

УДК 621.928.6:691.223

РЫБАЛКО Р.И., к.т.н., доцент,
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КЛАССИФИКАЦИИ В ПОМОЛЬНЫХ АГРЕГАТАХ СУХОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ, КОТОРЫЕ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

В работе приведены результаты теоретических исследований рабочих процессов аэродинамической классификации. Получены расчётные выражения характеристик разделения продукта при использовании детерминированной и стохастической моделей процессов классификации, учитывающий совокупный эффект от случайных воздействий со стороны окружающей среды. Построены кривые разделения материала. В рамках модели одномерного потока разработаны рекомендации по рациональной, с точки зрения эффективности, организации процесса аэродинамической классификации.

Ключевые слова: классификация сыпучих материалов, кривые разделения, детерминированная и стохастическая модель

Постановка проблемы

В дорожной отрасли используется огромное количество сыпучих материалов. Многие из них подвергаются дроблению, измельчению и требуют классификации, но до сих пор не создано машины, которая бы обеспечивала получение материала заданной гранулометрии. Работа воздушных классификаторов отличается низкой эффективностью, значительной засоренностью фракций и высоким расходом энергии [1]. Существующие способы сепарации измельчаемого материала, как известно, обладают высокой энергоёмкостью, малыми сроками службы, недостаточной сепарирующей способностью, нарушением процесса сепарации при повышенной влажности, выдачей грубых продуктов с высоким содержанием малых фракций, сложностью конструкции и т.п. Вышеизложенное позволяет сделать вывод об актуальности проблемы разработки научной концепции совершенствования машин для сортировки сыпучих материалов с широким спектром их физико-механических свойств и, в первую очередь, гранулометрического состава. Одним из методов решения данной проблемы является создание нового типа машин с применением аэродинамической классификации в агрегатах сухого измельчения.

Анализ последних исследований и публикаций

Физическими основами аэродинамической классификации являются принципы разделения потоков, которые применяются при методах механического отделения взвешенного материала в камерах для улавливания пыли, циклонах, гидроциклонах и центрифугах [2,3].

Требование гомогенных условий разделения в воздушных классификаторах, в некоторой степени, выполняется только в спиральных, где процессы, происходящие в плоском спиральном потоке, контролируются и их можно описать [4,5]. Во всех прочих применяются пространственные системы потока, а часто и несколько массовых сил, действующих в различных направлениях, например силы тяжести и центробежной. В практике математического моделирования процессов воздушной сортировки широкое распространение получили так называемые детерминированные [6] и стохастические модели [7,8]. Детерминированные модели позволяют оценить влияние определяющих факторов на некоторые характеристики разделения (размер равновесной частицы, в ряде случаев граничный размер), но не позволяют получить расчётные выражения для кривых разделения. Построение кривых разделения возможно только на основе сто-

хастических моделей процессов классификации, учитывающих совокупный эффект от случайных воздействий со стороны окружающей среды на каждую частицу. Аналитические зависимости для расчета кривых разделения являются эффективным инструментом для математического моделирования и качественного анализа процессов классификации. Проблемным в их практическом использовании является вопрос об определении стохастических параметров, которые зависят от пульсаций воздуха [9,10].

Цель работы

Целью работы являются теоретические исследования описания характеристик разделения продукта аэродинамической классификации и на этой основе разработка сепаратора повышенной эффективности за счет регулирования однородности фракционного состава материала и размеров турбулентных вихрей в зоне разделения.

Основной раздел

При конструировании новых типов воздушных сепараторов или при усовершенствовании существующих точность разделения обеспечивается установкой решеток для разрушения крупномасштабных турбулентных структур. Присутствие в потоке частиц значительно превышающих размер равновесных частиц приводит к созданию турбулентного следа за ними во время движения в потоке, что в некоторых случаях резко снижает эффективность работы решеток.

Поэтому на первом этапе из двухфазного потока необходимо выделить частицы твердой фракции, диаметр которых превышает равновесные частицы более чем в 4-5 раз и отправить их на домол. Другими словами, необходимо создать двухступенчатый сепаратор, причем первая ступень сепаратора должна производить грубое разделение, а во второй ступени производится точное разделение продукта, где размер равновесной частицы соответствует заданному значению. Такое решение в несколько раз снижает циркуляционную нагрузку во второй ступени сепаратора и предотвращает появление в нем крупных вихрей турбулентного следа. Разработка первой ступени сепаратора основывается на принципиально новых решениях разделения, т.к. в ней необходимо полностью исключить осаждение мелкой фракции и подготовить материал к точному разделению во второй ступени. Во время движения крупных частиц в турбулентном потоке происходит налипание на них мелких частиц. Мелкие частицы часто объединяются в конгломераты и при традиционных методах разделения уходят в крупную фракцию. Для исключения этого, в первой ступени предлагается установить экран на пути двухфазного турбулентного потока, частично перекрывающий газопоток. Мелкие частицы, время релаксации которых невелико, будут огибать экран вместе с потоком воздуха и уходить во вторую ступень сепаратора на точное разделение. Крупные частицы и конгломераты будут ударяться об экран. В результате удара конгломератов об экран произойдет их разрушение, и мелкие частицы будут подхвачены потоком воздуха и доставлены во вторую ступень сепаратора. Крупные частицы после удара об экран отражаются от него и попадают в зону осаждения.

Схема первой ступени сепаратора представлена на рисунке 1. Первая ступень сепаратора, в некоторых случаях, может работать в качестве самостоятельной машины.

Первая ступень сепаратора включает загрузочное устройство 1, воздухопровод с входным каналом сепаратора 2, экран-отражатель 3, зону осаждения крупного продукта 4 и выходной канал 5. Зона осаждения крупного продукта соединена с бункером осажденного продукта, откуда материал направляется на домол.

Первая ступень сепаратора работает следующим образом. Исходный материал подается в загрузочное устройство 1, из которого поступает в воздухопровод с входным каналом сепаратора 2, где разгоняется воздушным потоком до необходимой скорости и подается в рабочую

зону сепаратора. Из рабочей зоны сепаратора мелкая фракция под действием потока воздуха поступает в выходной канал, а крупная фракция под действием сил инерции после удара попадает в зону осаждения крупного продукта, откуда – в бункер осажденного продукта.

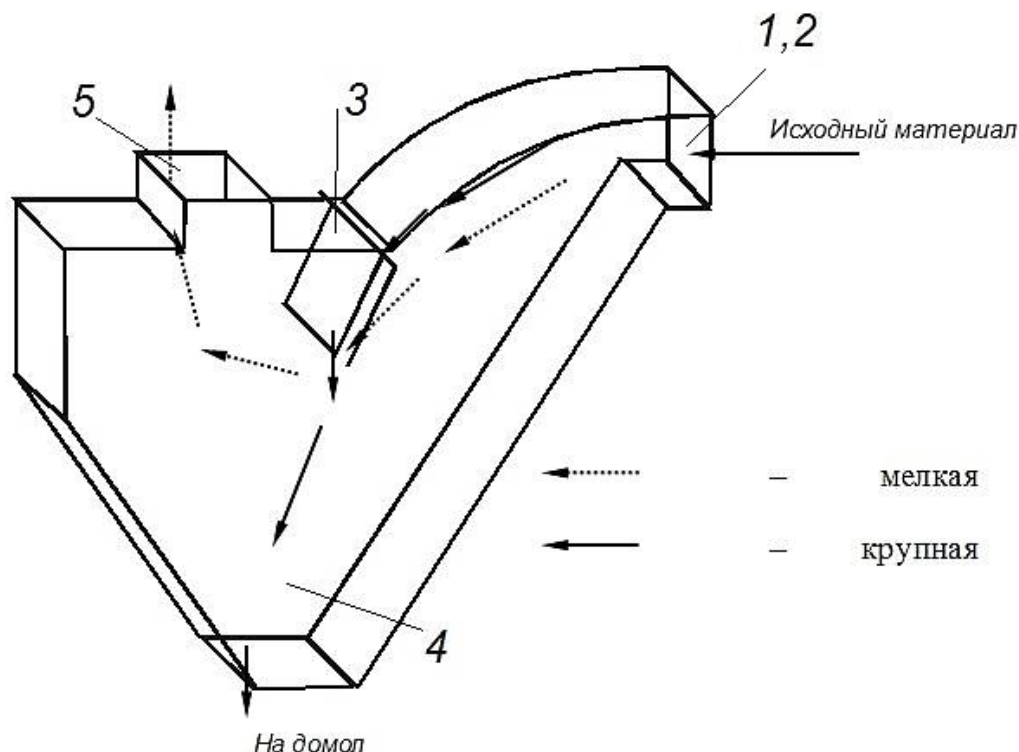


Рис. 1. Схема первой ступени сепаратора

Описание точности процесса разделения можно осуществить, используя детерминированную и стохастическую модели. Детерминированная модель при описании процесса разделения в однородном восходящем потоке имеет вид (ось x направлена вверх) [11]:

$$\begin{aligned} \dot{w} &= -g - \xi \cdot \frac{\pi \delta_q^2}{4m} \cdot \frac{\rho_g |\vec{v}(x) - \vec{w}|}{2} (\vec{w} - \vec{v}(x)); \\ \dot{x} &= \vec{w}; \quad v(x) = \frac{Q}{F(x)}; \quad Re_\delta = \frac{\delta |w - v(x)| \cdot \rho_g}{\mu}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{v} – скорость несущего газа;

\vec{w} – скорость частицы;

δ_q – диаметр частицы;

ρ_g – плотность газа;

ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы;

Q – расход газа через вертикальный газопровод;

g – ускорение силы тяжести;

$F(x)$ – закон изменения площади сечения газопровода.

Принимая во внимание, что для сферических частиц $m = \rho_q \pi \delta^3 / 6$ и используя одночленную аппроксимацию зависимости $\xi(Re_\delta)$ в виде $\xi = a(Re_\delta)^{-n}$, первое уравнение системы (1) преобразуется к виду:

$$\dot{w} = -g - \beta(\vec{w} - \vec{v}(x)),$$

$$\beta = \frac{3}{4} a \frac{\mu^n \rho^{1-n}}{\delta^{n+1} \rho_q} |w - v(x)|^{1-n} = \beta(w, x). \quad (2)$$

Дифференциальное уравнение (2.74) в общем случае нелинейно, так как величина β является функцией искомой скорости частицы и ее положения. Только в случае закона сопротивления Стокса коэффициент β становится постоянным.

Одна из важнейших характеристик процесса аэродинамической классификации – размер равновесной частицы, находящейся в относительном равновесии в рабочем пространстве классификатора под действием определяющих сил процесса, т.е. имеющей нулевую скорость вдоль его определяющей координаты. Полагая в уравнениях (2) $w=0$ для общего случая одночленной зависимости ξ , выражение для диаметра равновесной частицы примет вид:

$$\delta_p = \left[\frac{3}{4} a \frac{\mu^n \rho^{1-n}}{g \rho_q} |v(x)|^{2-n} \right]^{1/(1+n)}. \quad (3)$$

Размер равновесной частицы является условным показателем соотношения массовых и аэродинамических сил в данной точке потока. Устойчивое равновесие можно наблюдать только в том случае, если пульсационные составляющие газа для данного размера частиц практически не влияют на ее движение.

Наиболее общее расчетное выражение для кривой разделения, полученное для случая $D = \text{const}(x, \delta)$, имеет вид:

$$\varphi_\delta = \frac{I_1 - \frac{1}{s w_{f1}} \exp(-a(1))}{I_2 + \frac{1}{s} \left(\frac{1}{w_{f1}} \exp(-a(1)) + \frac{1}{w_{f2}} \right)}, \quad (4)$$

$$I_1 = \int_{x_2}^1 \left\{ \exp[-a(x)] \cdot \left[\int_{x_2}^x q_e(y) dy \right] \right\} dx, \quad I_2 = \int_{x_2}^1 \exp[-a(x)] dx,$$

$$a(x) = s \int_{x_2}^x w(x) dx, \quad s = v_1 x_1 / D,$$

где v_1 – характерная (расходная) скорость газа на внешней границе зоны разделения.

Параметр s является аналогом критерия Пекле в чисто диффузионных процессах и играет важную роль в теории классификации. При $D \rightarrow 0$, $s \rightarrow \infty$ уравнение 3 описывает движение среды из частиц с нерассеянными скоростями, а зависимость 4 дает кривую разделения идеальной классификации.

Построенные математические модели процессов классификации предназначены для увязки кривых разделения с конструктивными и режимными параметрами классификаторов. Кривые разделения для различных значений стохастического параметра s представлены на рисунке 2. Последовательность значений параметра s представлена геометрической прогрессией со знаменателем 2. Одновременно на рисунке 3 приведена зависимость критерия эффективности

$x_\phi = \delta_{0,25}/\delta_{0,75}$ от величины s . Семейство кривых разделения (рисунок 2), наглядно иллюстрирует деформацию этой важнейшей характеристики классификации с изменением параметра s . При $s=1-4$ кривые разделения соответствуют низкой эффективности процесса: величина x_ϕ не превышает при этом значения 0,45. В то же время, начиная со значения $s>8$, наблюдаются кривые разделения, соответствующие процессу высокой эффективности. Так, при $s=16$ величина x_ϕ составляет 0,83, т.е. процесс уже незначительно отличается от идеального.

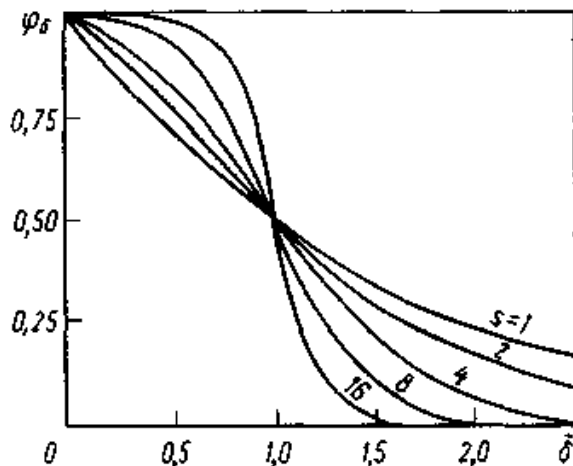


Рис. 2. Кривые разделения при различных значениях параметра s

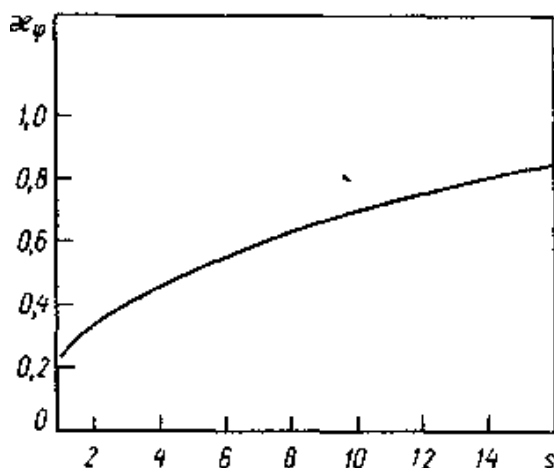


Рис.3. Зависимость параметра x_ϕ от s

Управление величиной s за счет регулирования турбулентных структур в сепараторе позволяет достичь высокой эффективности работы сепаратора.

Детерминированные модели позволяют оценить влияние определяющих факторов на некоторые характеристики разделения (размер равновесной частицы, в ряде случаев граничный размер), но не позволяют получить расчетные выражения для кривых разделения. Возможно построение кривых разделения на основе стохастических моделей процессов классификации, учитывающих совокупный эффект от случайных воздействий со стороны окружающей среды на каждую частицу. Базовым уравнением стохастических моделей является дифференциальное уравнение сохранения массы каждой фракции исходного продукта шириной $[\delta, \delta + d\delta]$, которое в стационарном случае имеет вид [12]:

$$\frac{d}{dx} \left(\rho w - D \frac{d\rho}{dx} \right) = q_e(x, \delta), \quad (5)$$

где $\rho = \rho(x, \delta)$ – линейная концентрация частиц фракции;
 w – скорость квазистационарного движения фракции;
 D – коэффициент макродиффузии частиц;
 $q_e(x, \delta)$ – плотность подвода частиц фракции от внешнего источника.

Считается, что процесс, описываемый уравнением 5, развивается в зоне разделения между сечениями x_1 и x_2 оси x , причем на границах зоны разделения выполняются граничные условия третьего рода:

$$\begin{aligned} \left(\rho w - D \frac{d\rho}{dx} \right)_{x=x_1} &= w_{f1} \rho(x_1), \\ \left(\rho w - D \frac{d\rho}{dx} \right)_{x=x_2} &= w_{f2} \rho(x_2), \end{aligned}$$

где w_{f1} и w_{f2} – характерные скорости переноса частиц фракции через границы зоны разделения.

Если поток фракции частиц исходного материала принять за единицу, т.е.:

$$\int_{x_n}^{x_k} q_e(x, \delta) dx = 1,$$

где x_n и x_k – координаты начала и конца интервала ввода частиц исходного материала, то поток частиц через одну из границ зоны разделения будет соответствовать одной точке кривой разделения $\varphi_\delta(\delta)$ для заданного размера фракции δ .

Существенное влияние на эффективность разделения имеет координата точки ввода исходных частиц – x_0 . Смещение координаты сечения ввода частиц от границы вывода грубого продукта к границе вывода тонкого приводит к увеличению граничного размера $\delta_{гр}$ более чем в 4 раза. Удаление сечения ввода от границы вывода тонкого продукта все более снижает вероятность для мелких частиц достичь «своей» границы, в то же время, повышает вероятность достижения границы вывода грубого продукта и быть там уловленными. Указанное воздействие могло бы использоваться как способ регулирования границы разделения, если бы изменение граничного размера не сопровождалось снижением эффективности процесса. Более резко падает эффективность при смещении сечения ввода в сторону границы вывода грубого продукта ($x_0 \rightarrow 1$). Однако, при этом достигается и уменьшение граничного размера разделения, что весьма важно при получении особо тонко измельченных материалов.

Локализация сечения ввода на относительно коротком участке зоны разделения возможна только при механической подаче исходного материала. Если исходный материал подается вместе с несущим газом, то неизбежно использование каналов относительно широкого сечения. В центробежных классификаторах этот канал чаще всего примыкает к периферии вихревой зоны, т. е. сечение ввода частиц расположено в интервале $(x_n, 1)$ зоны разделения.

Выполненный анализ позволяет сделать следующий вывод. Несмотря на то, что стохастический параметр s отнесен к классификатору в целом, он сохраняет физический смысл некоторой локальной характеристики процесса, так как, оставляет неизменным соотношение случайных и детерминированных воздействий. За счет конструкции машины и режима классификации можно существенно воздействовать на эффективность процесса разделения.

Описанные выше результаты базируются на одномерном представлении процессов равновесной классификации. В реальных классификаторах наблюдается существенная неоднородность потока по направлению перпендикулярному к определяющей координате процесса. Влияние неоднородности на эффективность разделения весьма значительно. Оценить роль миграций частиц нельзя без сведений о характере движения частиц различной крупности в неоднородном турбулентном потоке, т.е. полное решение задачи о движении газодисперсного потока с полидисперсными частицами.

Разработанные модели позволяют наметить ряд рекомендаций по рациональной (с точки зрения эффективности) организации процесса аэродинамической классификации. В рамках модели однородного потока они могут быть сформулированы следующим образом: подача исходного материала относительно узким потоком в сечение, достаточно удаленное от обеих границ улавливания продуктов классификации; размещение сечения ввода в месте, более удаленном от границы вывода целевого (тонкого или грубого) продукта, если качеству этого продукта отдается предпочтение; организация несущего потока осуществляется таким образом, чтобы частицы, близкие по размеру к граничной, имели устойчивые состояния относительного равновесия внутри зоны классификации; организация на границах зоны разделения благоприятных условий улавливания целевого для данной границы продукта и неблагоприятных для нецелевого (селективное поглощение); организация процесса классификации с прямо противоположным направлением альтернативных сил, определяющих разделение; увеличение плотности массовых сил при переходе к более тонким границам разделения.

На основании данных исследований разработан и экспериментально исследован новый двухстадийный сепаратор, защищенный патентом Украины [13].

Выводы

1. Разработаны стохастические и детерминированные математические модели разделения материалов в помольных агрегатах сухого измельчения.
2. На основании этих моделей построены кривые разделения продукта, которые использованы при разработке нового двухстадийного сепаратора.
3. Разработаны рекомендации по определению оптимальных параметров аэродинамических классификаторов нового типа.

Список литературы

1. Борщевский А.А. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий / А.А. Борщевский, А.С. Ильин // М.: Машиностроение, 1987. – 368 с..
2. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович // М.: Наука, 1984. – 717 с.
3. Галиакберов Р. Совершенствование пневмотранспорта сыпучих материалов на предприятиях строительной индустрии / Р. Галиакберов, В. Герасимова, А. Тюменев // М.: ЦБНТИ Минпромстроя СССР, 1977. – 63с.
4. Бучко И.Г. Перегрузочные установки для сыпучих материалов / Бучко И.Г., Окрепкий М.С., Сафаров В.А. // Механизация и автоматизация производства. 1986. №5. - С.10-12.
5. Бэйли П. Влияние интенсивности и частоты турбулентных пульсаций основного потока на теплообмен в турбинной решетке лопаток, – Тр. Америк. о-ва инженеров-механиков. / Бэйли П., Придди В. // Энерг. машины и установки, 1981, 103, № 1.
6. Гиневский А.С. Методы расчета турбулентного пограничного слоя / Гиневский А.С., Иоселевич В.А., Колесников А.В., Лапин Ю.В., Пилипенко В.Н., Секундов А.Н. // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Сер. Механика жидкости и газа. 1978, 11, с. 155-304.
7. Гиневский А.С. Вырождение турбулентности потока за двухрядной решеткой цилиндров при противоположном движении рядов / А.С. Гиневский, А.В. Колесников, Л.Н. Уханова // Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газов, 1979, № 3. – С. 17-25.

8. Исследование влияния концентрации и крупности примеси на характеристики турбулентной газовой струи с твердыми частицами / Гиршович Т.А., Картушинский А.И., Лаатс М.К., Леонов В.А., Мульги А.С. // Исследование рабочего процесса в элементах двигателей и энергетических устройств с двухфазным рабочим телом. – М.: Труды МАИ. – 1980. – № 506. – С. 3-8.

9. Вулис Л.А. Об эффективном управлении распространением свободной турбулентной струи. – Изв. АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа, 1986, № 6, С. 173-178.

10. Глушко Г.С. Дифференциальное уравнение для масштаба турбулентности и расчет турбулентного приграничного слоя на плоской пластине. – В кн. Турбулентные течения. М.: Наука, 1970, С. 37-44.

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

12. Иевлев В.М. Турбулентное движение высокотемпературных сплошных сред. / Иевлев В.М. // М.: Наука, 1975. – 256с.

13. 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.

Рибалко Р.І. Вплив конструктивних та режимних факторів на ефективність класифікації в помольних агрегатах сухого подрібнення, що використовуються для будівництва автомобільних доріг

***Анотація.** В роботі наведено результати теоретичних досліджень робочих процесів аеродинамічної класифікації. Отримано розрахункові вирази характеристик розділення продукту при використанні детермінованої та стохастичної моделей процесів класифікації, що враховують сукупний ефект від випадкових впливів з боку навколишнього середовища. Побудовано криві розділення матеріалу. В рамках моделі одномірного потоку розроблено рекомендації з раціональної, з точки зору ефективності, організації процесу аеродинамічної класифікації.*

***Ключові слова:** класифікація сипких матеріалів, криві розділення, детермінована і стохастична модель*

Rybalko R.I. Influence of constructive and regime factors on classification efficiency in the grinding of dry grinding aggregates for construction of highways

***Abstract.** The results of theoretical researches of workings processes of aerodynamic classification are in-process resulted. Calculation expressions of descriptions of division of product are got at the use of the determined and stochastic models of processes of classification, taking into account the combined effect from casual influences from the side of environment. The crooked divisions of material are built. Within the framework of model of unidimensional stream recommendations are developed on rational, from point of efficiency, organization of process of aerodynamic classification.*

***Keywords:** classification of friable materials, crooked divisions, determined and stochastic model*

Стаття надійшла до редакції 27.09.2015 р.