

УДК 693.52

РЫБАЛКО Р.И., к.т.н., доцент,
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры
ГУЩИН В.М., к.т.н., доцент,
Донбасская государственная машиностроительная академия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДУШНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ПОМОЛЬНЫХ АГРЕГАТАХ СУХОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Приведены основные результаты экспериментальных исследований воздушной сепарации сыпучих материалов, применяемых в дорожном строительстве, в новом двухстадийном сепараторе на лабораторном стенде и опытных промышленных образцах. Проанализировано распределение поля скоростей воздушного потока при обтекании плоского экрана-отражателя. Исследовано влияние скорости двухфазного потока, конструктивных размеров решетки гашения крупномасштабных вихревых структур и границы разделения на эффективность сепарации. Определены основные аэродинамические параметры рассмотренной конструкции сепаратора, сделан вывод о его работоспособности
Ключевые слова: сухие сыпучие материалы, классификация, сепаратор, воздушный поток

Постановка проблемы

В процессе измельчения, в зависимости от технологии получения различных материалов, меняются задачи классификации, что необходимо учитывать при создании оборудования. До сегодняшнего дня еще не создана машина, которая бы обеспечивала на выходе из помольного агрегата материал с заданными размерами частиц. На практике всегда образуется часть материала, измельченного более тонко, чем требуется. Переизмельченный продукт обладает высокой поверхностной энергией, что приводит к налипанию на мелющие тела и агломерации. Эти явления снижают эффективность помола, поскольку демпфирование ударных воздействий предотвращает разрушение частиц. В связи с этим актуальной задачей является разработка нового высокоэффективного сепаратора в помольных агрегатах сухого измельчения [1].

Анализ последних исследований и публикаций

Одно из важных мест в технологии переработки полезных ископаемых и материалов для производства строительных смесей занимает воздушная классификация. На протяжении ряда последних лет к ней проявляется повышенный интерес, поскольку по сравнению с другими способами сортировки она проще и дешевле. Это процесс разделения, базирующийся на разнице физических свойств «размер-масса» и аэродинамических характеристик отдельных частиц. В качестве разделительной среды в этом случае используют воздух или горячие дымовые газы [2,3]. В основу теоретических подходов к воздушной классификации положены работы известных ученых Абрамовича Г.Н., Лойцянского Л.Г., Брэдшоу П., Бусройда Р., Гильберта Б., Гиневского А.С., Смолдырева А.Е., Островского Г.М. и др. Имеется достаточно большое количество конструктивных разновидностей оборудования воздушной сепарации сыпучих материалов, патентов и авторских свидетельств на него.

Работа воздушных классификаторов характеризуется низкой эффективностью сортировки и большой засоренностью фракций, а теоретические основы создания машин воздушной сортировки не учитывают структуру турбулентного двухфазного потока и специфику движения час-

тиц различной гранулометрии. И сегодня нет сепаратора, обеспечивающего резкую верхнюю границу тонкого продукта и отсутствие «влетающих» частиц. Создание оборудования, соответствующего предъявляемым к нему требованиям, возможно за счет принципиально новых технических решений. В силу этого альтернативным решением является разработка нового двухстадийного воздушного сепаратора. Выполненные теоретические исследования позволили определить его основные аэродинамические характеристики и механические параметры [4, 5].

Цель работы

Целью исследования является изучение процессов классификации сыпучих материалов в помольных агрегатах сухого измельчения и, на этой основе, разработка нового типа сепаратора повышенной эффективности с регулированием однородности фракционного состава материала действием турбулентности в зоне разделения [6].

Основной раздел

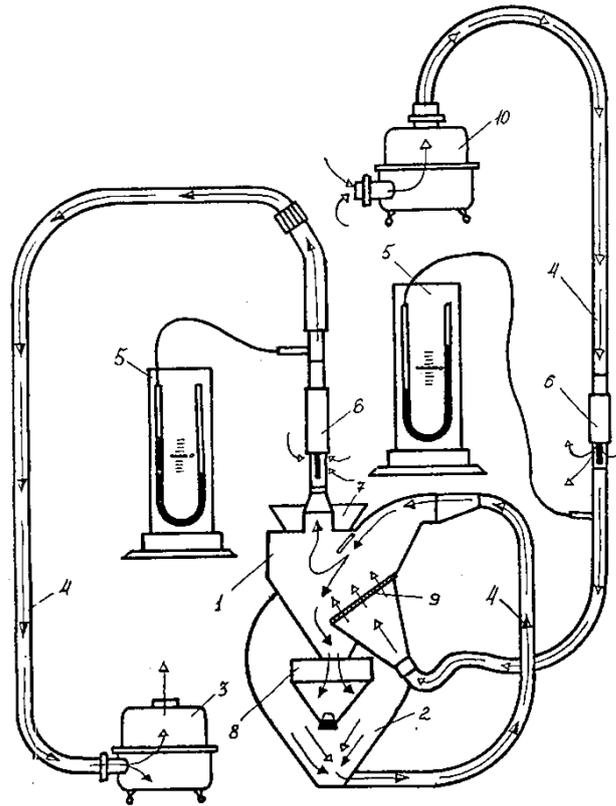
Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: анализ взаимодействия рабочих органов машины с частицами материала; изучение механизма эволюции турбулентных структур двухфазных потоков; выявление зависимости взаимодействия воздушного потока с отдельными частицами измельчаемого материала; изучение характера распределения концентрации частиц разных фракций в зависимости от аэродинамических характеристик элементов машины; определение оптимальных конструктивных параметров решетки гашения крупномасштабных вихревых структур, экранов-отражателей крупных частиц и устройства удаления переизмельченных мелких фракций. Помимо постановки физического эксперимента, подтверждающего работоспособность предложенной конструкции машины, выполнена проверка адекватности разработанных математических моделей, достоверности основных теоретических положений и основных выводов работы.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке и промышленном оборудовании. Схема установки и фото оборудования представлены на рис. 1 и 2. На установке проводились исследования как для первой ступени классификатора, так и для второй. Для исследования первой ступени использовался материал (мергель, кварцит, гипс) с размерами частиц до 5 мм, для второй – до 0,5 мм. При моделировании первой ступени ставилась заглушка на решетку и воздух подавался в зону загрузки. При моделировании второй ступени снимался экран-отражатель и воздух подавался в зону разделения. Материал может подаваться в зону загрузки в трех вариантах: из бункера 7 – прямо в зону загрузки; из бункера 7 – в мельницу, а из нее – в зону загрузки; совместно в заданном соотношении из бункера 7 и из мельницы. Все материалы, взятые для постановки экспериментов, отвечали требованиям, предъявляемым соответствующими ГОСТами.

В технологических трактах частицы измельчаемого материала совершают сложное движение, поэтому на входе в первую ступень классификатора их скорость отличается от осредненной скорости воздуха на величину скорости витания этих частиц. Это объясняется малым временем транспортирования, которого недостаточно для выравнивания скоростей частиц различных фракций. Турбулентное двухфазное течение представляет собой сложную систему, поведение которой определяется взаимодействием многих факторов.

На частицу, движущуюся в турбулентном потоке воздуха, действуют силы сопротивления при стационарном обтекании Сафмена, Магнуса, Бассе, тяжести, турбофореза и другие. Степень влияния каждой из сил зависит от размеров частиц, концентрации воздуха в потоке и скорости движения. Распределение частиц на входе в первую ступень классификатора неравно-

мерно, что объясняется различной скоростью воздушного потока по сечению и действием эффекта Магнуса.



1 – зона разделения;
 2 – зона загрузки (разгрузочная часть мельницы и подача материала из бункера 7);
 3,10 – пневмоустановки; 4 – газоход; 5 – измерители давления;
 6 – регуляторы давления; 7 – бункер загрузки; 8 – бункер осажденного материала;
 9 – решетки; 11 – экран-отражатель

Рис. 1. Схема лабораторной установки



а)

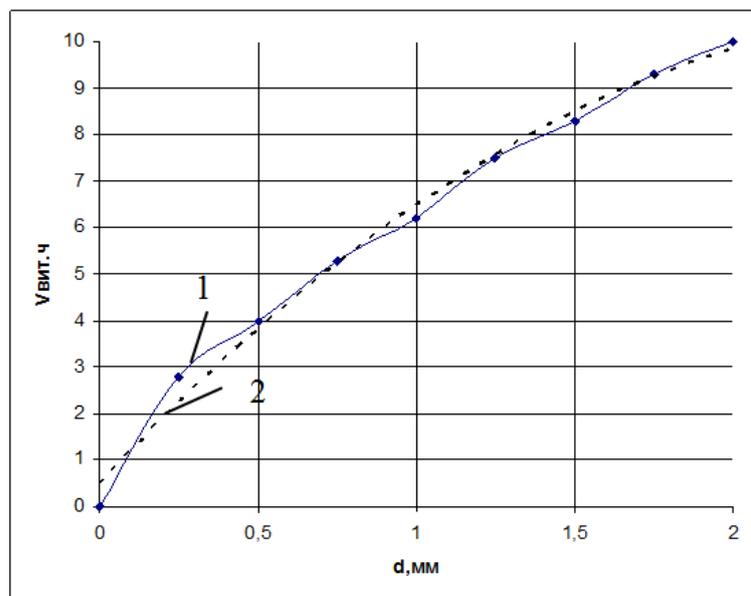


б)

а – первая ступень грубой классификации, б – вторая ступень тонкой классификации

Рис. 2. Оборудование для классификации материалов

Летающие в потоке воздуха частицы имеют различные диаметры, массу и скорости. Одной из обобщенных характеристик частиц материала применительно к условиям аэродинамических процессов является, как известно, скорость витания. В силу этого в работе в очередной раз исследована скорость витания частиц в зависимости от их диаметра (рис. 3).



1 – расчетные значения $v_{\text{вит.ч}}$ для экспериментальных значений ξ [109];
2 – полиномиальная аппроксимация

Рис. 3. Зависимость скорости витания $v_{\text{вит.ч}}$ от диаметра частиц

Выполнено исследование распределения поля скоростей воздушного потока при обтекании плоского экрана-отражателя. Определялась скорость воздуха после удара транспортирующего воздуха об экран. Для определения скоростей воздушного потока в зоне разворота и на различных расстояниях от нее был изготовлен стенд, состоящий из металлической рамки, на которую натянуты струны. В зависимости от диапазона измеряемых скоростей к струнам крепились свободновисящие жестяные пластинки длиной 10-20 мм и шириной 3-5 мм или пластинки из фольги аналогичного размера.

Скорость воздуха определялась косвенно по углу отклонения пластинок, висящих на струне. Тарирование данного стенда осуществлялось с помощью анемометра У5 ГОСТ 6376-84.

Замеры проводились на высотах от 10 мм до 200 мм при различных расстояниях от места подачи воздуха до экрана, углах соударения потока воздуха с экраном и различной осредненной скорости воздуха на выходе из газохода. Экран прямоугольной формы со сторонами 400×300 мм. Сечение газохода квадратное, 150×150 мм. Для описания распределения скоростей на экране была введена декартова система координат с началом в точке пересечения диагоналей. Оси X и Y направлены вдоль экрана параллельно сторонам экрана, а ось H направлена перпендикулярно плоскости экрана.

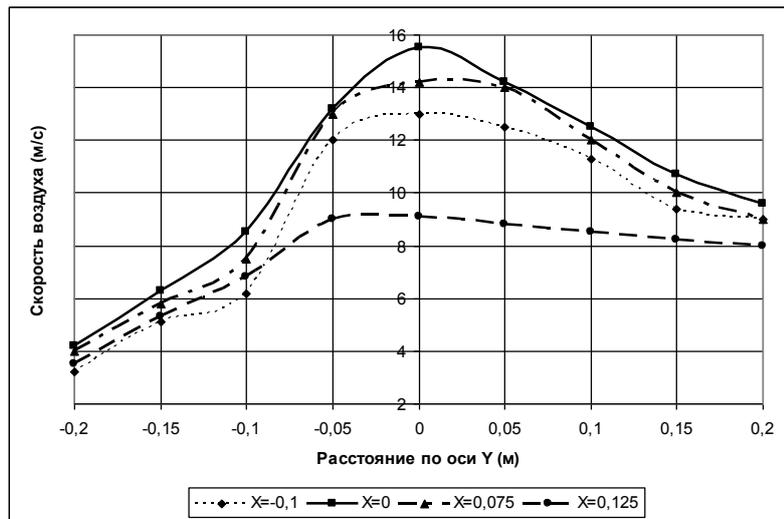
На рисунках 4а и 4б приведены графики изменения скоростей воздуха на расстоянии 0,15 м от экрана вдоль одной из координатных осей при фиксированном значении второй координаты.

Поток воздуха соударяется с экраном под углом с осью Y. Как видно из приведенных графиков, распределение скоростей симметрично относительно оси X и имеет асимметрию по оси Y. Все частицы диаметром менее 0,5 мм будут транспортироваться во вторую ступень классификатора.

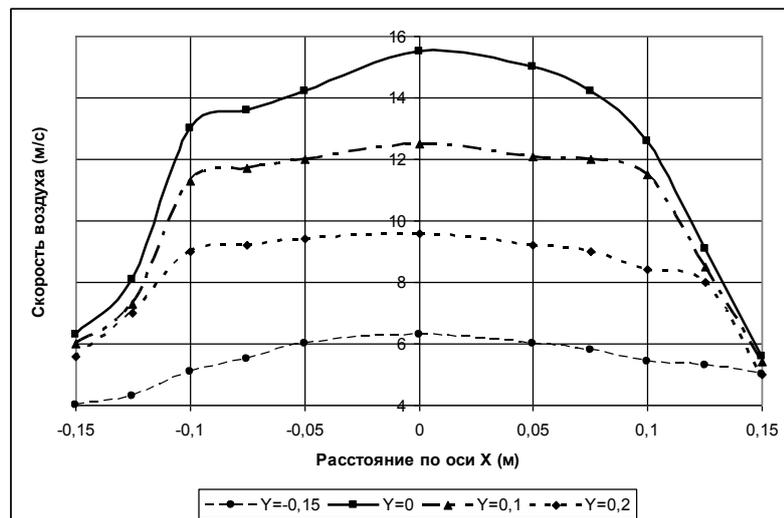
Основными факторами, влияющими на эффективность разделения в первой ступени классификатора, являются скорость воздушного потока и его направление. Причем направление можно изменять экраном.

Исследовано влияние скорости двухфазного потока, конструктивных размеров решетки гашения крупномасштабных вихревых структур и границы раздела на эффективность разделения. Изучение процесса разделения во второй ступени классификатора позволило выявить его

рациональные параметры, в частности, соотношение диаметра прутков решетки (D) и расстояния между прутками (D_1), т.е. D/D_1 [7].



а)



б)

а – вдоль оси Y; б – вдоль оси X

Рис. 4. Распределение скоростей воздуха на расстоянии 0,15 м от экрана

Решение поставленной задачи осуществлялось при использовании центрального ортогонального композиционного плана 2-го порядка, в основу которого положена известная методика [8]. В качестве параметра оптимизации принята эффективность сортировки, зависящая от следующих факторов: x_1 – отношение D/D_1 ; x_2 – величина границы разделения, мкм; x_3 – скорость двухфазного потока, м/с.

Изучение эффективности сортировки как функции от трех независимых переменных проводилось при варьировании факторов на трех основных уровнях (верхний +1, нижний -1, нулевой 0) и двух дополнительных (+*, -*). Диапазоны варьирования переменными назначались согласно результатам ранее проведенных исследований. Описание поверхности отклика в локальной области получено в результате реализации полного факторного эксперимента типа 2^3 . Звездное плечо для трех факторов центрального композиционного плана 2-го порядка $d = 1,215$.

Графики зависимости Y_{31} от x_1, x_2, x_3 приведены на рис. 5-7.

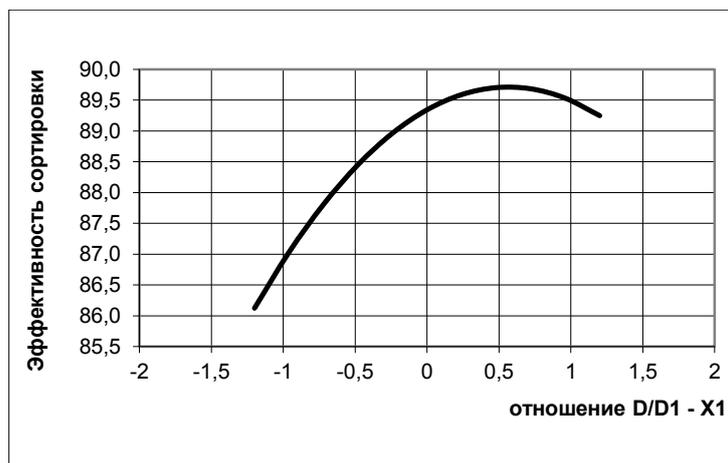


Рис. 5. Зависимость эффективности сортировки от отношения D/D1.

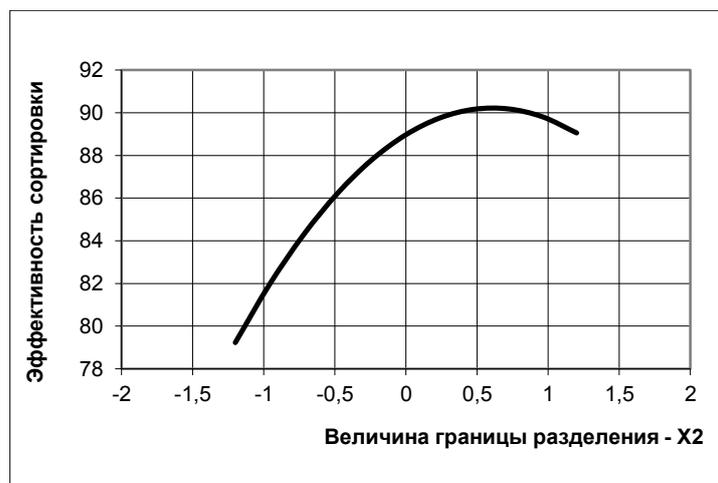


Рис. 6. Зависимость эффективности сортировки от величины границы разделения



Рис. 7. Зависимость эффективности сортировки от скорости двухфазного потока

Исследования разделения во второй ступени классификатора подтвердили теоретические выводы о возможности повышения эффективности сортировки за счет установки решетки разрушения крупномасштабных вихревых структур [9]. Анализ полученных зависимостей позволил выявить оптимальное соотношение элементов решетки: в частности, соотношение диаметра прутков решетки (D) и расстояния между прутками (D_1) находится в пределах 0,022-0,025.

Для исключения систематических ошибок проведена рандомизация опыта по датчику случайных чисел. Однородность дисперсии проверялась по критерию Кохрена, что позволило сделать вывод о полноте факторов.

Проверка адекватности описания поверхностей отклика полиномом 2-й степени производилась по F-критерию Фишера [10]:

$$F = \frac{S_{ад.}^2}{S_{воспр.}^2} = \frac{0,2016}{0,1217} = 1,657 < F_{табл.}$$

$$F_{табл.} = F_{(0,05;5;5)} = 5,05$$

Выводы

1. Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать вывод о работоспособности предложенного двухстадийного сепаратора для воздушной классификации сыпучих материалов в помольных агрегатах сухого измельчения.

2. Разработанные теоретические предпосылки для воздушной сепарации на базе исследований динамики энергетического спектра турбулентных структур двухфазной среды в машинах для воздушной сепарации; ликвидации крупномасштабных турбулентных структур; нового подхода к предварительной классификации на принципах удара, позволяющего разрушить конгломераты частиц, убедительно подтверждены экспериментальными исследованиями.

3. Создана новая машина для воздушной сепарации (Патент Украины №18198 В02С 23/10. Двостадійний класифікатор сипучих матеріалів).

4. Результаты экспериментальных исследований использованы в разработках технической документации при создании оборудования на ОАО «Красногоровский огнеупорный комбинат», ОАО «Часовоярский огнеупорный комбинат», ЗАО «Передвижная механизированная колонна № 116» и ОАО «Деконский комбинат стеновых материалов»

Список литературы

1. Ревнивцев В.А. Задачи межотраслевого научно-технического комплекса (МНТК) «Механобр» по созданию новой техники и технологии грохочения и классификации / В.А. Ревнивцев, П.И. Крупа, Л.А. Васберг // Исследование процессов машин и аппаратов разделения по крупности. – Л.: Механобр, 1988. – С. 5-12.

2. Смышляев Г.К. Воздушная классификация в технологии переработки полезных ископаемых / Г.К. Смышляев. – М., Недра, 1969. – 101 с.

3. Мизюнов В.Е. Аэродинамическая классификация порошков / В.Е. Мизюнов, С.Г. Ушаков – М.: Химия. – 1989. – 160 с.

4. Рыбалко Р.И. Теоретические основы создания сепараторов новой конструкции // Вестник ДонГАСА. Выпуск 2004-5 (47). – Макеевка, 2004. – С. 113-119.

5. Рыбалко Р.И. / Теоретические исследования рабочих процессов аэродинамической классификации в помольных агрегатах сухого измельчения / Рыбалко Р.И., Гуцин О.В., Кралин А.К. // Збірник наукових праць ДонІЗТ. № 39. – Донецьк, 2014. – С. 17-25.

6. Патент № 18198, Україна МПК В02С 23/10 (2006.01). Двостадійний класифікатор сипучих матеріалів / Рибалко Р.І., Баранов А.М. (Україна); заявник та патентовласник Рибалко Р.І. – № u200609779; заявл. 12.09.06; опубл. 16.10.06, Бюл. № 10.

7. Рыбалко Р.И. Влияние структуры воздушного потока на эффективность разделения в сепараторах помольных агрегатов // Науковий Вісник будівництва. Матеріали міжнародної конференції “Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд”. – Харків, ХДТУБА, ХОТВ АБУ, № 23, 2003. – С. 195-200.

8. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / Повх И.Л. – Л.: Машиностроение, 1974. – 479 с.

9. Баранов А.Н. Основы создания оборудования на базе учета влияния турбулентных структур многофазных потоков / Баранов А.Н., Емельянова И.А., Рыбалко Р.И., Постельняк С.В. // Материалы международной научно-технической конференции «Промышленная гидравлика и пневматика». – Киев, 2004. – С. 21-24.

10. Волошин А.И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А.И. Волошин, Б.В. Пономарев. – К.: Наук. думка, 2001. – 519 с.

Рыбалко Р.И., Гущин В.М. Експериментальні дослідження повітряної класифікації сипких матеріалів у помольних агрегатах сухого подрібнення в процесі будівництва автомобільних доріг

Анотація. Наведено основні результати експериментальних досліджень повітряної сепарації сипких матеріалів, що застосовуються в дорожньому будівництві, в новому дво-стадійному сепараторі на лабораторному стенді й дослідних промислових зразках. Проаналізовано розподілення поля швидкостей повітряного потоку при обтіканні плоского екрану-відбивача. Досліджено вплив швидкості двофазного потоку, конструктивних розмірів решітки гасіння великомасштабних вихрових структур й границі розділення на ефективність сепарації. Визначено основні аеродинамічні параметри розглянутої конструкції сепаратора, зроблено висновок про його працездатність.

Ключові слова: сухі сипкі матеріали, класифікація, сепаратор, повітряний потік

Rybalko R.I., Guschin V.M. Experimental researches of air classification of bulk materials in dry grinding aggregates in the construction of roads

Abstract. The main results of experimental researches of air separation of bulk materials used in road construction in the new two-stage separator on the lab bench and experimental industrial designs are presented. An analysis of the distribution of the velocity field of airflow in the flow of a flat screen reflector is submitted. The effect of two-phase flow rate, the size of the lattice design of large-scale extinction vortex structures and boundaries of separation of separation efficiency are explored. The main parameters of the aerodynamic design of the separator are determined. The conclusions of its operability are presented.

Keywords: dry bulk materials, air classification, separator, air flow.

Стаття надійшла до редакції 24.09.2014 р.