плохо сыпучий, то он может прижиматься к решетке, и плохо скользить по пластинам. Как показали испытания по разделению песка и расчеты, оптимальным углом наклона решетки к горизонту является $\alpha = 65^\circ$, угол наклона пластин $\beta = 45^\circ$. Длина пластин должна быть оптимальной по длине. Например, экспериментально установлено, что короткие пластины с мелким шагом не обеспечивают высокое качество разделения. Слишком длинные пластины сокращают число каскадов перемешивания крупного материала, снижают качество разделения, и приводят к увеличению габаритов решетки. Пластины жалюзийной решетки во время эксплуатации подвержены абразивному износу, поэтому они должны выполняться из стали стойкой к абразивному износу. Хорошо себя зарекомендовала в эксплуатации сталь *HARDOX* (*HARDOX 400, HARDOX 500, HARDOX 550*). Резку и сварку следует производить с соблюдением рекомендуемой технологии для данных марок стали. Возможна замена данной стали на отечественные аналоги.

Расчетная область и структура потока воздуха через фрагмент решетки оптимальных размеров представлена на рисунке 5. Длина пластин 80 мм, ширина решетки 600 мм, зазор между пластинами 30 мм, шаг решетки 76 мм, угол наклона решетки к горизонту 65° , угол наклона пластин к горизонту 45° . Полное сечение решетки $F_p = 0,2848 \text{ м}^2$. Живое сечение $F_{ж} = 0,084 \text{ м}^2$ ($F_{ж} = 24,4 \%$). Расход воздуха через фрагмент решетки $Q = 0,2352 \text{ м}^3/\text{с}$. Скорость потока в зазоре $w_z = 3,27 \text{ м/с}$. Скорость потока $w = 0,8 \text{ м/с}$ на полное сечение решетки.

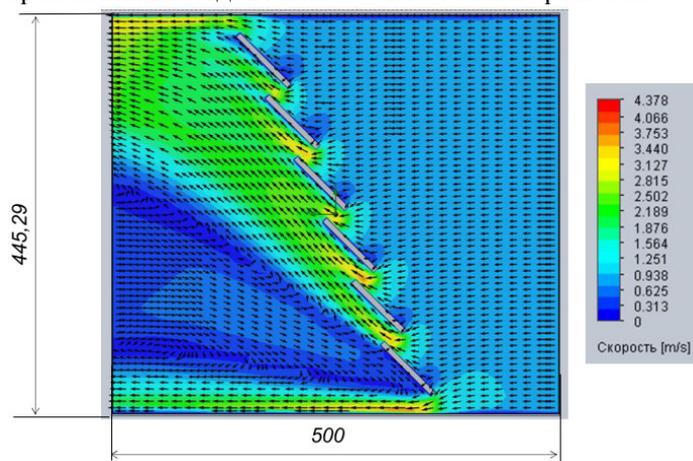


Рис. 5. Расчетная область фрагмента жалюзийной решетки промышленного аппарата

В данном поле скоростей воздушного потока производился расчет траекторий частиц с начальной скоростью частицы $v_x = v_y = -0,71 \text{ м/с}$. Данное значение было измерено экспериментально при сходе частиц песка с пластины лабо-

раторного классификатора. Условия на полке задавались коэффициентами нормального и тангенциального отражения $e_n = e_\tau = 0,5$. Массовый расход частиц $0,8 \text{ кг/с}$. Результаты расчета траекторий частиц разных фракций представлены на рисунке 6, 7.

Из представленных расчетных данных следует, что при скорости потока воздуха на полное сечение решетки $w = 0,8$ м/с и скорости потока $w_z = 3,27$ м/с в зазоре, все частицы размером 200 мкм и менее попадают в камеру осаждения, т. е. мелкий продукт разделения. Частицы размером

225 мкм также попадают в камеру осаждения. Частицы размером 250 мкм и 300 мкм попадают в крупный продукт разделения. Таким образом, граница разделения находится в интервале $x_{50} = 225...250$ мкм. Это удовлетворительно согласуется с данными лабораторных испытаний ($x_{50} = 236,8$ мкм).

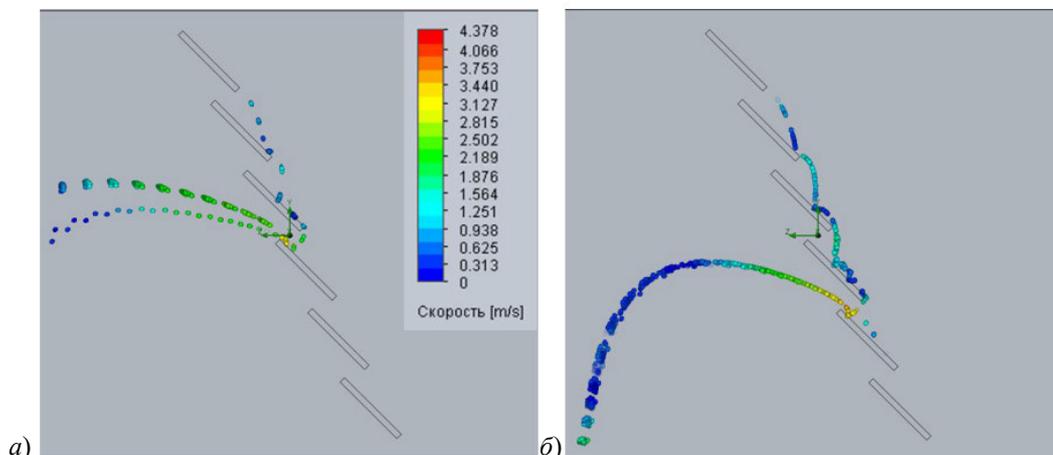


Рис. 6. Траектории движения частиц песка размером 200 и 225 мкм
а) фракция 200 мкм, б) фракция 225 мкм

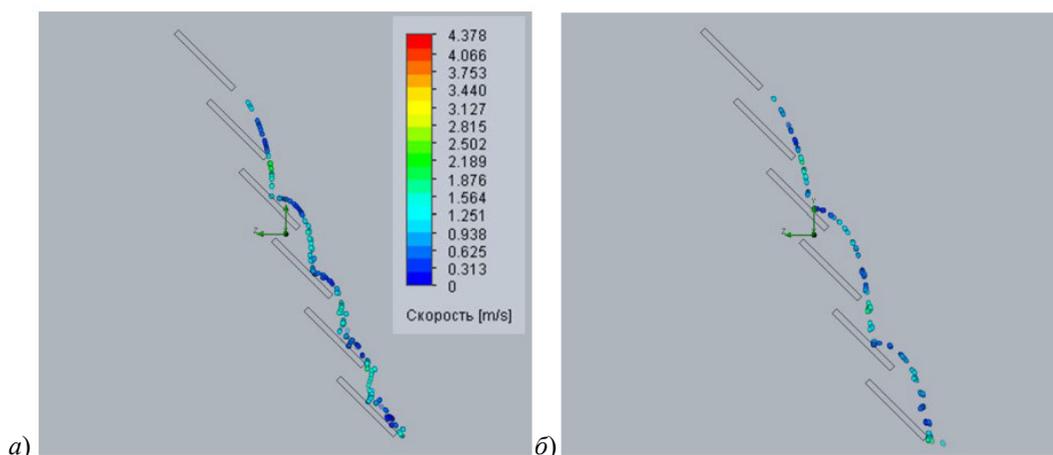


Рис. 7. Траектории движения частиц песка размером 250 и 300 мкм
а) фракция 250 мкм, б) фракция 300 мкм

Расчет камеры осаждения. Назначение камеры осаждения – отделение мелкого продукта от воздуха. Чем выше КПД камеры, тем меньше мелкого материала попадет в циклон. Оценку процесса осаждения можно выполнить по методике, описанной в [14].

Гранулометрический состав мелкого продукта в номинальном режиме приведен в таблице 2. Полные остатки можно аппроксимировать функцией Плита с параметрами $x_{50} = 22,26$ мкм и $p = 11,2877$. Около 80 % мелкого продукта составляет фракция 200...250 мкм. Расход воздуха через классификатор в номинальном режиме составляет $Q = 7896$ м³/ч. Как показали лабораторные испытания, выход мелкого продукта в номинальном режиме составляет $G_m = 23,5$ %. Выход

мелкого продукта по массе в соответствии с расчетом должен составить $G_m = 7050$ кг/ч. При этом расходная концентрация материала будет $\mu = 0,893$ кг/м³.

Для оценки процесса осаждения в камере классификатора произведем расчет траекторий частиц размером 200, 160, 100 мкм. Рассмотрим уравнение движения сферической частицы в поперечном потоке. В качестве исходных данных примем следующие габариты аппарата: ширина 1,00 м, высота 4,05 м. Скорость поперечного потока воздуха на полное сечение принята $w_x = 0,54$ м/с. В неподвижной системе координат, показанной на рисунке 8, оно имеет вид [15]

$$m \frac{dV}{dt} = F_s + F_g + F_a, \quad (4)$$

где \mathbf{V} – вектор скорости частицы, м/с; \mathbf{F}_s – сила сопротивления, Н; \mathbf{F}_g – сила тяжести, Н; \mathbf{F}_a – сила Архимеда, Н.

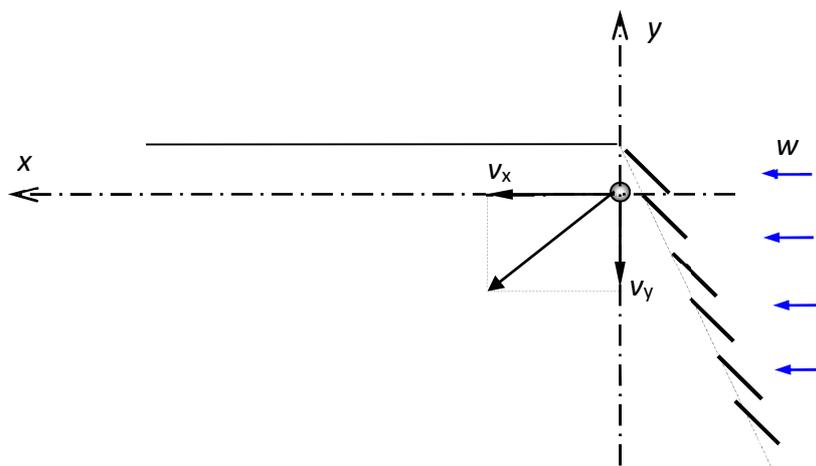


Рис. 8. Расчетная схема движения частиц в камере осаждения

При движении частицы в газе силой Архимеда \mathbf{F}_a можно пренебречь.

После некоторых упрощений, с учетом допущений по скорости потока $w_y = 0$, $w_x = w = \text{const}$, система примет вид

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{d\tau} = C_x A (w - v_x) \sqrt{(w - v_x)^2 + v_y^2}, \\ \frac{dv_y}{d\tau} = -C_x A v_y \sqrt{(w - v_x)^2 + v_y^2} - B, \\ \frac{dx}{d\tau} = v_x, \\ \frac{dy}{d\tau} = v_y, \end{cases} \quad (5)$$

где параметры A и B определяются выражениями:

$$A = \frac{3\rho}{8r\rho_t}, \quad (6)$$

$$B = \frac{(\rho_t - \rho)}{\rho_t} g, \quad (7)$$

где ρ , ρ_t – соответственно плотность воздуха и плотность твердой частицы, кг/м³; r – радиус шарообразной частицы, м; g – ускорение свободного падения м/с².

Коэффициент сопротивления вычислялся по универсальной формуле Брауэра – Мьюса

$$C_x = 0,4 + \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}}}. \quad (8)$$

Система уравнений (5) решалась методом прогноза и коррекции. В результате решения получены зависимости координат частицы от времени. На рисунке 9 представлены расчетные траектории движения частиц 100, 160 и 200 мкм в осадительной камере классификатора.

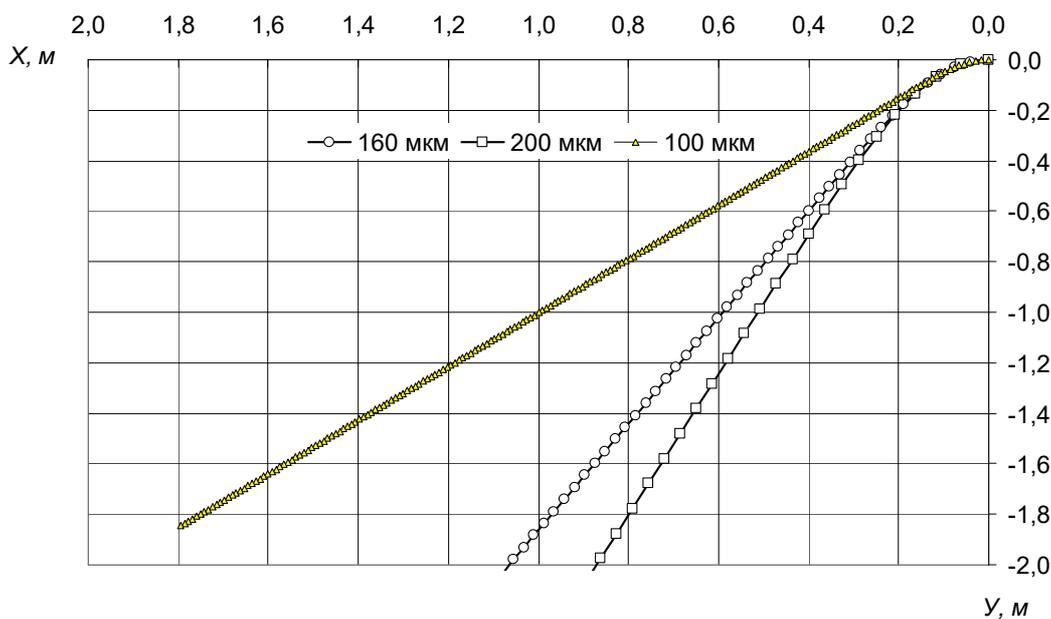


Рис. 9. Расчетные траектории движения частиц 100, 160 и 200 мкм в пылевой камере

Из представленных данных следует, что частицы крупнее 100 мкм должны улавливаться в камере осаждения длиной 2 м. Поскольку мелкий продукт разделения достаточно крупный (медианный размер $x_{50} = 227,26$ мкм см. табл. 1) то в пылевой камере должно улавливаться не менее 80...90 % частиц. Входная концентрация пылевых частиц на входе в циклон не превысит $\mu_{ц} = 10...20$ г/м³.

Промышленная реализация. В качестве примера, на рисунке 10 показаны фотографии эксплуатируемых классификаторов в промыш-

ленности. На рисунке 10.а представлен поперечно-поточный пневмоклассификатор для разделения каустического магнезита на ОАО «Комбинат Магнезит». Граница разделения регулируется в пределах от 0,1 до 0,3 мм. Производительность аппарата по исходному питанию составляет 9 т/ч. На рисунке 10.б представлен поперечно-поточный пневмоклассификатор для разделения песка на ОАО «Горнозаводскцемент». Граница разделения регулируется в пределах от 0,1 до 0,2 мм. Производительность аппарата по исходному питанию составляет 10 т/ч.



Рис. 10. Фотографии промышленных классификаторов с жалюзийной решеткой

Выводы.

1. На примере различных песков экспериментально показана возможность разделения сыпучих материалов по крупности частиц в классификаторе с жалюзийной решеткой в диапазоне 0,1...1,0 мм. Высокая острота разделения 76...72 % позволяет использовать эти классификаторы для удаления некондиционных мелких или крупных фракций.

2. Для проверки геометрии элементов решетки промышленного аппарата и достижения необходимой границы разделения приведен пример расчета жалюзийной решетки методом *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*) с использованием программного комплекса *SolidWorks FlowSimulation* на основе метода конечных элементов (МКЭ). Результаты расчета границы разделения для заданной скорости поперечного воздушного потока $w = 0,8$ м/с согласуются с экспериментальными данными.

3. Пневмоклассификаторы с жалюзийной решеткой имеют камеру осаждения для снижения износа циклона. Приведено решение системы дифференциальных уравнений движения частиц методом прогноза и коррекции. В результате расчета показано, что для улавливания частиц размером 200, 160, 100 мкм длина камеры осаждения должна быть не менее двух метров.

4. Классификаторы с жалюзийной решеткой обладают высокой эффективностью разделения и могут быть рекомендованы для замены грохота. Малое аэродинамическое сопротивление поперечно-поточного классификатора обеспечивает низкие удельные затраты электроэнергии. Благодаря высокой износостойкости жалюзийной решетки срок ее эксплуатации на порядок выше, чем у сеток грохота и решается проблема их частой замены.

5. Граница разделения в классификаторе регулируется изменением расхода воздуха, который легко управляется частотой вращения вентилятора и может поддерживаться автоматически.

6. Классификатор работает под разрежением. Благодаря этому отсутствует пылевыведение и выполняются требования по экологичности процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ревнивцев В.И., Шпектор А.А. Обогащение формовочных песков. М.: НИИМАШ, серия С-IV, 1972. 67 с.

2. Дзюзер В.Я. Анализ гранулометрического состава кварцевого песка // Стекло и керамика. 2015. Т. 88. № 5. С. 29–32.

3. Shishkin S.F., Dzyuzer V.Ya., Shishkin A.S. Air Classification of Sands for the Glass Industry // Glass and Ceramics. 2001. Vol. 58. Iss. 11–12. Pp. 370–373.

4. Чередниченко Т.Ф., Тухарели В.Д., Абухба Б.А. Оптимизация зернового состава кварцевого песка – как фактор ресурсосбережения в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. С. 132–140.

5. Бауман А.В., Степаненко А.И., Степаненко А.А. Практические результаты и перспективы сухого обогащения руд и нерудных материалов методом пневмосепарации // Горный журнал. 2020. № 3. С. 40–44. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.07.

6. Барский М.Д. Фракционирование порошков. М.: Недра, 1980. 327 с.

7. Ponomarev V.B. Dry processing of rock breaking waste // Gornyi Zhurnal. 2015. Vol. 2015. Iss. 12. Pp. 50–52.

8. Ponomarev V.B., Shishkin A.S. Methodology of Designing an Air Cascade Separator // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 966. 012043. DOI: 10.1088/1757-899X/966/1/012043.

9. Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Шишкин С.Ф. Аномалия степени фракционного разделения в центробежных классификаторах // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2025. Т. 81. № 1. С. 62–68. DOI: 10.6060/snt.20258101.0007.

10. Пономарев В.Б., Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Фесун И.П. Пневмокласификация кварцевых песков в поперечно-поточном классификаторе // Стекло и керамика. 2024. Т. 97. № 12 (1164). С. 25–31. DOI: 10.14489/glc.2024.12.pp.025-031.

11. Tu J., Yeoh G.H., Chaoqun L. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. Elsevier, 2019. 477 p.

12. Computational fluid dynamics. edited by OH N.W. London: IntechOpen, 2010. 428 p.

13. Ferziger J.H., Perić M., Street R.L. Computational methods for fluid dynamics. 4-th edition. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. 596 p.

14. Василевский М.В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 258 с.

15. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течения газа с частицами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 600 с.

Информация об авторах

Бараковских Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и автоматизации силикатных производств. E-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru. Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 28.

Шишкин Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и автоматизации силикатных производств. E-mail: 9022625282@mail.ru. Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 28.

Шишкин Сергей Федорович, кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и автоматизации силикатных производств. E-mail: 9122493546@mail.ru. Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 28

Поступила 01.07.2025 г.

© Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Шишкин С.Ф., 2026

*Barakovskikh D.S., Shishkin A.S., Shishkin S.F.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

*E-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru

SEPARATION OF BULK MATERIALS IN A CROSS-FLOW CLASSIFIER WITH A LOUVERED GRID

Abstract. Experimental studies were conducted, demonstrating the feasibility of using a transverse-flow classifier with a louvered grating for the efficient size classification of bulk materials with particle sizes ranging from 0.1 to 1.0 mm. The experiments were performed using quartz sands from the Tashlinsky and Sukhrinsky quarries. The design of the louvered grating involved CFD modeling to calculate its structural elements. The settling chamber of the classifier was analyzed by solving a system of differential particle motion equations using a predictor-corrector method. The computational results align well with experimental data, confirming the applicability of these methods for industrial-scale equipment design. A key feature of the louvered classifier is its cascade separation principle, achieved through multiple re-cleaning of the coarse product as it descends along the louvered grating. This ensures high separation efficiency, making the classifier suitable for industrial processing of various bulk materials. The air consumption required for pneumatic classification is comparable to that used in screen aspiration systems. The cut size can be adjusted over a wide range by varying the airflow rate. Additionally, the louvered grating classifier exhibits low aerodynamic resistance, resulting in reduced specific energy consumption by the fan.

Keywords: bulk materials, sand, particle size distribution, separation cut point and efficiency, fractional separation curve.

REFERENCES

1. Revnivcev V.I., Shpektor A.A. The Enrichment of Molding Sands [Obogashchenie formovochnykh peskov]. M.: NIIMASH, Series C-IV, 1972. 67 p. (rus)
2. Dzyuzer V.Ya. The Analysis of the Granulometric Composition of Quartz Sand [Analiz granulometricheskogo sostava kvarcevoogo peska]. Steklo i Keramika. 2015. Vol. 88. No 5. Pp. 29–32. (rus)
3. Shishkin S.F., Dzyuzer V.Ya., Shishkin A.S. Air Classification of Sands for the Glass Industry. Glass and Ceramics. 2001. Vol. 58. Iss. 11–12. Pp. 370–373.
4. Cherednichenko T.F., Tuhareli V.D., Abuhba B.A. Optimization of Quartz Sand Grain Composition as a Resource-Saving Factor in Construction [Optimizatsiya zernovogo sostava kvarcevoogo peska – kak faktor resursosberezheniya v stroitel'stve]. Inzhenernyj Vestnik Dona. 2016. No 4. Pp. 132–140. (rus)
5. Bauman A.V., Stepanenko A.I., Stepanenko A.A. Practical Results and Prospects of Dry Beneficiation for Ores and Non-Metallic Materials via Pneumatic Separation [Prakticheskie rezul'taty i perspektivy suhogo obogashcheniya rud i nerudnykh materialov metodom pnevmoseparatsii]. Gornyj zhurnal. 2020. No 3. Pp. 40–44. DOI: 10.17580/gzh.2020.03.07. (rus)
6. Barskij M.D. The Fractionation of Powders [Fracionirovanie poroshkov]. Moscow: Nedra, 1980. 327 p. (rus)
7. Ponomarev V.B. Dry Processing of Rock Breaking Waste. Gornyi Zhurnal. 2015. Vol. 2015. Iss. 12. Pp. 50–52.
8. Ponomarev V.B., Shishkin A.S. Methodology of Designing an Air Cascade Separator. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 966. No 012043. DOI: 10.1088/1757-899X/966/1/012043.
9. Barakovskikh D.S., Shishkin A.S., Shishkin S. F. The Anomaly of the Fractional Separation Degree in Centrifugal Classifiers [Anomaliya stepeni frakcionnogo razdeleniya v centrebeznykh klassifikatorah]. Modern High Technologies. Regional Application. 2025. Vol. 81. No 1. Pp. 62–68. DOI: 10.6060/snt.20258101.0007. (rus)
10. Ponomarev V.B., Barakovskikh D.S., Shishkin A.S., Fesun I.P. Pneumatic Classification of Quartz Sands in a Cross-Flow Classifier [Pnevmoklassifikatsiya kvarcevykh peskov v poperechno-potochnom klassifikatore]. Steklo i Keramika. 2024. Vol. 97. No 12 (1164). Pp. 25–31. DOI: 10.14489/glc.2024.12.pp.025–031. (rus)
11. Tu J., Yeoh G.H., Chaoqun L. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. Elsevier, 2019. 477 p.
12. Computational fluid dynamics. edited by OH H.W. London: IntechOpen, 2010. 428 p.
13. Ferziger J.H., Perić M., Street R.L. Computational methods for fluid dynamics. 4-th edition. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. 596 p.
14. Vasilevskij M.V. Gas Dedusting by Inertial Apparatuses [Obespylivanie gazov inercionnymi apparatami]. Tomsk: Publisher House of Tomsk Polytechnic University, 2008. 258 p. (rus)
15. Volkov K.N., Emel'yanov V.N. Gas flow with Particles [Techeniya gaza s chasticami]. Moscow: FIZMATLIT, 2008. 600 p. (rus)

Information about the authors

Barakovskikh, Dmitry S. PhD. E-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru. Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin. Russia. 620062, Yekaterinburg, st. Mira, 28.

Shishkin, Alexey S. PhD. E-mail: 9022625282@mail.ru. Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin. Russia. 620062, Yekaterinburg, st. Mira, 28.

Shishkin, Sergey F. PhD. E-mail: 9122493546@mail.ru. Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin. Russia. 620062, Yekaterinburg, st. Mira, 28.

Received 01.07.2025

Для цитирования:

Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Шишкин С.Ф. Разделение сыпучих материалов в поперечно-поточном классификаторе с жалюзийной решеткой // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 2. С. 73–83. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-73-83

For citation:

Barakovskikh D.S., Shishkin A.S., Shishkin S.F. Separation of bulk materials in a cross-flow classifier with a louvered grid. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 2. Pp. 73–83. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-73-83