

DOI:10.6060/snt.20216501.0009

УДК 542.223

КИНЕТИКА ИСТИРАНИЯ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

С.В. Воробьев, М.Ю. Колобов, И.В. Постникова, В.Н. Блиничев

Сергей Владимирович Воробьев, Михаил Юрьевич Колобов, Ирина Викторовна Постникова, Валерьян Николаевич Блиничев

Кафедра технологических машин и оборудования, Ивановский государственный химико-технологический университет просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: ch4rlythec4t@gmail.com, mikhailkolobov@rambler.ru, poirvic@mail.ru

Представлены результаты экспериментального исследования процесса истирания зернистых материалов, на основании которых предложено уравнение, позволяющее рассчитать массу продукта в зависимости от конструктивных параметров газораспределительной решетки, технологических параметров и физико-механических свойств материала с возможностью применения его для расчета производительности аппаратов непрерывного действия одного-, двух- и трехступенчатого типов.

Ключевые слова: псевдооживленный слой, измельчение, кинетика истирания

THE KINETICS OF ABRASION OF GRANULAR MATERIALS IN A FLUIDIZED BED LAYER

S.V. Vorobiev, M. Yu. Kolobov, I. V. Postnikova, V.N. Blinichev

Vorobyov Sergey Vladimirovich, Kolobov Michael Yurievich, Postnikova Irina Viktorovna, Blinichev Valerian Nikolaevich

Department of technological machines and equipment, Ivanovo state University of chemical technology, prosp. Sheremetyevo, 7, Ivanovo, 153000

The results of an experimental study of the process of abrasion of granular materials are presented, on the basis of which an equation is proposed that allows calculating the mass of the product depending on the design parameters of the gas distribution device, technological parameters and physical and mechanical properties of the material with the possibility of using it to calculate the performance of continuous-action apparatus of one-, two- and three-stage type.

Keywords: fluidized bed layer, grinding, abrasion kinetics.

Введение

Физическую модель процесса измельчения твердых частиц в псевдооживленном слое можно представить следующим образом: частицы твердой фазы разрушаются вследствие двух параллельно протекающих процессов: истирания частиц в псевдооживленном слое и разрушения их в результате соударений.

Таким образом, в псевдооживленном слое можно выделить две зоны, в которых измельчение частиц происходит двумя разными способами. Первая зона – надрешеточная (до 0,05 м), в которой совместно с истиранием частицы испытывают значительные ударные нагрузки вследствие «соплового эффекта струй» энергоносителя. В связи с чем, процесс разрушения частиц на крупные части протекает, в основном,

лишь в надрешеточной зоне псевдооживленного слоя.

Вторая зона охватывает остальную область псевдооживленного слоя, лежащую выше первой зоны. Уменьшение линейного размера частиц δ во второй зоне происходит вследствие истирания материала в результате интенсивной циркуляции частиц твердой фазы. Разрушение частиц на крупные части в этой зоне не происходит вследствие сравнительно небольшой кинетической энергии их движения.

Наглядное отображение этих зон показано на рис. 1, на котором представлен результат численного моделирования распределения поля скоростей газовой фазы в программе Solidworks Flow Simulations. В качестве исходных данных принято: диаметр аппарата $d_{an} = 0,13$ м; диаметр отверстий газораспределительной решетки $d_{ome} = 0,003$ м; значение живого сечения решетки $\varphi = 5\%$; рабочая скорость газовой фазы $v_2 = 3$ м/с; энергоноситель – воздух.

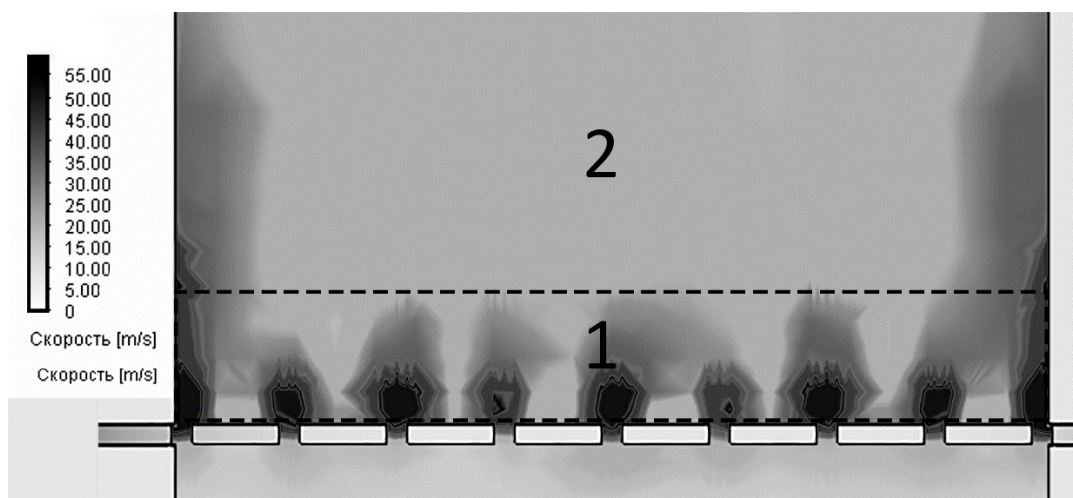


Рис. 1. Результаты численного моделирования распределения поля скоростей газовой фазы в объеме псевдооживленного слоя:
зоны измельчения: 1 - зона разрушения и истирания; 2 - зона истирания

Значимость той или иной зоны для процесса измельчения может изменяться в зависимости от параметров псевдооживляющего агента, физико-механических свойств материала и конструкции газораспределительной решетки.

Методика эксперимента

Для исследования влияния конструкции газораспределительной решетки на процесс истирания зернистых материалов в псевдооживленном слое нами были проведены эксперименты по истиранию материалов на решетках с различными живыми сечениями φ : 1 %, 2 %, 3 %, 5 %, 10 % и 20 %. Для каждого живого сечения варьировались диаметры отверстий d_{ome} : 0,001 м; 0,002 м; 0,003 м; 0,004 м; 0,005 м; 0,006 м и

0,008 м. В качестве модельного материала использовались частицы известняка различных фракций. Замеры скорости воздуха внутри аппарата производились с помощью термоанемометра смарт-зонда Testo 405 i. Виртуальное моделирование гидравлики внутри аппарата проводилось в виртуальной среде Solidworks Flow Simulations.

Результаты и их обсуждение

Из литературных источников известно, что интенсивность и стабильность многих процессов химической технологии, осуществляемых в аппаратах с псевдооживленным слоем, определяются гидродинамической обстановкой, которая в значительной степени зависит от работы газорас-

пределительной решетки. Таким образом, характер истирания зернистых материалов и преобладание той или иной зоны измельчения в аппарате комбинированного действия во многом будет зависеть от конструкции газораспределительных решеток.

На рис. 2 приведены кинетические кривые истирания CaCO_3 с изменениями живого сечения φ газораспределительных решеток при постоянной скорости псевдоожижающего воздуха $v_o=3$ м/с.

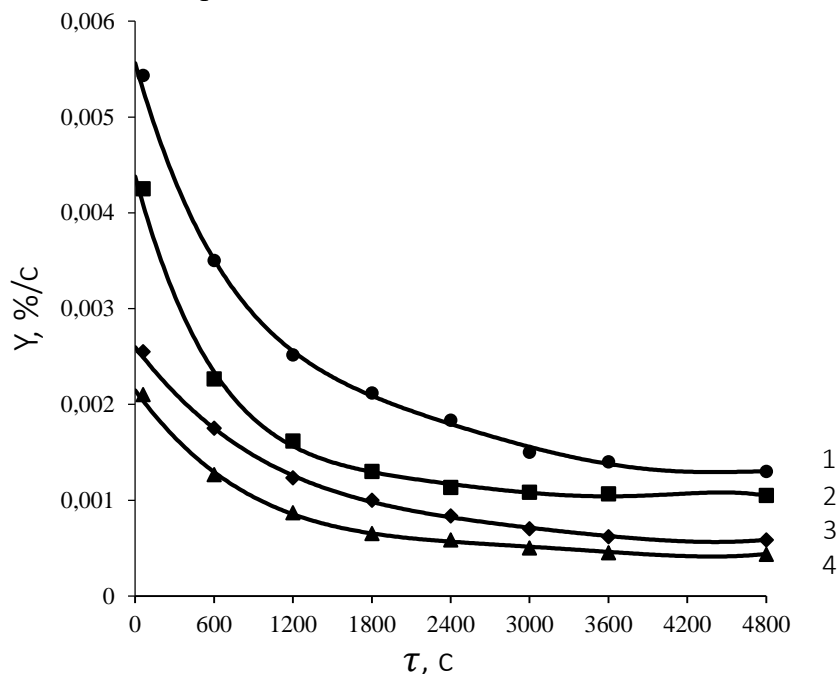


Рис. 2. Влияние живого сечения φ газораспределительной решетки на максимальную скорость истирания Y_{max} частиц CaCO_3 ; исходные данные: $v_o=3$ м/с; $d_{омв}=0,002$ м; $Y=0,002 \div 0,0025$ м; $H_0=0,1$ м; живое сечение φ : 1-3%; 2-5%; 3-10%, 4-20%.

Как видно из графика, при уменьшении живого сечения φ решетки от 20 % до 3% максимальная скорость истирания Y_{max} частиц слоя возрастает (под скоростью истирания Y будем понимать отношение приращения пылевидного продукта в процентах по весу слоя к единице времени – секунде). Это связано со значительным ростом скорости истечения воздушных струй из отверстий решетки, а значит и с увеличением кинетической энергии $E_{кин}$, воспринимаемой частицами от среды; возрастанием при этом подвижности частиц, числа и силы соударений между ними в надрешеточной области, в результате чего возникает непрерывное дробление частиц на более мелкие части и интенсивное истирание поверхности как мелких, так и крупных частиц.

Помимо живого сечения φ на интенсивность истирания частиц большое влияние также оказывает диаметр отверстий $d_{омв}$ решетки. Исследование влияния диаметра отверстий $d_{омв}$ решетки на скорость истирания Y зернистых материалов проводилось при значении живого сечения $\varphi=3\%$, рекомендуемом рядом авторов, как оптимальное для цилиндрических аппаратов.

Обработка экспериментальных данных показывает, что с увеличением диаметра отверстий $d_{омв}$ от 0,001 до 0,0045 м максимальная Y_{max} и постоянная Y_{const} скорости истирания частиц слоя непрерывно растут (рис. 3). Это объясняется повышением дальности и мощности струй воздуха, вытекающих из отверстий решетки.

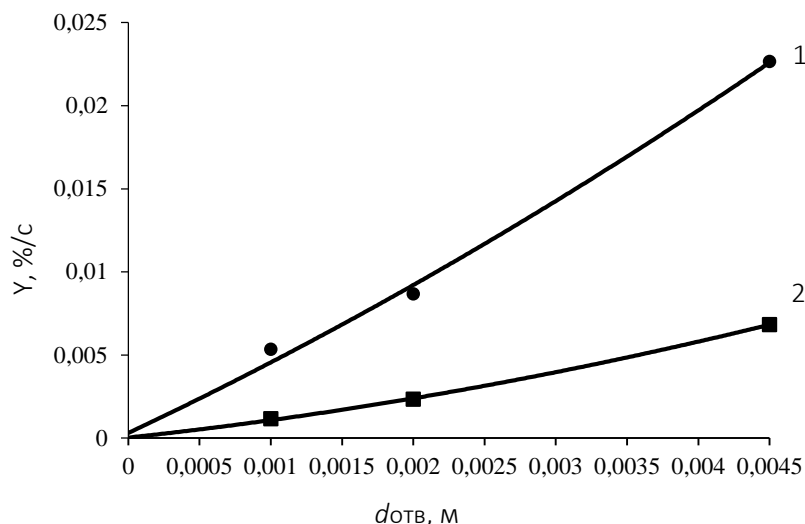


Рис. 3. Влияние диаметра отверстий $d_{отв}$ газораспределительной решетки на изменение скорости истирания Y частиц CaCO_3 ;

исходные данные: $v_z=3$ м/с, $\varphi=3\%$; $d_{mg}=0,002 \div 0,0025$ м, $H_0=0,1$ м; скорость истирания Y : 1- Y_{max} ; 2- Y_{const}

При максимальном диаметре отверстий $d_{отв}=0,007 \div 0,008$ м мощность струй воздуха достигает такого значения, что слой из псевдооживленного состояния переходит в режим фонтанирующего псевдооживления. При тонких слоях ($H_0=0,1 \div 0,15$ м) можно визуально наблюдать фонтанирование слоя, причем, обычно число фонтанов равно числу отверстий решетки.

При уменьшении диаметра $d_{отв}$, увеличиваются скорость истечения и мощность струй энергоносителя, истекающих из от-

$$\Delta G = f(v_z, d_{отв}, \rho_{ТВ}, \rho_c, \mu, g, G_{слоя}, \sigma_{сж}, d_{отв}, \varphi, \tau) \quad (1)$$

где: ΔG – количество пыли, кг; $G_{слоя}$ – вес слоя, кг; $\rho_{ТВ}$ и ρ_c – плотность твердого материала и плотность среды, кг/м³; μ – динамическая вязкость псевдооживляющей среды, м²/с; g – ускорение свободного падения,

верстий решетки, что приводит к более интенсивному энергообмену фаз, увеличению силы и числа соударений между частицами. Соответственно, с увеличением диаметра отверстий $d_{отв}$ решетки растет КПД псевдооживленного слоя – как измельчителя.

Результаты анализа полученных экспериментальных данных можно обобщить и представить в виде функциональной зависимости:

м/с², $\sigma_{сж}$ – предел прочности материала на сжатие, МПа.

Метод анализа размерностей и обработка экспериментальных данных позволяет привести функциональную зависимость к критериальному виду:

$$\frac{\Delta G}{G_{слоя}} = 1,75 \cdot 10^3 Fr^{1,3} Ho^{0,6} \pi_1^{-1,3} \left(\frac{\rho_c}{\rho_{ТВ}}\right)^{1,3} \cdot 10^{\frac{0,21d_{отв}}{d_{ТВ}} - 18\varphi} \quad (2)$$

В критериях $Fr = \frac{v^2}{gd_{ТВ}}$ и $Ho = \frac{v_z \tau}{d_{ТВ}}$ за определяющий линейный размер принят средний начальный диаметр частицы $d_{ТВ}$. $\pi_1 = \frac{\sigma_{сж}}{v^2 \rho_c}$ – комплекс, отражающий соотно-

шение между пределом прочности материалов на сжатие и кинетической энергией потока; $10^{\frac{0,21d_{отв}}{d_{ТВ}} - 18\varphi}$ – комплекс, отражающий особенности конструкции газораспределительной решетки.

Формула (2) проверена в пределах:
 $Fr = 40 \div 3000$; $Ho = 0 \div 6000000$; $\frac{d_{отв}}{d_{ТВ}} = 0,2 \div 5,0$;
 $\varphi = 0,006 \div 0,05$; $\pi_1 = 1,4 \cdot 10^5 - 1,5 \cdot 10^5$; $\frac{\Delta G}{G_{слоя}} = 0,07 \div 63\%$. Раскры-

тая значение критериев и комплексов, уравнение (2) можно привести к более простому виду:

$$\Delta G = \frac{90 \Phi G_{\text{слоя}} v_z^{5,8} \rho_c^{2,6} 10^{\frac{0,21 d_{\text{отв}} - 18 \varphi}{d_{\text{ТВ}}}}}{d_{\text{ТВ}}^{1,9} \sigma_{\text{сж}}^{1,3} \rho_{\text{ме}}^{1,3}} \tau^{0,6} \quad (3)$$

Для того чтобы уравнение (3) можно было использовать для расчета процесса истирания частиц в аппарате непрерывного действия, необходимо ввести в него поправочный коэффициент K , учитывающий отклонения величины действительного времени пребывания, а также вместо τ подставить среднее время пребывания частицы в аппарате.

Поправочный коэффициент K для аппарата непрерывного действия равен: одноступенчатый аппарат - $K = 0,894$; двухступенчатый аппарат - $K = 0,947$; трехступенчатый аппарат - $K = 0,967$.

Выводы

1. Надрешеточная зона является поставщиком не только тонкодисперсных частиц, но также и большого количества крупных осколков неправильной формы разрушившихся частиц, энергия которых расходуется на интенсивный процесс истирания острых углов осколков в объеме вихревого движения частиц псевдооживленного слоя.

2. Обобщая исследования газораспределительных решеток, необходимо отметить, что если нужно иметь сравнительно однородное псевдооживление и минимальное истирание частиц, то в цилиндрическом аппарате должна быть решетка с живым сечением 3-5 % и с возможно меньшим диаметром отверстий.

3. Проведена обработка экспериментальных данных по влиянию конструктивных параметров газораспределительной решетки, технологических параметров и физико-механических свойств материала. Получена эмпирическая зависимость, позволяющая рассчитать массу продукта

ЛИТЕРАТУРА

- Петров В.Н., Шабалин А.С., Сопин В.Ф., Петров С.В., Малышев С.Л. Исследование взаимодействия турбулентной осесимметричной струи с преградой // Вестник Казанского технологического университета, т. 20. №. 2. 2017. С. 93-96.
- Giersemehl, M., G. Plihal. Fine Grinding System with Impact Classifier Mill and Cyclone Classifier. Company Affiliation: Neuman & Esser GmbH Mahl- und Sichtsysteme. Journa 1: powder handling & processing. 1999 V. 11. N: 3 P. 269.
- Berthiaux H., Dodds J. Modelling fine grinding in a fluidized bed opposedjet mill Part 1: Batch grinding kinetics. Powder Techn. 1999. N 106, P. 78-87.
- Heng P.W.S., Chan L.W., Lee C.C. Ultrafine grinding using a fluidized bed opposedjet mill: effect of process parameters on the size distribution of milled particles // S.T. P. PharmaSciences. 2000. N 10, P 445-451.
- Vogel L., Peukert W. Modelling of grinding in an Air Classifier Mill Based on a Fundamental Material Function // KONA. 2003. N 21. P 109-120
- Агапов Ю.Н., Лукьяненко В.И., Бырдин А.П., Стогней В.Г. Влияние высоты псевдооживленного слоя на параметры газораспределительной решетки // Вестник ВГТУ. Серия: Энергетика. Т. 2. №6. 2006. С. 139-143.
- Агапов Д.Ю., Надеев А. А., Родионов К.Н., Стогней В.Г., Клейников И.Ю. Экспериментальное сравнение газораспределительных устройств для формирования центробежного слоя. Вестник Воронежского государственного технического университета. V. 8. N. 7-1. 2012. P. 118-121.
- Калашникова Н.В., Волженцев А.В. Совершенствование технологического процесса сушки зерна пшеницы с обоснованием параметров сушилки с псевдооживленным слоем // Вестник аграрной науки. V. 16. N. 1. 2009. P. 44-45.
- Волженцев А.В. Определение качества оживления зерна в сушилках // Образование, наука и производство. N. 4 (9). 2014. P. 4-7.
- Гвоздев Д.В., Сальников А.А., Фомичев А.Г. Расчет и конструирование аппаратов с псевдооживленным слоем зернистого материала. Газораспределительные решетки // Изв. МВО СССР, Серия Химия и химич. тех. № 4. 1963. с.38.
- Грек Ф. 3. О геометрических характеристи-

ках газораспределительных решеток. // Хим. пром. 1966. с.67-68

12. Афанасьева О. В., Мингалеева Г. Р. Аппарат для получения активированного угля на мини-тэс. Известия Томского политехнического университета // Инжиниринг георесурсов. Т. 330. №. 9, 2019. Р. 42-50.

13. Тодес О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем: (Гидравл. и тепловые основы работы) Л.: Химия: Ленингр. отд-ние. 1981. 296 с.

14. Яковлев В. А., Сахибгареев А. Ф. Аэродинамические особенности проектирования смесеподготовительных систем щелевых ГТУ с принудительной подачей воздуха. Academy. N. 7 (34). 2018. P. 23-25.

15. Белоглазов И.И., Шариков Ю.В., Белоглазов И.Н. Изучение распределения времени пребывания продуктов обжига в печи кипящего слоя Записки Горного института, V. 169. 2006. P. 61-62.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-03-00787

REFERENCES

1. Petrov V.N., Shabalin A.S., Sopin V.F., Petrov S.V., Malyshev S.L. Investigation of the interaction of a turbulent axisymmetric jet with an obstruction Vestnik of Kazan Technological University, vol. 20. No. 2. 2017. S. 93-96.
2. Giersemehl, M., G. Plihal. Fine Grinding System with Impact Classifier Mill and Cyclone Classifier. Company Affiliation: Neuman & Esser GmbH Mahl- und Sichtsysteme. Journa I: powder handling & processing. 1999 V. 11. N: 3 P. 269.
3. Berthiaux H., Dodds J. Modelling fine grinding in a fluidized bed opposedjet mill Part 1: Batch grinding kinetics. Powder Techn. 1999. N 106, P. 78-87.
4. Heng P.W.S., Chan L.W., Lee C.C. Ultrafine grinding using a fluidized bed opposedjet mill: effect of process parameters on the size distribution of milled particles. S.T. P. PharmaSciences. 2000. N 10, P 445-451.
5. Vogel L., Peukert W. Modelling of grinding in an Air Classifier Mill Based on a Fundamental Material Function. KONA. 2003. N 21. P 109-120
6. Agapov Yu.N., Lukyanenko V.I., Bardin A.P., Stogney V.G. The influence of the height of the fluidized bed on the parameters of the gas distribution grid. Bulletin of VSTU. Series: Energy. vol. 2. No. 6. 2006.S. 139-143.
7. Agapov D.Yu., Nadeev A.A., Rodionov K.N., Stogney V.G., Kleinikov I.Y. Experimental comparison of gas distribution devices for the formation of a centrifugal layer. Bulletin of the Voronezh State Technical University. V. 8. N. 7-1. 2012. P. 118-121.
8. Kalashnikova N.V., Volzhentsev A.V. Improving the technological process of drying wheat grain with the justification of the parameters of the fluidized bed dryer. Bulletin of agricultural science. V. 16. N. 1. 2009. P. 44-45.
9. Volzhentsev A.V. Determination of the quality of grain liquefaction in dryers. Education, science and production. N. 4 (9). 2014.P. 4-7.
10. Gvozdev D.V., Salnikov A.A., Fomichev A.G. Calculation and design of apparatuses with a fluidized bed of granular material. Gas distribution grilles. Izv. MVO USSR, Series Chemistry and Chemistry. No. 4. 1963. p. 38.
11. Greek F.Z. On the geometric characteristics of gas distribution grilles. Chem. prom 1966. p. 67-68
12. Afanasyeva O. V., Mingaleeva G. R. Apparatus for producing activated carbon on a mini-thermal power plant. News of Tomsk Polytechnic University. Engineering of geo-resources. T. 330. No. 9, 2019. P. 42-50.
13. Todes O. M. Devices with a fluidized granular layer: (Hydraulic and thermal fundamentals of work) L.: Chemistry: Leningrad. Separation. 1981. 296 p.
14. Yakovlev V. A., Sakhigareev A. F. Aerodynamic design features of mixture-preparation systems for slotted gas-turbine units with forced air supply. Academy, N. 7 (34). 2018.P. 23-25.
15. Beloglazov I.I., Sharikov Y.V., Beloglazov I.N. Study of the distribution of the residence time of firing products in a fluidized bed furnace. Zapiski Mining Institute, V. 169. 2006. P. 61-62.