

Определение зависимости коэффициента агломерации от параметров вибрационной обработки материала (на основе математической модели процесса)

Н. Д. Орлова

Национальный университет «Одесская морская академия» г.Одесса, Украина
Corresponding author E-mail: natorl2969@gmail.com

Paper received 04.09.19; Accepted for publication 20.09.19.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2019-206VII25-11>

Аннотация. На основе вероятностной модели процесса измельчения и агломерации получена зависимость коэффициента агрегирования (агломерации) от значений удельной поверхности и времени измельчения. По экспериментальным результатам проведена статистическая обработка данных, указана зависимость коэффициента агрегирования для конкретных материалов. По данным исследований указаны материалы, для которых характерна быстрая или медленная агломерация мелких частиц.

Ключевые слова: вибрационное измельчение, агломерация, оптимальные параметры.

Введение. Кинетика агломерации (агрегации, коагуляции) подробно рассмотрена в [2]. В вибрационных мельницах слипание двух частиц происходит при их столкновении, но не каждое столкновение приводит к образованию устойчивого агрегата (объёмное взаимодействие). Устойчивый агрегат, как правило, характеризуется молекулярно-плотным агрегированием частиц материала.

С возрастанием значений удельной поверхности $S = S(t)$ (степени дисперсности частиц) измельчаемого материала возрастает и доля энергии расходуемой на пластическую деформацию, в результате чего точечные контакты переходят в контакты по поверхности и прочность агрегатов возрастает. Слипание двух частиц происходит только в зоне их столкновения. Таким образом, число столкновений между частицами обрабатываемого материала имеет основное значение для агломерации. Однако эффективность столкновений частиц при соударении определяется свойствами поверхностей, обрабатываемых материалов, параметрами вибрационного воздействия (ударное или истирающее) и типом измельчения «сухой» или «мокрый» помол.

Процессы, протекающие при вибрационном измельчении и агломерации материалов, соответствуют двум типам [2]: быстрой агломерации мелких частиц на основе броуновского движения; медленной агломерации мелких включений, когда эффективной является только лишь часть столкновений за счет влияния энергетического барьера. Движение включений под воздействием турбулентных пульсаций и агломерация крупных включений вследствие их гидродинамического взаимодействия в вибрационных мельницах отсутствуют. В соответствии с этим выделим в зоне устойчивого образования агрегатов зону медленной агломерации (агрегации) и быстрой агломерации.

Рассматривая процессы измельчения и агломерации (агрегирование измельчаемых частиц) различных материалов в вибрационных мельницах с позиций случайных Марковских процессов [1,3,4,6] покажем возможность определения коэффициента агломерации на основе экспериментальных данных.

Математическая модель. Аналогично [3] считаем, что процесс измельчения и агрегирования из-

мельчаемых частиц соответствует неоднородному Марковскому процессу рождения и описывается уравнением

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\frac{1}{3}\{\lambda(1-\beta t) - \mu\}S(t)$$

$$S(t_0) = S_0 \quad S(t_1) = S_1 \quad (1)$$

где λ – коэффициент пропорциональности для интенсивности неоднородного Марковского процесса; β – параметр, определяющий долю частиц, находящихся в зоне воздействия рабочих органов; μ – коэффициент интенсивности агрегирования; t_0, t_1 – время начала и окончания этапа агрегирования; S_0, S_1 – удельная поверхность в моменты времени t_0, t_1 , определяются из эксперимента.

Для идентификации коэффициента μ (коэффициент агрегирования) следует из эксперимента определить время начала второго этапа агрегирования. Началом этапа агрегирования будем считать первую точку перегиба кривой $S = S(t)$. Согласно результатам [3] коэффициент агрегирования μ следует считать не постоянной величиной, а функцией от времени и удельной поверхности $\mu = \mu(t, S)$. Рассмотрим этап устойчивого образования агрегатов при измельчении материала. Предполагаем, что существует линейная зависимость между независимыми переменными (t, S) и зависимой переменной μ .

Внутри заданного временного промежутка $[t_0; t_1]$ рассмотрим регрессионную модель для коэффициента агрегирования $\mu(t, S) \approx a_0 + a_1 t + a_2 S$

Тогда уравнение (1) примет вид

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{1}{3}(a_0 - \lambda)S + \frac{1}{3}(\lambda\beta + a_1)tS + \frac{a_2}{3}S^2$$

$$b_0 = \frac{1}{3}(a_0 - \lambda)_0; b_1 = \frac{1}{3}(\lambda\beta + a_1); b_2 = \frac{a_2}{3} \quad (2)$$

Уравнение (2) примет вид $\frac{dS(t)}{dt} = b_0S + b_1tS + b_2S^2$

Если считать $(\lambda\beta + a_1) = 0$, то с учетом граничных

условий получим

$$S(t) = \frac{b_0 S_0 \exp(b_0(t - t_0))}{b_0 + b_2 S_0 - b_2 S_0 \exp(b_0(t - t_0))}$$

При выполнении зависимости

$$S_1(t_1) = \frac{b_0 S_0}{b_0(1 + b_2 S_0) \exp(b_0(t_0 - t_1)) - S_0}$$

из этого условия и экспериментальных данных можно определить зависимость между коэффициентами $b_0 : b_2$.

Результаты определения коэффициента агрегации по экспериментальным данным.

Результаты вибрационной обработки X13M2C2.

Материал подвергался вибрационной обработке в течение 9 часов, набором мелющих тел №1 общий вес мелющих тел 55кг, обрабатываемый материал вес 6 кг, частота колебаний 2000об/мин., средняя амплитуда 1,5мм. Результаты обработки оценивались по удельной поверхности, измеряемой на приборе ПСХ-4, который соответствует стандартам - европейским (ГОСТ, DIN, ISO) и американскому (ASTM). Анализируя результаты опыта (рис.1), видим, что удельная поверхность уменьшается (имеет место агрегация частиц) между 2,5 и 3,5 часами измельчения, при этом $t_0 = 2,5 \rightarrow S_0 = 28,5$; $t_1 = 6,5 \rightarrow S_1 = 29,41$. Далее удельная поверхность возрастает.

По экспериментальным данным зависимости удельной поверхности от времени измельчения металлических порошков зависимости удельной поверхности от времени измельчения могут быть найдены [6]

Рассмотрим нахождение изменения удельной поверхности при измельчении с учетом этапа устойчивого образования агрегатов. Началом этапа агрегирования будем считать первую точку перегиба кривой $S=S(t)$

Изменение удельной поверхности X13M2C2

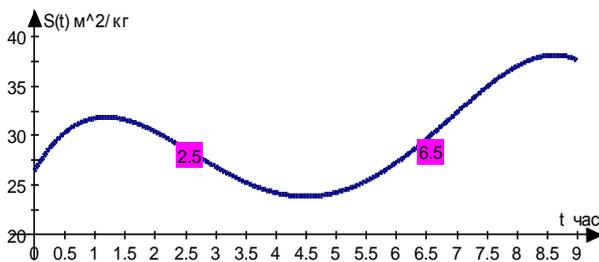


Рис.1

Начало агрегации отвечает точке перегиба $t_0 = 2,5 \rightarrow S_0 = 28,5$; окончание процесса агрегации вторая точка перегиба $t_1 = 6,5 \rightarrow S_1 = 29,41$ кривой $S=S(t)$.

Агрегация измельчаемого материала X13M2C2 интервал от 2.5 до 6.5 час.

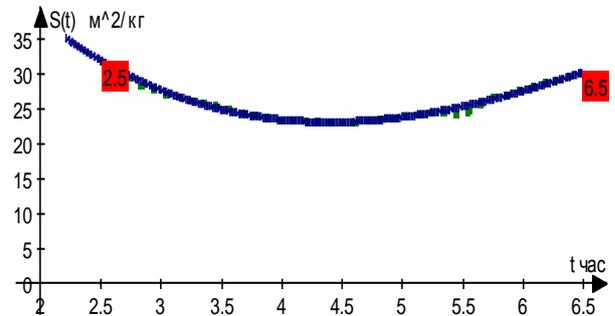


Рис.2

На интервале $t \in (2.5; 6.5)$ по данным таблицы 1 корреляционную связь будем искать в виде $\mu(t, S) \approx a_0 + a_1 t + a_2 S$.

Используя функции *Microsoft Excel*, проведена статистическая обработка данных, коэффициент детерминированности $r=0,9950$ (таблица 1), что указывает на сильную зависимость между μ коэффициентом агрегирования и независимыми переменными t, S . Для определения, является ли этот результат (с высоким значением r) случайным или нет, используем F-статистику. Гипотеза об отсутствии связи между значениями μ, t, S при $\alpha=0,05$ отвергается, если значение F превышает критический уровень 4,53. Использование функции *Microsoft Excel* ФРАСП дает чрезвычайно мало F. Значение вероятности =ФРАСП(598,1043;2;6)=1,2431E-07

Из этого можно заключить, что уравнение регрессии $\mu(t, S) = 1,3262 + 0,8263t - 0,0383S$ можно рекомендовать к использованию.

Таблица 1 Таблица 2. Таблица 3.

(t , S , μ)

2,5	28,5	2,1911
3	26,8	2,823
3,5	25,1	3,4083
4	24,14	3,7397
4,5	23,63	4,084
5	24,31	4,4631
5,5	25,67	4,8486
6	27,03	5,2262
6,5	29,41	5,6312
-0,03831	0,826336	1,32627
0,016288	0,023935	0,425545
0,995009	0,09194	#Н/Д
598,1043	6	#Н/Д
10,11146	0,050718	#Н/Д

0,83	870	1,1882
1	772	0,864
1,5	750	1,0648
2	700	1,3574
2,5	780	1,5483
3	820	1,7855
3,5	952	2,1057
0,001382	0,358679	-0,43331
0,000587	0,048776	0,443284
0,957105	0,109254	#Н/Д
44,62546	4	#Н/Д
1,065345	0,047746	#Н/Д

2	41,96	2,323
2,5	33,85	2,2433
3	27,08	2,1572
3,5	22,5	1,9473
4	19,73	2,1877
4,5	22,01	2,4032
5	23,27	2,5583
0,037792	0,310565	0,145071
0,007973	0,058925	0,407274
0,875367	0,084159	#Н/Д
14,04709	4	#Н/Д
0,198983	0,028331	#Н/Д

Результаты вибрационной обработки X18H15.

Так как частицы спека имеют размер от 1мм до 10см, проводилось «влажное» измельчение (содержание воды порядка 15%) в два этапа.

Первый этап. Загрузка барабана вибрационной мельницы ВМН-20 3кг измельчаемого материала (мокрый спек); мелющие тела диаметром 50 мм, весом 60кг; время измельчения 0.5 часа; частота 640 об/мин; амплитуда 0.5мм.

Второй этап. Через 0.5 часа мелющие тела диаметром Ø50мм были выгружены и заменены набором мелющих тел № 1 (шары диаметром Ø 28мм – 50кг; Ø12мм – 10кг); частота 2000 об/мин; амплитуда 1.5мм; время измельчения 3.5 часа.

Результаты представлены на рис.3,4

Изменение удельной поверхности S(t) спека X18H15 (жидкий помол)

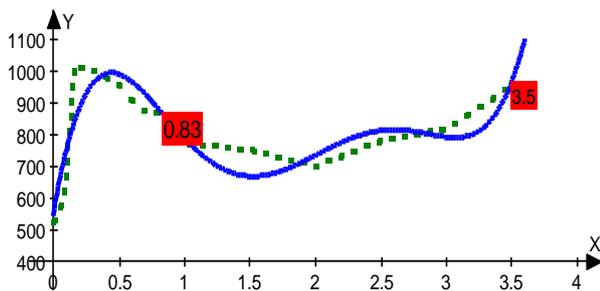


Рис.3

Начало агрегации отвечает точке перегиба при $t_0 = 0,83 \rightarrow S_0 = 870$; окончание процесса агрегации второй точке перегиба при $t_1 = 3,5 \rightarrow S_1 = 952$ кривой $S=S(t)$.

Агрегация спека X18H15 (жидкий помол)

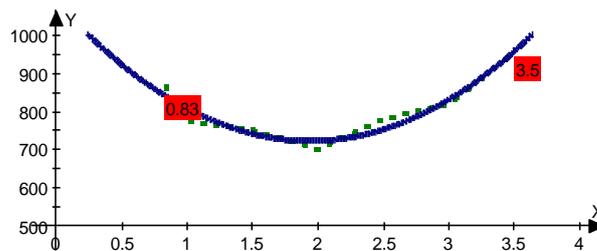


Рис.4

На интервале $t \in (0.83; 3.5)$ по данным таблицы 2 корреляционную связь будем искать в виде $\mu(t, S) \approx a_0 + a_1 t + a_2 S$.

Уравнение регрессии

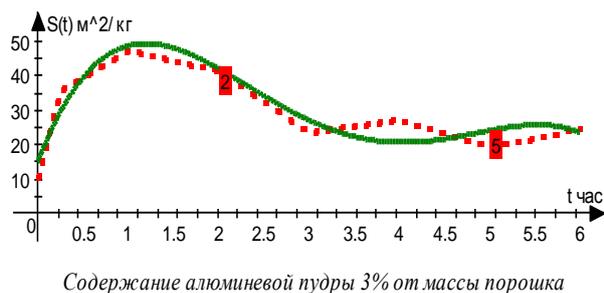
$$\mu(t, S) = 0,0014 + 0,4333t + 0,3587S.$$

Коэффициент детерминированности $r=0,9571$ (таблица 2), что указывает на сильную зависимость между независимыми переменными. Использование F-статистики, указывает на то, что данный результат не является случайным. Значение вероятности $=F_{расп}(44,6254;2;4)=0,00183$.

Результаты вибрационной обработки порошка ПГСР-2+3%.

Материал подвергался вибрационной обработке в течение 6 часов, в барабане объёмом - 2.3 дм³, установленном на вибрационной машине ВУПП-200. Мелющие тела стальные шары (ШХ-15) диаметром – 22мм и весом – 7.95кг; обрабатываемый материал – 2 кг; частота колебаний – 1500об/мин; средняя амплитуда – 2,5 мм. Содержание алюминиевой пудры – 3%(60г). Результаты вибрационной обработки рис.4,5.

Термореагирующий порошок ПГСП-2



Содержание алюминиевой пудры 3% от массы порошка

Рис.4

Начало агрегации отвечает точке перегиба при $t_0 = 2 \rightarrow S_0 = 41,96$; окончание процесса агрегации второй точке перегиба при $t_1 = 5 \rightarrow S_1 = 23,27$ кривой $S=S(t)$.

Агрегация ПГСП-2 +3%

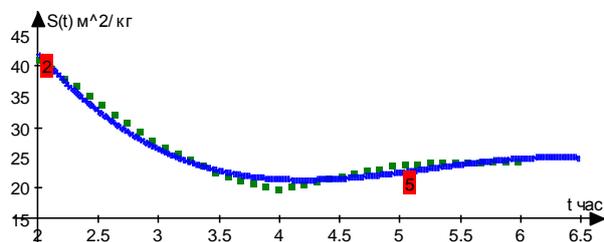


Рис.5

На интервале по данным таблицы 3 корреляционную связь будем искать в виде

$$\mu(t, S) \approx a_0 + a_1 t + a_2 S.$$

Коэффициент детерминированности $r = 0,8753$ (таблица 3) указывает на зависимость между независимыми переменными. Использование F-статистики, указывает на то, что данный результат не является случайным. Значение вероятности $=F_{РАСП}(14,0471;2;4)=0,01553$.

Уравнение регрессии
$$\mu(t, S) = 0,0376 + 0,1450t + 0,3106S.$$

Выводы. В предложенной математической модели процесса агрегирования коэффициент агрегирования μ является функцией от времени и удельной поверхности $\mu = \mu(t, S)$. Отметим, что для одних материалов такая зависимость является более значимой, а для других менее значимой. Последнее связано с зонами медленной и быстрой агломерации (агрегации).

ЛИТЕРАТУРА

1. Непомнящий Е.А. Закономерности тонкодисперсного измельчения, сопровождаемого агрегированием частиц. – Теоретические основы химической технологии. – 1978. т.12. №4 – С. 576-580.
2. В.В.Кафаров Системный анализ процессов химической технологии: методы неравностойной термодинамики :монография /И.Н.Дорохов,Э.М.Кольцова; отв. редактор Н.М.Жаворонков – 2-е изд.перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт,2018.– 377с.–(Серия: Университеты России) ISBN 978-5-534-06997-6.
3. Орлова Н.Д. Математическое описание процесса измельчения и агломерации на основе вероятностной модели процесса. Science and Education a New Dimension/ Natural and Technical Sciences. VI(19) Issue: 171, 2018, 47-50.
4. Паходин В.А. Исследование процесса агломерации при измельчении материалов в вибромельнице/ Т.А. Афанасьева, В.Н.Блинничев, С.Б.Афонин – Известия вузов. Химия и химическая технология – 1980 – т.23,№9 –С.1174-1176.
5. Овчинников П.Ф. Виброреология – Киев: Наукова Думка.1983. – 271с.
6. В.В.Кафаров О механизме дробления частиц дисперсной фазы в двухфазной системе/И.Н.Дорохов,Э.М.Кольцова,С.Ю.Арютунов. – Докл. АН СССР: 1982.т.264.№2. – С.377-440.

REFERENCES

1. Nepomnyaschiy E.A. The laws of fine grinding, accompanied by aggregation of particles. - Theoretical foundations of chemical technology. - 1978.Vol. 12. No. 4 - P. 576-580.
2. Kafarov V.V. System analysis of processes of chemical technology: methods of non-uniform thermodynamics: monograph / I.N. Dorokhov, E.M. Koltsova; open Editor N.M. Zhavoronkov - 2nd ed. and add. - M.: Publishing House Yurait, 2018.– 377 p .– (Series: Universities of Russia) ISBN 978-5-534-06997-6.
3. Orlova N.D. A mathematical description of the grinding and agglomeration process based on a probabilistic process model. Science and Education a New Dimension / Natural and Technical Sciences. VI (19) Issue: 171, 2018, P. 47-50.
4. Pakhodin V.A. Investigation of the agglomeration process when grinding materials in a vibratory mill / T.A. Afanasyev, V.N. Blinichev, S.B.Afonin - Proceedings of universities. Chemistry and chemical technology - 1980 - v.23, No. 9 – P.1174-1176.
5. Ovchinnikov P.F. Vibro-Rheology - Kiev: Naukova Dumka. 1983. – 271p.
6. Kafarov V.V. On the mechanism of crushing of particles of a dispersed phase in a two-phase system / I.N. Dorokhov, E.M. Koltsova, S.Yu. Arutyunov. - Doc. USSR Academy of Sciences: 1982.v.264.№2. – P.377-440.

Determination of the dependence of the agglomeration coefficient on the parameters of the vibration processing of the material (based on the mathematical model of the process)

N. D. Orlova

Abstract. Based on the probabilistic model of the grinding and agglomeration process, the dependence of the aggregation coefficient on the values of the specific surface and grinding time is found. According to the experimental results, statistical data processing was carried out, the dependence of the aggregation coefficient for specific materials is indicated. According to research, specific materials are indicated for which fast or slow agglomeration of small particles is characteristic.

Keywords: vibration grinding, agglomeration, optimal parameters.