

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛА КОМПОНЕНТОВ СМЕСИ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ АППАРАТЕ

А. Е. Лебедев¹, А. А. Вагагин¹, Д. В. Лебедев², И. С. Гуданов¹

*Кафедры: «Технологические машины и оборудование» (1), lae4444@mail.ru;
«Автомобильный транспорт» (2),
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
г. Ярославль, Россия*

Ключевые слова: дисперсный поток; коэффициент неоднородности; сегрегация компонентов; смешение; угол рассеивания; функция распределения.

Аннотация: Рассмотрен метод снижения влияния сегрегации на смешение компонентов путем подготовки компонентов посредством измельчения частиц. Представлена конструкция нового смесительного устройства и математическая модель процесса формирования дисперсного потока частиц при смешении, позволяющая оценить его структуру, что необходимо при проектировании новых смесителей, работающих на принципе взаимодействия струйных потоков.

Одним из способов снижения негативного влияния сегрегации на однородность смеси сыпучих сред является выравнивание размеров частиц компонентов перед смешением путем предварительного измельчения частиц одного из материалов (имеющего больший размер частиц) до определенного размера, при котором интенсивность сегрегации, вызванной различием в размерах частиц уменьшается, а сам процесс смешения ускоряется [1]. Данный способ может быть использован практически во многих технологических процессах, где допускается проведение предварительного измельчения, то есть разрушение частиц.

Для реализации предложенного способа разработан центробежный смесительный аппарат [2], в котором совмещены ступени смешения и предварительного измельчения одного из компонентов (рис. 1).

При работе устройства один из компонентов, частицы которого имеют больший размер, поступает внутрь корпуса 3 через устройство загрузки 1 на вращающийся ротор 4, захватывается лопастями измельчителя 5 с самофутеровочными карманами 6, разгоняется, распыляется, а сформированный поток ударяется об отбойные элементы 17, где они измельчаются до требуемого размера (близкого к размеру частиц второго компонента). Ротор измельчителя вращается от привода 9. Размер получаемых частиц регулируется скоростью удара об отбойные элементы. Частицы измельченного материала уносятся восходящим потоком, создаваемым воздушным классификатором 7, в верхнюю часть корпуса, откуда попадают через воронку 19 на нижнюю поверхность вращающегося дискового распылителя 11, насаженного на вал 10, где захватываются лопастями 12 и распыляются. Одновременно с этим на верхнюю поверхность вращающегося дискового распылителя 11 подается второй компонент через патрубок 15, захватывается лопастями 13 и распыляется. Вращение дискового распылителя 11 происходит от привода 14.

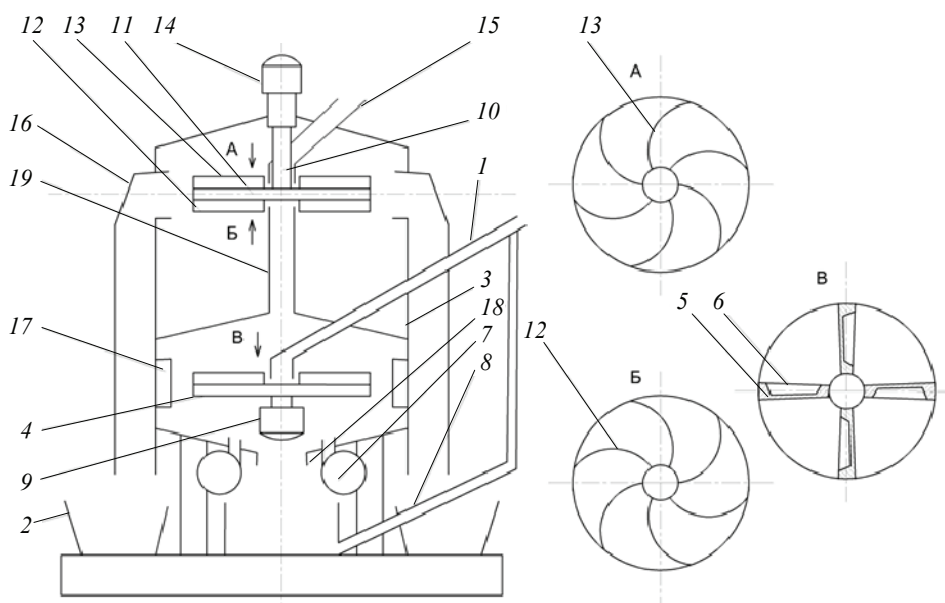


Рис. 1. Схема центробежного смесительного аппарата

Дисперсные потоки частиц обоих компонентов пересекаются, при этом подбираются такие условия, при которых происходит равномерное распределение частиц одного компонента в другом, то есть происходит формирование смеси. Приготовленная таким образом смесь попадает в цилиндрическую рубашку для выгрузки смеси 16, далее движется по ней в емкость для выгрузки готовой смеси 2. В целях предотвращения разделения смеси при движении по цилиндрической рубашке 16 в ее внутреннем объеме могут быть расположены делители потока.

Частицы первого компонента, размер которых больше требуемого через патрубков выгрузки не измельченного материала 18, попадают в устройство для возврата 8, а из него в устройство загрузки 1. Устройство возврата неизмельченного материала представляет собой транспортную систему шнекового или ленточного типа.

Таким образом, в данном аппарате за счет предварительного измельчения частиц одного из компонентов удается осуществить смешение склонных к сегрегации материалов за счет, практически, полного исключения сегрегации по размерам.

С целью расчета основных конструктивных и режимных параметров процесса смешения и выявления рациональных режимов работы устройства разработано математическое описание основной фазы процесса смешения – формирования дисперсного потока при центробежном распыливании частиц. Структуры получаемых потоков и их взаимное расположение будут оказывать наибольшее влияние на однородность формируемой смеси в данной конструкции смесителя.

Ввиду огромного числа факторов, влияющих на процесс образования потока, применение детерминированных методов затруднительно, поэтому в основу описания положен стохастический подход [3], позволяющий описать наиболее вероятную структуру потока.

Согласно исследованиям [1, 3] фазовый объем $d\Gamma$ целесообразно представить в виде произведения

$$d\Gamma = dvdD, \quad (1)$$

что соответствует механизму формирования потока. Здесь где v – случайная скорость частицы; D – случайное значение диаметра частицы.

Принимая во внимание расширяющуюся форму создаваемого потока, данное выражение запишем в виде

$$d\Gamma = dv_x dv_y dD = v_x \cos^{-2} \varphi dv_x d\varphi dD, \quad (2)$$

где v_x, v_y – проекции случайной скорости на горизонтальную и вертикальную оси соответственно; φ – угол рассеивания (угол между вектором скорости и горизонтальной осью).

Распределение числа частиц в $d\Gamma$ согласно стохастическому подходу будет иметь вид

$$dN = A \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right) d\Gamma. \quad (3)$$

где A – нормировочная постоянная; E_0 – энергетическая константа; E – стохастическая энергия частицы.

Стохастическую энергию частицы E при моделировании удобно представить в виде только одной составляющей – поперечного движения частиц в потоке, которая оказывает результирующее влияние на распределение частиц в сечении потока

$$E = m(v_x \operatorname{tg} \varphi)^2 / 2. \quad (4)$$

где m – масса частицы.

Для перехода к безразмерным величинам введем обозначения:

$$w = \frac{v_x}{v_0}, \quad D = \frac{D}{D_0}, \quad \Phi = \frac{\varphi}{\varphi_0}. \quad (5)$$

Тогда дифференциальную функцию распределения числа твердых частиц движущегося потока по углам рассеивания представим выражением

$$f(\Phi) = \frac{1}{N} 0,75 p_1 (q_1 - 2q_2). \quad (6)$$

Величины q_1, q_2 , входящие в (6), определяются из выражений:

$$q_1 = A \left(p_2 \left[\exp\{p_3 w_{\min}^2\} - \exp\{p_3 w_{\max}^2\} \right] + 12 E_0 \left[\exp\{p_3 w_{\min}^2\} - \exp\{p_3 w_{\max}^2\} \right] \right) p_4; \quad (7)$$

$$q_2 = A_1 \left(p_2 \left[\exp\{p_3 w_{\max}^2\} - \exp\{p_3 w_{\min}^2\} \right] + 16 E_0 \left[\exp\{p_3 w_{\max}^2\} - \exp\{p_3 w_{\min}^2\} \right] \right) p_5;$$

величины $p_1 - p_4$ по формулам:

$$\begin{aligned} p_1 &= (v_0 \pi \rho \cos^2 \varphi_0 \Phi D_0^3 \operatorname{tg}^2 \varphi_0 \Phi)^{-1}; \\ p_2 &= D_0^3 \pi \rho v_0^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_0 \Phi; \\ p_3 &= -\frac{1}{12} v_0^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_0 \Phi \pi \rho D_0^3 E_0^{-1}; \\ p_4 &= D_{\max}^2 - D_{\min}^2; \\ p_5 &= D_{\max} - D_{\min}. \end{aligned} \quad (8)$$

Сравнение опытных и расчетных данных

Частота вращения, мин ⁻¹	Объемное соотношение	Значение коэффициента неоднородности смеси V_c , %	
		опытное	расчетное
800	1:1	6,3	6,52
900		4,6	4,64
800	1:2	3,9	4,22
900		2,8	2,61

Составив для каждого компонента смеси выражения, описывающие структуру потока в поперечном сечении, и приравнивая параметры распределений, можно подобрать такие режимные и конструктивные параметры распыливающего узла, которые обеспечат наиболее полное наложение распределений, что необходимо для получения однородной смеси в смесителях, работающих по данному принципу.

Выражения (6) – (8) позволяют описать распределение частиц в потоках и вычислить с использованием методик, представленных в [4, 5], значения коэффициента неоднородности смеси.

Для проверки адекватности полученных зависимостей проведен цикл опытных исследований, в которых в качестве модельных материалов использовались гречневая крупа (первый смешиваемый компонент, частицы которого крупнее) и манная.

В первой части опытов проводилось смешение без предварительного измельчения гречневой крупы. В опытах частота вращения ротора смесительного устройства изменялась в пределах 300...1000 мин⁻¹, объемное соотношение гречневой крупы к манной изменялось от 1:5 до 1:1. Значения коэффициента неоднородности смеси во всех опытах находились в пределах 23 – 36 %. Такие высокие значения объясняются интенсивной сегрегацией материалов, как в процессе смешения, так и при выгрузке.

Во второй части опытов частицы гречневой крупы измельчались до размеров, близких к размерам частиц манной крупы. Параметры процесса измельчения, следующие: частота вращения ротора 1500 мин⁻¹, диаметр ротора 150 мм, расстояние от края ротора до отбойных элементов – 100 мм.

Далее осуществлялось их смешение с манной крупой при частотах вращения ротора смесительного устройства 300...1000 мин⁻¹ и объемных соотношениях смешиваемых материалов от 1:5 до 5:1. Минимальное значение коэффициента неоднородности смеси 2,8 % получено при частоте вращения 900 мин⁻¹ и объемном соотношении модельных компонентов 1:2.

Фрагмент сравнения результатов опытов по смешению вышепредставленных модельных материалов с расчетными значениями, полученными с использованием выражений (6) – (8) и методики нахождения коэффициента неоднородности смеси при взаимодействии дисперсных потоков [4, 5], представлен в табл. 1.

Анализируя результаты сравнения можно сделать вывод о том, что в диапазоне изменения частоты вращения смесительного устройства 500...1200 мин⁻¹ и объемных соотношениях от 1:5 до 5:1 полученные зависимости адекватно описывают опытные данные и могут быть использованы при создании инженерной методики расчета проектировании смесителей данного типа.

Список литературы

1. Аппараты для переработки дисперсных сред. Теория и расчет / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. Б. Капранова [и др.]. – Ярославль : Издат. дом Ярославского гос. техн. ун-та, 2017. – 175 с.

2. Пат. 2622667 Российская Федерация, МПК В02С 7/00, В02С 13/00, В01F 7/00. Устройство для смешения и измельчения дисперсных материалов / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, С. Суид, В. В. Власов, А. А. Ватагин, Д. В. Лебедев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет». – № 2016121524 ; заявл. 31.05.2016 ; опубл. 19.06.2017, Бюл. № 17. – 5 с.

3. Лебедев, А. Е. К расчету стохастической энергии при моделировании структуры расширяющихся дисперсных потоков. – Текст : электронный / А. Е. Лебедев, Д. В. Лебедев, М. Н. Романова // Инженерный вестник Дона : электрон. науч. журнал. – 2018. – № 4. – URL : <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5268> (дата обращения: 13.11.2018).

4. Лебедев, А. Е. Метод оценки коэффициента неоднородности смесей сыпучих сред. – Текст : электронный / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. А. Петров // Инженерный вестник Дона : электрон. науч. журнал. – 2014. – № 4. – URL : [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2556](http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2556) (дата обращения: 13.11.2018).

5. Метод определения коэффициента неоднородности смеси при взаимодействии разреженных потоков / А. Е. Лебедев, А. И. Зайцев, А. Б. Капранова, А. А. Петров // Известия высш. учеб. заведений. Серия: Химия и хим. технология. – 2012. – Т. 55, № 11. – С. 119 – 121.

Mathematical Description of the Process of Spraying the Components of the Mixture in a Centrifugal Apparatus

A. E. Lebedev¹, A. A. Vatagin¹, D. V. Lebedev², I. S. Gudanov¹

Departments of Process Machines and Equipment (1), lae4444@mail.ru;

Automobile Transport (2),

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

Keywords: dispersed stream; heterogeneity coefficient; component segregation; mixing; scattering angle; distribution function.

Abstract: A method for reducing the effect of segregation on the mixing of components by preparing the components by grinding particles is considered. The design of a new mixing device and a mathematical model of the process of forming a dispersed particle stream during mixing are presented. This allows one to evaluate its structure, which is necessary when designing new mixers working on the principle of interaction of jet streams.

References

1. Lebedev A.Ye., Zaytsev A.I., Kapranova A.B., Vatagin A.A., Suid S. *Apparaty dlya pererabotki dispersnykh sred. Teoriya i raschet* [Apparatus for processing dispersed media. Theory and calculation], Yaroslavl: Izdatel'skiy dom Yaroslavskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017, 175 p. (In Russ.)

2. Lebedev A.Ye., Zaytsev A.I., Suid S., Vlasov V.V., Vatagin A.A., Lebedev D.V. *Ustroystvo dlya smesheniya i izmel'cheniya dispersnykh materialov* [Device for mixing and grinding dispersed materials], Russian Federation, 2016, Pat. 2622667. (In Russ.)

3. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5268> (accessed 13 November 2018).

4. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2556> (accessed 13 November 2018).

5. Lebedev A.Ye., Zaytsev A.I., Kapranova A.B., Petrov A.A. [A method for determining the coefficient of heterogeneity of a mixture during the interaction of rarefied flows], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2012, vol. 55, no. 11, pp. 119-121. (In Russ.)

Mathematische Beschreibung des Sprühvorgangs der Komponenten der Mischung in einem Zentrifugalapparat

Zusammenfassung: Es ist eine Methode zur Verringerung der Auswirkung der Segregation auf das Mischen von Komponenten durch Herstellung der Komponenten mittels Mahlen von Partikeln untersucht. Es sind das Design einer neuen Mischvorrichtung und ein mathematisches Modell des Prozesses der Bildung eines dispergierten Partikelstroms während des Mischens vorgestellt, mit dessen Hilfe seine Struktur bewertet werden kann, was bei der Entwicklung neuer, nach dem Prinzip der Wechselwirkung von Strahlströmen arbeitender Mischer notwendig ist.

Description mathématique du procédé de la pulvérisation des composants du mélange dans l'appareil de contrôle

Résumé: Est envisagée une méthode de la réduction de l'effet de la ségrégation sur le mélange des composants en préparant les composants par broyage. Sont présentés la conception du nouveau mélangeur et le modèle mathématique du processus de formation du flux dispersé des particules lors du mélange ce qui permet d'évaluation de sa structure nécessaire pour la conception de nouveaux mélangeurs fonctionnant sur le principe de l'interaction des flux de jet.

Авторы: *Лебедев Антон Евгеньевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование»; *Ватагин Александр Александрович* – аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование»; *Лебедев Дмитрий Владимирович* – ассистент кафедры «Автомобильный транспорт»; *Гуданов Илья Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.

Рецензент: *Капранова Анна Борисовна* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика и сопротивление материалов», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.