

К расчету стохастической энергии при моделировании структуры расширяющихся дисперсных потоков

А.Е. Лебедев, Д.В. Лебедев, М.Н. Романова

Ярославский государственный технический университет, Ярославль

Аннотация: В статье рассматривается способ переработки диспергированных материалов, а именно проведение процессов во взаимодействующих разреженных потоках и их математическое описание. Рассмотрено влияние стохастической энергии и при моделировании структуры расширяющихся дисперсных потоков и её составляющие. Получены выражения для стохастической энергии, что позволит описать структуру образованных дисперсных потоков. Исследование, приведённое в статье, поможет в составлении инженерных методик расчета режимных и конструктивных параметров устройств.

Ключевые слова: стохастическая энергия, дисперсные потоки, разреженные потоки, смешение, измельчение, сыпучие среды, кинетическая энергия, гидродинамическое воздействие, рассеивание, частица.

Одним из перспективных способов переработки дисперсных материалов является проведение процесса во взаимодействующих разреженных потоках. В дисперсном состоянии существенно интенсифицируются процессы смешивания и измельчения сыпучих сред, а также процессы разделения суспензий и эмульсий. Это объясняется тем, что в разреженных потоках частицы практически не взаимодействуют друг с другом, а жидкие и комплексные капли распадаются на более мелкие. В процессах смешения это позволяет обеспечить эффективное проникновение одного компонента в другой и распределиться равномерно по всему его объему; при ударном измельчении снижается вероятность взаимодействия набегающего и отраженного потоков, что предотвращает уменьшение скоростей частиц [1-4]. Распыливание и взаимодействие потоков неоднородных систем, суспензий и эмульсий, с преградами приводит к распаду комплексных жидкостей на капли исходных веществ, что позволяет проводить процессы разделения трудноразделимых систем.

При математическом описании структуры дисперсных потоков в вышеописанных процессах ввиду их сложности и огромного количества частиц целесообразно применять вероятностный подход [5-8], согласно которому вначале предлагается распределение количества частиц в элементе фазового объема, зависящее от стохастической энергии. Стохастическая энергия является главной величиной, влияющей на структуру получаемого потока.

В общем случае для всех вышеописанных процессов стохастическая энергия будет состоять из кинетической энергии, энергии взаимодействия с окружающей средой, поверхностной энергии и энергии гидродинамического взаимодействия [6]:

$$E = E_k + E_{vz} + E_{пов} + E_{гидр}. \quad (1)$$

$$\text{Здесь } E_k = mv^2/2, E_{vz} = mv_y^2/2, E_{пов} = \pi D^2 \sigma, E_{гидр} = C \cdot H \cdot v_2,$$

$E_k = mv^2/2, E_{vz} = mv_y^2/2, E_{пов} = \pi D^2 \sigma, E_{гидр} = C \cdot H \cdot v_2$ где σ – коэффициент поверхностного натяжения, D – диаметр частицы, v – скорость частицы в потоке, H – толщина жидкостного слоя с которым взаимодействует частица, C – коэффициент гидродинамического взаимодействия, v_2 – скорость частицы в отраженном потоке, v_y – поперечная составляющая скорости.

При моделировании структуры потоков в процессах смешения в центробежных аппаратах выражение для стохастической энергии (1) не будет содержать последние два слагаемые, относящиеся к потокам, содержащим капли жидкой фазы:

$$E = mv_x^2/2 + m(v_x \operatorname{tg} \phi)^2/2 = mv_x^2(1 + \operatorname{tg}^2 \phi)/2. \quad (2)$$

Здесь v_x – продольная составляющая скорости, ϕ – угол рассеивания элементов потока.

При переходе к безразмерным величинам можно ввести следующие обозначения $W^2 = v_x^2/v_0^2, D^2 = D^2/D_0^2$, где v_0 – окружная скорость частицы на периферии распыливающего органа, D_0 – средний размер частиц компонента смеси. Тогда:

$$E = 1/12 \rho \pi D^3 D_0^3 W^2 v_0^2 (1 + \epsilon g^2 \phi). \quad (3)$$

В процессах смешения, когда дисперсные потоки формируются вращающимися щеточными элементами, на структуру потока наибольшее влияние будет оказывать распрямление упругих элементов. В этом случае стохастическая энергия будет состоять только из кинетической энергии, которую можно представить в виде энергии сообщаемой от вращения щеток и полученной в результате распрямления упругих элементов:

$$E = E_k = E_{k1} + E_{k2} = mv^2/2 + k(\phi + \alpha)^2/2, \quad (4)$$

где k – угловой коэффициент жесткости эластичного элемента [4], α – начальная угловая деформация упругого элемента ρ – плотность частиц.

В безразмерном виде, вводя обозначения $D = D/D_w, w = v/v_w$, где D_w – средний диаметр частиц и средняя скорость соответственно получим:

$$E = \pi D^3 D_w^3 \rho w^2 v_w^2 / 12 + k(\phi + \alpha)^2 / 2. \quad (5)$$

Таким образом, при моделировании процессов смешивания сыпучих сред при взаимодействии дисперсных потоков структура последних определяется, главным образом, скоростями частиц, как в поперечном, так и в продольном направлении. Знание распределения частиц каждого компонента при смешении позволит организовать такие условия взаимодействия потоков, при которых в каждой точке зоны смешения будет

одинаковое соотношение частиц смешиваемых материалов, то есть будет формироваться однородная смесь.

При моделировании процессов смешения твердых частиц с каплями жидкости, структура потока последних будет более сложной. Это объясняется тем, что при формировании потока каплей происходит полидисперсный распад жидкой струи со случайными размерами каплей. То есть случайными величинами будут являться координаты каплей и их размер [6, 7].

Энергия в этом случае содержит три составляющие – кинетическую, поверхностную и энергию, связанную с расширением потока:

$$E = mv_y^2/2 + \pi D^2 \sigma + mv_y^2 \operatorname{tg}^2 \phi / 2. \quad (6)$$

В этом процессе на структуру потока наибольшее влияние оказывает скорость струи, а на размер каплей – поверхностное натяжение жидкости. Таким образом, зная влияние различных параметров на структуру потока и распределение каплей по размерам можно получить распыл необходимого состава и формы, что позволит обеспечить рациональное взаимодействие каплей с частицами второго потока, например, при получении асфальтобетонов методом внесения каплей битума в тонкодисперсную составляющую – минеральный порошок.

При моделировании процесса ударного измельчения представляет интерес описание структуры отраженного потока, то есть потока измельченных элементов.

Энергия E может быть представлена в виде двух составляющих – кинетической и поверхностной. Согласно работам [1, 3], поверхностная энергия при ударном разрушении однородных частиц пропорциональна их диаметру:

$$E_{\text{пов}} = \zeta_1 / (\pi D). \quad (7)$$

При измельчении неоднородных комплексных частиц содержащих твердую фазу и связующее должны учитываться дополнительные расходы на преодоление сил сцепления [9]. Поэтому поверхностную энергию предлагается вычислять по формуле:

$$E_{\text{пов}} = \zeta_2 / (\pi D_2^2). \quad (8)$$

Коэффициенты ζ_1, ζ_2 зависят от физико-механических свойств частиц измельчаемого материала.

С учетом введения безразмерных величин $W_2 = v_2/v_k, D_2 = D_2/D_k$, где v_k и D_k – средняя скорость и размер частиц, будем иметь для твердых хрупких материалов:

$$E = \pi D_2^2 \rho D_k^2 W_2^2 v_k^2 / 2 + \zeta_1 / (\pi D_2 D_k); \quad (9)$$

для неоднородных частиц:

$$E = \pi D_2^2 \rho D_k^2 W_2^2 v_k^2 / 2 + \zeta_2 / (\pi D_2^2 D_k^2). \quad (10)$$

При ударном разрушении комплексных капель неоднородных жидкостей стохастическую энергию целесообразно представить в виде суммы кинетической, поверхностной и энергию гидродинамического взаимодействия:

$$E = m v_x^2 / 2 (1 + \text{tg}^2(\phi)) + \pi \sigma D^2 + C \cdot H v_x. \quad (11)$$

Здесь на структуру потока кроме вышеописанных энергетических составляющих оказывает влияние слой жидкости, образующийся при растекании жидкой фазы по отбойной поверхности [10].

Полученные выражения для стохастической энергии могут быть использованы при составлении дифференциальных функций распределения числа частиц по различным параметрам. В процессах смешения и распыливания – по координатам (углам рассеивания), при измельчении и

распыливании – по размерам. Это позволит описать структуру образованных дисперсных потоков, на основе которой может быть составлена инженерная методика расчета режимных и конструктивных параметров устройств.

Литература

1. Лебедев А. Е., Суид С., Ватагин А.А. Математическое описание измельчения дисперсных материалов ударным способом // Инженерный вестник Дона, 2016, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3692

2. Лебедев А. Е., Зайцев А.И., Шеронова И.С., Суид С. Новые способы смешения сыпучих сред и аппараты для их осуществления // Современные наукоемкие технологии. Москва, 2016. №6 часть 2, С.264-268.

3. Лебедев А. Е., Зайцев А.И., Шеронова И.С. Математическое описание процессов взаимодействия пересекающихся разреженных потоков // Современные проблемы науки и образования. 2014. №5 URL: science-education.ru/119-14975

4. Капранова А. Б., Верлока И.И., Лебедев А.Е. Моделирование двумерных функций распределения вероятностей для описания ударного смешивания сыпучих сред // Фундаментальные исследования. - № 11 (часть 1), 2015. С. 54-58; ISSN 1812-7339; URL: fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39283

5. Лебедев А. Е., Лебедев Д.В., Ватагин А.А., Суид С. Ударное взаимодействие частиц с тонкими слоями дисперсных материалов // Инженерный вестник Дона, 2018, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4724

6. Лебедев А. Е., Романова М.Н. Математическое описание дисперсных потоков неоднородных жидкостей / А. Е. Лебедев, М. Н. Романова // Инженерный вестник Дона, 2018, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5160

7. Kapranova A. B., Verloka I. I., Lebedev A. E., Zaitzev A. I. The model of dispersion of particles during their flow from chipping the surface // *Czasopismo techniczne. Mechanika. Krakov, Poland, 2016. V. 113, №2 pp. 145-150.*

8. Kapranova A.B., Zaitzev A.I., Bushmelev A.V., Lebedev A.E. The optimization problem of the curvilinear blades from in the powder densification set-up. // *CHISA 2006: The 17-th Int. Congr. of Chem. Eng., Chem Equip., Desing and Automation. Praha, Czech. Republic, 2006. p. 1080.*

9. Lowrison, G. C. *Crushing and grinding.* London: 1974. 234 p.

10. Зайцев А. И., Бытев Д.О., Зайцев И.А., Лебедев А.Е. Изменения во фракционном составе взаимодействующих дисперсных потоков // *Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – Иваново. 2002, Т. 45, вып. 7. С. 88-90.*

References

1. Lebedev A. E., Suid S., Vatagin A. A. *Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №3.* URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3692

2. Lebedev A. E., Zaytsev A. I., Sheronina I. S., Suid S. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Moskva. 2016. №6 part 2, pp. 264-268.*

3. Lebedev A. E., Zaytsev A. I., Sheronina I. S. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. №5.* URL: science-education.ru/119-14975

4. Kapranova A. B., Verloka I. I., Lebedev A. E. *Fundamental'nye issledovaniya. № 11 part 1, 2015. pp. 54-58; ISSN 1812-7339* URL: fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39283

5. Lebedev A. E., Lebedev D. V., Vatagin A. A., Suid S. *Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №1.* URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4724

6. Lebedev A. E., Romanova M. N. *Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №3.* URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5160

7. Kapranova A. B., Verloka I. I., Lebedev A. E., Zaitzev A. I. *Czasopismo techniczne. Mechanika. Krakov, Poland, 2016. V. 113, №2. pp. 145-150.*



8. Kapranova A.B., Zaitzev A.I., Bushmelev A.V., Lebedev A.E. CHISA 2006: The 17-th Int. Congr. of Chem. Eng., Chem Equip., Desing and Automation. Praha, Czech. Republic, 2006. p. 1080.
9. Lowrison G. C. Crushing and grinding. London: 1974. 234 p.
10. Zaytsev A. I., Bytev D. O., Zaytsev I. A., Lebedev A. E. Izv. VUZov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. Ivanovo. 2002. V. 45. № 7. pp. 88-90.