

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

ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В ДВУХСТАДИЙНОМ СЕПАРАТОРЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МАШИНАМ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Рассмотрены процессы, протекающие в первой ступени воздушного сепаратора, с позиций турбулентных структур двухфазной среды. Дана оценка величины пульсационной составляющей скорости частицы в газоматериальном потоке через характеристики струи воздуха. Показано, что поперечная составляющая скорости движения частицы, определяет геометрические размеры рабочих каналов. Доказано, что, регламентируя поперечную составляющую скорости движения частицы, можно управлять параметрами турбулентных структур воздушного потока. В качестве технического решения по управлению воздушными турбулентными структурами использована решетка разделения.

Ключевые слова: сыпучие материалы, классификация, сепаратор, воздушный поток, турбулентная струя, характеристики турбулентной струи

Постановка проблемы

При строительстве автомобильных дорог используется огромное количество различных насыпных материалов, которые подвергаются операции измельчения и сепарации. О серьезности этой проблемы можно судить по объемам материальных средств, затрачиваемых на рассматриваемые операции. Так, в дорожной отрасли на это используется около 20 % всей электроэнергии, причем основная ее часть расходуется в виде тепла. В настоящее время сортировка осуществляется устройствами и машинами разной конструкции, применяемыми при помоле в замкнутом цикле и объединении помола с сушкой. На сегодняшний день не создано машины, обеспечивающей дробление материала с заданными размерами. Это приводит к образованию переизмельченного продукта, что не позволяет достичь заданной тонкости помола. А одним из эффективных способов повышения тонкости помола и, соответственно, снижения энергозатрат, является своевременное удаление готового продукта из помольного агрегата [1].

Анализ последних исследований и публикаций

Существующие способы сепарации измельчаемого материала, как известно, обладают высокой энергоемкостью, 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. Проведенный анализ показал, что существующие машины разработаны с позиций взаимодействия однородного потока воздуха и отдельной частицы без учета пульсационных составляющих скорости воздуха и масштабов вихревых структур в потоках транспортирующей среды; не учитываются самоконгломерация мелкой фракции и влияние турбулентных следов движения крупных частиц [2,3]. Решением эффективной классификации является обеспечение для заданного диаметра равновесных частиц необходимых параметров однородности турбулентного потока. Большой вклад в развитие теоретических подходов к воздушной классификации внесли 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. Таким образом, можно сделать вывод о том, что существ-

вующие машины для воздушной сортировки не в полной мере отвечают требованиям, определяющим эффективность работы оборудования.

Создание оборудования, отвечающего современным требованиям, возможно за счет принципиально новых технических решений на базе использования аэродинамической классификации. Поэтому разработка новых типов машин для воздушной сепарации на основе использования турбулентных потоков и разрушения крупных вихрей является актуальной задачей применительно к получению и подготовке материалов для дорожной отрасли.

Цель работы

Целью данной работы является анализ динамики двухфазных турбулентных структур, образующихся при аэродинамической классификации, применительно к разработанной новой конструкции двухстадийного классификатора пневмораспределения полидисперсных смесей и для определения его оптимальных технических параметров.

Основной раздел

При математическом описании турбулентного движения мгновенная скорость потока в рассматриваемой точке для каждой из трех ее составляющих – продольной (ось x), поперечной (ось y) и тангенциальной (ось z) – представляется в виде суммы усредненной скорости (u, v, w) и скорости пульсаций (u', v', w'):

$$u_t = u + u', \quad v_t = v + v', \quad w_t = w + w'.$$

При прямолинейном течении вдоль оси x $u_t = u + u', v_t = v', w_t = w'$. Для давления, не зависящего от направления,

$$p_t = p + p'.$$

Подстановка этих выражений в дифференциальные уравнения движения (уравнения Навье-Стокса) и усреднение по времени и пространству приводят к дифференциальным уравнениям осредненного движения, называемым уравнениями Рейнольдса. Эти уравнения отличаются от уравнений Навье-Стокса наличием добавочных («рейнольдсовых») касательных напряжений, определяемых при поступательном движении газа вдоль оси x выражениями:

$$\tau_{xx} = -\overline{\rho_2 u'^2}, \quad \tau_{xy} = -\overline{\rho_2 u'v'}, \quad \tau_{xz} = -\overline{\rho_2 u'w'},$$

где ρ_2 – плотность газа.

Система уравнений Рейнольдса является незамкнутой, поскольку число неизвестных величин в ней превышает число уравнений. Для компенсации недостающих связей используются аналогия между турбулентными и молекулярными напряжениями и экспериментальные данные о статистических связях между пульсациями в пространстве и времени.

Порядок величины скорости турбулентных пульсаций характеризует так называемая динамическая скорость (скорость трения), представляющая собой усредненное значение продольной и поперечной составляющих скорости пульсаций. Количественной мерой степени статистической связи между пульсациями скоростей в пространстве является коэффициент пространственной корреляции, определяемый для параллельного течения вдоль оси x соотношением [4]:

$$R(x_{12}) = \frac{\overline{u'_1 u'_2}}{\sqrt{(u'^2_2) \cdot (u'^2_1)}},$$

где u'_1 и u'_2 – пульсационные скорости, измеренные одновременно в точках 1 и 2, разделенных расстоянием x_{12} .

Основными параметрами, характеризующими турбулентное течение, помимо числа Рейнольдса и динамической скорости, являются интенсивность или степень турбулентности, масштаб турбулентности и частота турбулентных пульсаций, их распределение и характерные значения.

Масштаб турбулентности характеризует средний размер пульсационных объемов (вихрей), обладающих одинаковой скоростью и ведущих себя некоторое время как одно целое [5].

$$l = \int_0^{\infty} R(y) dy.$$

Поперечное расстояние, на котором данный пульсационный объем теряет целостность, получило название пути перемешивания (или смешения). Оно лежит в основе так называемой полуэмпирической теории турбулентности.

В пристеночной области потока длина пути перемешивания принимается прямо пропорциональной расстоянию до граничной поверхности:

$$l_m = ky,$$

где k – коэффициент Кармана.

В статистической теории турбулентности вместо указанного выше эйлера коэффициент корреляции $R(y)$ используется лагранжев коэффициент корреляции:

$$R_L(\theta) = u'(t) \cdot u'(t + \theta) / u'^2(t),$$

характеризующий степень связанности между пульсационными скоростями движущейся частицы среды в смежные моменты времени t и $t + \theta$.

Частота пульсаций характеризует число изменений амплитудных значений пульсационной скорости в секунду. Численное значение ее зависит от масштаба вихря, и поскольку в турбулентном потоке присутствуют вихри всех масштабов, существует не одна, а целый спектр частот пульсаций. Учитывая связь частоты пульсаций с масштабом вихрей и, следовательно, с амплитудой скорости пульсаций и их кинетической энергией, в теории турбулентности часто используется более общая характеристика, а именно частотно-энергетический или кратко частотный спектр пульсаций, показывающий распределение пульсационной энергии по частотам, тем самым и по масштабам турбулентных вихрей [3,4].

Создание машины для эффективного разделения полидисперсного материала управлением характеристиками несущего потока осуществляется на основе законов движения турбулентных структур в несущем потоке газа и изменения его масштабов. Разрушение крупномасштабных структур позволит обеспечить однородность поля скоростей и эффективную работу сепараторов. Турбулентное течение характеризуется осредненной составляющей и пульсационной, которая не является полностью «случайной» величиной, поскольку, несмотря на то, что рождение вихря, обусловленное неустойчивостью в некоторой точке поля течения, «случайно», его пос-

ледующая эволюция описывается уравнениями Навье-Стокса. Предсказуемость турбулентных течений ограничивается относительно короткими промежутками времени и не зависит от того, насколько точно известны начальные условия.

На поперечное движение частицы (по оси y) оказывает влияние пульсационная (турбулентная) составляющая скорости воздуха. При анализе турбулентных течений воздуха, несущего частицу, рассматривается задача о диффузии воздуха. На входе в классификатор распределение скоростей воздуха по поперечному сечению характеризуется однородной стационарной турбулентностью. В начале координат (на оси потока) рассматриваются элементарные объемы воздуха. В этом случае интересны не траектории отдельных объемов воздуха, а некоторые средние характеристики.

Лагранжева координата элементарного объема воздуха в момент времени t (рассматривается движение только вдоль оси y) определяется формулой [6]:

$$y(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau,$$

где $v(\tau)$ – пульсационная составляющая скорости по оси y .

Осредняя это выражение по многим реализациям (т.е. по большой последовательности элементарных объемов воздуха), можно показать, что среднее значение y равно нулю. Другими словами, центр тяжести облака отдельных элементарных объемов воздуха в статистическом смысле не удаляется от начала координат (от оси потока). При умножении последнего равенства на $v(t)$ и осреднения получено:

$$\frac{d}{dt} \left(\overline{\frac{1}{2} y^2(t)} \right) = \int_0^t \overline{y(t)v(\tau)} d\tau.$$

Обе части данного уравнения имеют размерность коэффициента диффузии ($\text{м}^2/\text{с}$), т.е. рассматриваемое уравнение определяет коэффициент турбулентной диффузии.

При стационарной турбулентности пульсационная составляющая скорости элементарного объема воздуха является стационарной функцией времени. Такую функцию можно исследовать с помощью преобразований Фурье. Свойства корреляционной функции $R_L(\tau)$ таковы, что при использовании обычного косинус-преобразования [5] получена спектральная плотность мощности:

$$E(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \cos \omega \tau R_L(\tau) d\tau.$$

При $\tau = 0$ справедливо:

$$R_L(0) = \overline{v^2} = \int_0^{\infty} E(\omega) d\omega.$$

Функцию $E(\omega)$ называют спектральной плотностью мощности, энергетическим спектром или просто спектром. Величина $E(\omega)d\omega$ определяет вклад в величину $\overline{v^2}$ пульсационных составляющих с частотами в интервале $d\omega$ около частоты ω .

При $\omega=0$ формула спектральной плотности мощности имеет вид:

$$E(0) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R_L(\tau) d\tau = \frac{2}{\pi} \overline{v^2 T_L}.$$

Значение спектральной функции при $\omega=0$ определяет (с точностью до численного множителя) коэффициент турбулентной диффузии, который появляется при описании диффузии на больших интервалах времени.

В случае двухфазной струи движение частиц транспортируемого материала зависит от законов движения транспортирующей среды, в случае пневмокласификации – от законов движения воздуха. Скорость $w(t)$ частицы описывается дифференциальным уравнением:

$$\Lambda \frac{dw}{dt} + w(t) = v(t),$$

где Λ – постоянная времени, характеризующая инерцию частицы, $v(t)$ – скорость воздуха на траектории частицы [6].

Если $w(t)$ и $v(t)$ – стационарные случайные функции, то можно составить уравнение, связывающее их корреляционные функции. Вводя для ускорения частицы dw/dt обозначение $a(t)$, из последнего уравнения, получаем:

$$\begin{aligned} \Lambda^2 \overline{a(t)a(t+\tau)} + \overline{w(t)w(t+\tau)} &= \overline{v(t)v(t+\tau)}, \\ \overline{a(t)a(t+\tau)} &= -\frac{d^2 R_w}{d\tau^2} = -\overline{w^2} \frac{d^2 \rho_w}{d\tau^2}, \\ \overline{w(t)w(t+\tau)} &= R_w(\tau) = \overline{w^2} \rho_w(\tau), \\ \overline{v(t)v(t+\tau)} &= R_v(\tau) = \overline{v^2} \rho_v(\tau). \end{aligned}$$

Подстановка корреляционных функций приводит к уравнению:

$$-\Lambda^2 \frac{d^2 R_w}{d\tau^2} + R_w(\tau) = R_v(\tau).$$

Применяя к нему преобразование Фурье, получим:

$$(\Lambda^2 \omega^2 + 1) E_w(\omega) = E_v(\omega).$$

При интегрировании данного уравнения в пределах от $\tau = 0$ до бесконечности первый член пропадает, так как $dR_w/d\tau = 0$ при $\tau = 0$ и $\tau \rightarrow \infty$. Следовательно:

$$\int_0^{\infty} R_w(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} R_v(\tau) d\tau, \quad \overline{w^2} T_w = \overline{v^2} T_v, \quad E_w(0) = E_v(0).$$

Отсюда следует, что коэффициенты диффузии равны и не зависят от постоянной времени Λ рассматриваемых частиц.

Интегрирование этого же уравнения, при $\tau = 0$, приводит к соотношению:

$$\left(2\Lambda^2/\lambda_w^2 + 1\right)\overline{w^2} = \overline{v^2},$$

где микромасштаб частиц λ_w^2 определен формулой:

$$2\frac{\overline{w^2}}{\lambda_w^2} = \int_0^\infty \omega^2 E_w(\omega) d\omega.$$

Следовательно, микромасштаб связан со среднеквадратическим значением пульсаций ускорения, с кривизной корреляционной кривой при $\tau=0$ и со вторым моментом спектральной плотности. Если при высоких частотах функция $E_w(\omega)$ убывает пропорционально ω^{-3} или более медленно, то интеграл не сходится, так что $\lambda_w=0$.

Средний квадрат скорости частицы определяется

$$\overline{w^2} = \int_0^\infty E_w(\omega) d\omega = \int_0^\infty \frac{E_v(\omega) d\omega}{1 + \omega^2 \Lambda^2}.$$

Учитывая, что корреляционная функция R_v аппроксимируется выражением $R_v(\tau) = \overline{v^2} e^{-\tau/T_v}$, в результате преобразования Фурье получаем:

$$E_v(\omega) = \frac{2}{\pi} \frac{\overline{v^2} T_v}{1 + \omega^2 T_v^2}.$$

Аналогично преобразование Фурье для функции $(1 + \omega^2 \Lambda^2)^{-1}$ имеет вид $(\pi/\Lambda) e^{-\tau/\Lambda}$. Применение равенства Парсеваля дает:

$$\overline{w^2} = \int_0^\infty \frac{E_v(\omega) d\omega}{1 + \omega^2 \Lambda^2} = \frac{2}{\pi} \frac{\overline{v^2}}{\Lambda} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{\tau}{T_v} - \frac{\tau}{\Lambda}\right) d\tau = \frac{\overline{v^2} T_v}{\Lambda + T_v}.$$

Последнее уравнение позволяет оценить средний квадрат поперечной (а, соответственно, и пульсационной) составляющей скорости частицы в потоке через характеристики струи воздуха и величину Λ , зависящую от скорости витания частицы, т.е. от ее размеров и плотности. Поперечная составляющая скорости частицы регламентирует длину и поперечное сечение газопроводов, т.к. если частица достигает стенки машины, то, независимо от ее размеров, она не подвергается аэродинамической классификации.

Одним из эффективных решений по управлению размерами турбулентных структур является установка решеток на пути их следования. При этом, форма решетки, с одной стороны, не должна вызывать значительного увеличения гидравлического сопротивления потоку, с другой стороны, энергия вихрей не должна превышать допустимых величин, зависящих от размеров частиц в готовом продукте [7,8]. Поэтому в зависимости от характеристик классификации материала необходимо установить допустимые максимальные размеры вихрей, определить их энергию и сместить энергетический спектр в область регламентируемых значений.

Выводы

1. Анализ процессов, протекающих в двухстадийном воздушном сепараторе с позиций турбулентных структур двухфазной среды, позволяет оценить величину пульсационной составляющей

ющей скорости частицы в потоке через характеристики струи воздуха. Поперечная составляющая скорости движения частицы определяет длину и поперечное сечение рабочих каналов. Регламентируя ее, можно управлять размерами турбулентных структур несущего воздушного потока.

2. Одним из технических решений по управлению размерами воздушных турбулентных структур является установка решеток на пути их следования, что и положено в основу патента Украины [9] на внедренную конструкцию двухстадийного классификатора для пневморазделения полидисперсных смесей.

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. Галиакберов Р. Совершенствование пневмотранспорта сыпучих материалов на предприятиях строительной индустрии / Р. Галиакберов, В. Герасимова, А. Тюменев – М.: ЦБНТИ Минпромстроя СССР, 1977. – 63 с.
3. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович – М.: Наука, 1984. – 717 с.
4. Мейер Х.У. Влияние турбулентных характеристик течения в аэродинамической трубе на развитие пограничного слоя / Х.У. Мейер, Х.П. Креплин // Ракетная техника и космонавтика, 1980, 18, № 3. – С. 11-17.
5. Монин А.С. Статистическая гидродинамика / А.С. Монин, С.Г. Ушаков – М.: Наука. – 1967. ч.2. – 720 с.
6. Лебига В.А. Вопросы измерения характеристик турбулентности сжимаемых течений / В.А. Лебига // В кн.: Методы и техника аэрофизических исследований – Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1978. – С. 44-56.
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. Рыбалко Р.И. / Теоретические исследования рабочих процессов аэродинамической классификации в помольных агрегатах сухого измельчения / Р.И. Рыбалко, О.В. Гуцин, А.К. Кралин // Збірник наукових праць ДонІЗТ № 39. – Донецьк. 2014. – С. 17-25.
9. Патент № 18198, Україна МПК В02С 23/10 (2006.01). Двостадійний класифікатор сипучих матеріалів / Рибалко Р.І., Баранов А.М. (Україна); заявник та патентовласник Р.І. Рибалко. – № u200609779; заявл. 12.09.06; опубл. 16.10.06, Бюл. № 10.

Рибалко Р.І. Дослідження аеродинамічної класифікації сипких матеріалів в дво-стадійному сепараторі стосовно машин для будівництва автомобільних доріг

***Анотація.** Розглянуто процеси, що протікають у першому ступені повітряного сепаратора, з позицій турбулентних структур двофазного середовища. Надано оцінку величини пульсаційної складової швидкості частки в газоматеріальному потоці через характеристики струменю повітря. Показано, що поперечна складова швидкості руху частки, визначає геометричні розміри робочих каналів. Доведено, що регламентуючи поперечну складову швидкості руху, можна керувати параметрами турбулентних структур повітряного потоку. В якості технічного рішення з керування повітряними турбулентними структурами використано решітку розділення.*

***Ключові слова:** сипкі матеріали, класифікація, сепаратор, повітряний потік, турбулентний струмінь, характеристики повітряного струменю.*

Rybalko R.I. The research of aerodynamic classification of bulk materials in a two-stage separator due to machines for automobile road construction

***Abstract.** The processes occurring in the first stage of the air separator are considered from the point of turbulent structures of the two-phase environment. The estimation of the value of the fluctuating component of the particle velocity in the flow of gas and material mixture through the air jet is presented. It is shown that the transverse component of the velocity of the particle motion determines the geometric dimensions of operating channels. It is proved that one can control the parameters of turbulent airflow structure by the regulation of transverse component of the velocity of the particle motion. The separation grating is used as technical solution for management of air turbulence structures.*

Keywords: bulk materials, classification, separator, air flow, turbulent jet, the characteristics of a turbulent jet

Стаття надійшла до редакції 07.06.2015 р.