

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА
ГРАНУЛИРОВАНИЯ-АГЛОМЕРАЦИИ
УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В АППАРАТЕ С
ФОНТАНИРУЮЩИМ КИПАЩИМ СЛОЕМ**

**THE INCREASING OF THE EFFICIENCY OF
GRANULATION-AGGLOMERATION PROCESS IN
THE SPOUTED BED APPARATUS**

© 2013 Кутняшенко А.И.,

Парфенюк А.С., д.т.н.,

Тасиц Д.И. (ДонНТУ),

Heinrich S., д.т.н., Antonyuk S. (ТУНН)

Kutnyashenko A.I., Parfenjuk A.S., Doctor of

Technical Sciences,

Tasic D.I. (DonNTU)

Heinrich S., Doctor of Technical Sciences,

Antonyuk S., Post Docs (ТУНН)

На основе анализа особенностей процесса гранулирования-агломерации в аппарате с фонтанирующим слоем рассматривается возможность переработки пылевидных фракций различных дисперсных материалов.

Based on the analysis of the features of the granulation-agglomeration process in the spouted bed apparatus the possibility of processing dust fractions of different particulate materials are considering.

Ключевые слова: гранулирование, агломерация, связующее, пыль, фонтанирующий слой, популяционный баланс.

Keywords: granulation, agglomeration, binder, dust, spouted bed, population balance.

Гранулирование и агломерация улучшают такие важные физико-механические параметры любого дисперсного продукта, как сыпучесть, дозируемость и снижение пыления и слеживаемости за счет придания частицам округлой формы и необходимого размера. Гранулирование применяют практически во всех отраслях промышленности. Полученные агломераты из пылевидных фракций можно эффективно утилизировать различными, в том числе и термическими методами, а также использовать в качестве сорбентов для очистки шахтного газа от механических включений [1-3]. Такая технология подготовки пылей к утилизации позволяет решить многие проблемы: прежде всего – загрязнения рабочей среды, а также уменьшить износ оборудования на производстве и снизить потери сырья. Однако этот процесс нуждается в дальнейшем изучении с целью создания эффективного математического описания для разработки и проектирования новых технологий и оборудования. Работы в этом направлении ведутся в техническом университете Гамбурга (ТУНН), а в последние годы исследования по гранулированию дисперсных твердых материалов выполняются совместно при участии сотрудников кафедры машин и аппаратов химических производств Донецкого национального технического университета [2-5].

В процессах гранулирования-агломерации одним из основных факторов объединения и укрепления частиц является наличие связующего. Чаще всего применяют инъекцию жидкого связующего в аппарат, где оно распределяется по поверхности частиц в виде тонких слоев и капель. При столкновении частиц или при их соударении со стенками аппарата-гранулятора формируются жидкие мостики, вызывающие высокие адгезионные силы между твердыми частицами в их контакте.

Теория и практика гранулирования [4] позволила установить, что после образования жидкого мостика процесс может идти в одном из двух направлений (рис. 1):

1. Если после удара частицы обладают энергией, достаточной для преодоления сил адгезии при растяжении жидкого мостика до критической длины, то они отталкиваются друг от друга, разрывая мостик. Жидкая фаза связующего, остающаяся на поверхности частиц, высыхает, образуя твердый слой, на который попадает следующий слой связующего. Процесс образования слоев многократно повторяется, в результате чего гранула увеличивается в размере, образуя слоеобразную структуру.

2. Если энергии удара частиц не хватает для отталкивания или разрыва мостика, тогда под действием сил адгезии частицы слипаются, и жидкие мостики высыхают, образуя твердые мостики. Множество соединенных таким образом микрочастиц образуют агломерат, прочность и другие свойства которого будут зависеть от различных факторов.



Определение критериев агломерации позволит лучше понять механизмы образования гранул и агломератов и правильно подобрать параметры технологии гранулирования полидисперсной системы [1, 3, 4, 6].

Применение процесса гранулирования-агломерации способно разрешить многие современные производственные проблемы, связанные с пылевидными и полидисперсными материалами. Одной из таких проблем является накопление угольной и коксовой пыли на коксохимических и металлургических заводах.

Пылевидные фракции угля и кокса представляют опасность не только как загрязнители окружающей среды. Мелкодисперсная пыль способна подниматься потоками воздуха, находиться во взвешенном состоянии, проникать в подвижные узлы механического оборудования, ухудшая их работоспособность, ускоряя износ и приводя к преждевременному выходу из строя этих узлов. Кроме того, взвешенная в воздухе угольная пыль значительно ухудшает условия труда персонала в помещении цеха. Создание гранул и брикетов из угольной пыли позволит решать эти проблемы [6].

Представленные в настоящей статье эксперименты проводились в институте технологии твердых материалов и частиц (SPE) Гамбургского технического университета на экспериментальной установке фонтанирующего кипящего слоя. Фонтанирующий кипящий слой – это особый вид кипящего слоя, наиболее подходящий для псевдооживления мелких и несферических частиц. Такая технология обеспечивает псевдооживление маленьких и легких частиц, или же систем с широким распределением по размерам, которые могут быть клейкими или иметь несферическую форму [1-4, 7].

Экспериментальный аппарат с фонтанирующим слоем показан на рис. 2. Опытная установка имеет цилиндрическую камеру 1, которая подключена через коническую часть к призматической камере псевдооживления 2 с двумя горизонтальными входами (щелями) для регулируемой подачи газа. Скорость воздуха на входе можно регулировать путем изменения открытия этих щелей h . Поток воздуха, создаваемый всасывающим вентилятором 3, может подогреваться с помощью нагревателя 4. Раствор или расплав, подготовленный в сосуде 5, с использованием перистальтического насоса 6 через шланг, имеющий рубашку обогрева, подают в кипящий слой при помощи двухфазной форсунки 7. Форсунка имеет встроенный нагревающий элемент для нагрева до максимальной температуры $t_{max} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тканевый фильтр 8 отделяет из выходящего воздуха выносимые из кипящего слоя мелкие частицы.



В качестве связующего материала использовался двухпроцентный раствор полимера (hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) Phamacoat), который был заранее подобран для проведения эксперимента по гранулированию угольной пыли [8-10]. В качестве модельного материала для эксперимента использовался оксид алюминия Al_2O_3 (табл. 1) – материал, близкий к угольной пыли по физико-механическим характеристикам (истинная плотность, гранулометрический состав, масса одной частицы и др.).

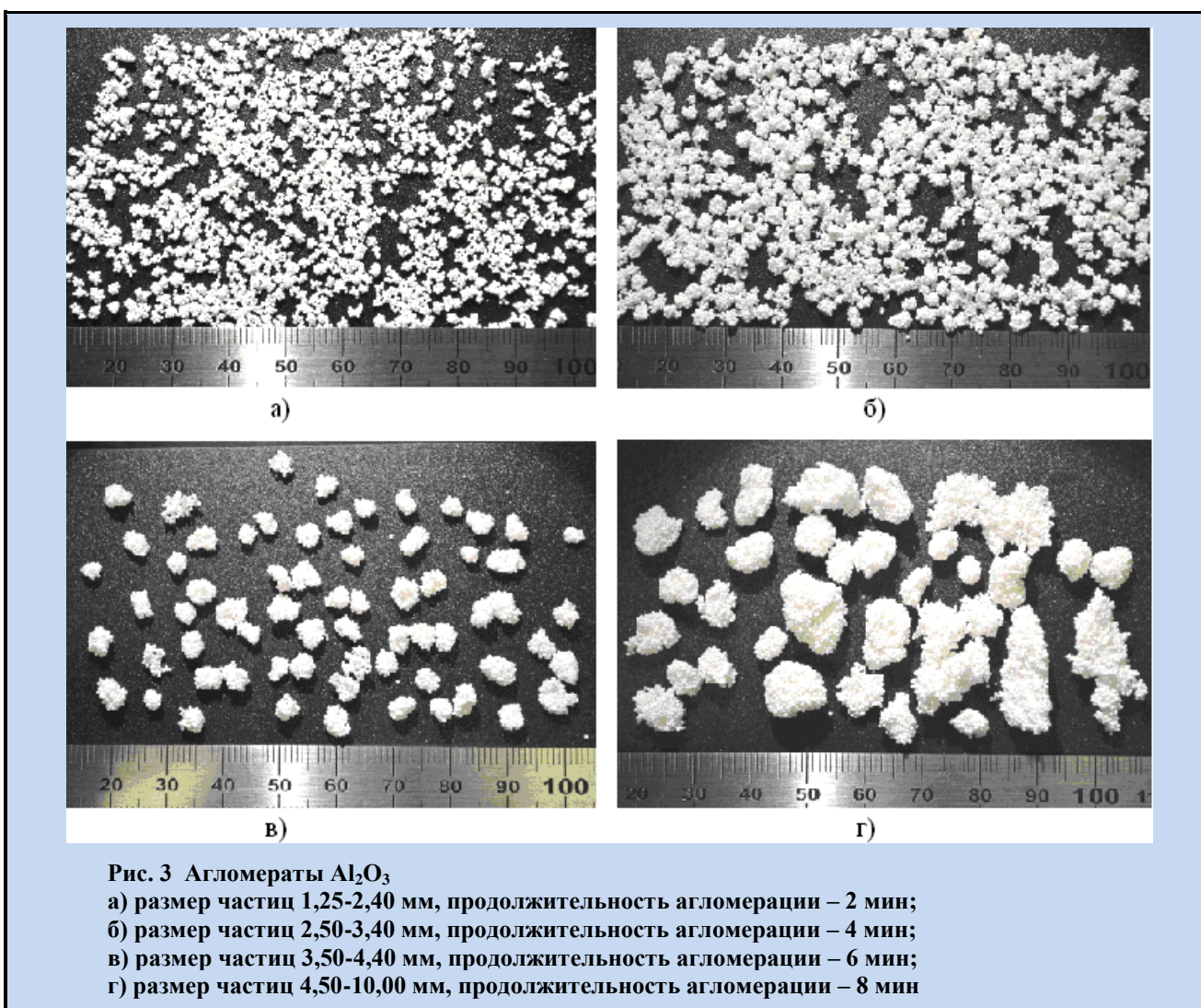
Физико-механические характеристики угольной пыли и оксида алюминия

Показатели	Угольная пыль	Al ₂ O ₃
Истинная плотность, кг/м ³	1400	1040 (4000)
Средний размер частиц, d, мм	0,5-1,8	0,75
Пористость, %	60	75

Таблица 2

Параметры процесса гранулирования-агломерации

Параметры процесса агломерации	Единицы измерения	Численные значения
Расход воздуха, подаваемого на псевдоожижение в аппарат	м ³ /ч	82,9
Расход воздуха через форсунку	м ³ /ч	0,7524 м ³ /ч
Температура в кипящем слое	°С	50
Расход раствора полимера	г/мин	60
Объем раствора полимера, поданного для агломерации	мл	400



При проведении процесса агломерации-гранулирования в аппарате экспериментально изменялись значения расхода воздуха и полимера, а также температурный режим. Это позволило определить необходимые параметры технологического режима для проведения эксперимента по гранулированию модельного материала.

В результате экспериментов получены агломераты различного заданного размера (от 2 до 8 мм), фотографии которых представлены на рис. 3.

Одним из методов описания динамики полидисперсной системы в целом является анализ популяционного баланса частиц в аппарате [7, 11]. Баланс динамики популяций – система интегро-дифференциальных уравнений, которые определяют развитие популяций (концентраций) различных объектов во времени. Популяции характеризуют распределение числа частиц по различным свойствам, в нашем случае – по размеру частиц.

Популяционные балансы обычно используют, чтобы проанализировать динамику изменения системы частиц (популяции) в разных условиях технологического процесса. Чтобы провести такой баланс, необходимы две материальные

функции. Это избирательная функция, которая называется вероятностью разрушения и определяет процент разрушенных частиц, а также функция разрушения, которая позволяет определить размеры фрагментов разрушающихся частиц. Возможности такого подхода были рассмотрены для дробления в струйной мельнице и истирания в пневмотранспортном трубопроводе. Материальные функции позволяют получить результаты ударных взаимодействий частиц с другими частицами и стенками аппарата. Рассмотрение этих моделей позволит выбрать лучшую или даже создать новую модель процесса агломерации.

В ряде предыдущих исследований гранул и агломератов А.Д.Сальман и Д.А.Горам провели множество испытаний степени разрушения во время удара под разными углами. В результате была найдена простая функция, основанная на распределении Вейбулла, которая согласовывалась с большинством проведенных экспериментов:

$$P = 100 - 100 \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^m \right] \quad (1),$$

где P – доля разрушенных частиц, % (избирательная функция); v – скорость соударения, м/с; m – корреляционные параметры.

Недостатком этой модели является отсутствие в ней диаметра частиц в качестве параметра.

В.Пойкерт и Л.Вогель вывели зависимость для вероятности разрушения, опираясь на теорию Герца для контактной деформации и модель усталостного разрушения при циклическом ударе:

$$P = 100 - 100 \exp \left[- f_{\text{Mat}} d \left(n \frac{v^2}{2} \right)^{m/2} \right] \quad (2).$$

Здесь f_{Mat} – эмпирическая материальная функция; d – диаметр частиц; v – скорость соударения.

Эту модель можно связать с моделью А.Д.Сальмана, определив соотношение разрушения как функцию искомой энергии (кинетической энергии на единицу массы), равной $v^2/2$, умноженной на число столкновений n . Константа c может быть определена, как произведение эмпирической материальной функции и частицы $(1/c)m = f_{\text{Mat}} d$.

Анализируя эксперимент с различными материалами, В.Пойкерт и его коллеги определили, что величина показателя уровня искомой энергии была одинакова и равнялась единице для всех материалов.

$$m/2 \cong 1 \quad (3).$$

Другая модель была предложена Д.Кальманом и К.Рейнольдсом для лучшего согласования с результатами экспериментов по степени разрушения, как функция скоростного удара. Эксперименты проводились с частичками каменной соли и поташа, которые воспринимали ударные напряжения от стальных лопастей, закрепленных на вращающемся роторе.

$$P = P_f + \frac{P_i - P_f}{1 + (v/v_{50})^p} \quad (4),$$

где P – вероятность разрушения; P_i – начальная вероятность разрушения; P_f – конечная вероятность разрушения; v – скорость соударения; v_{50} – характерная скорость соударения, при которой разрушается 50 % частиц; p – распределение вероятности разрушения.

Выражение (4) позволяет рассмотреть множество случаев, которые не поддаются описанию традиционными моделями. Степень разрушения P определяется процентным содержанием частиц ниже какого-либо выбранного заранее предела. Для узкого класса размеров частиц установление граничного значения размера, равного начальному, приведет к традиционной избирательной функции. Однако очень часто качество материала определяется процентным содержанием мелкого класса. Поэтому необходимо заранее задать граничный размер и измерять увеличение процента разрушения в отношении с исходным значением ($P_i \neq 0$). Степень разрушения может иметь любое значение для широкого спектра размеров частиц и зависит от выбранного граничного размера. Но для узкого класса размеров частиц всегда справедливо равенство $P_i = 0$, а для большинства однородных материалов, с относительно малым расхождением прочности, все частицы разрушатся, т.е. $P_f = 100$ %. Но для широкого диапазона значений прочности, особенно для исследования смесей материалов, степень разрушения составляет менее 100 % [6, 8, 10].

По результатам предыдущих исследований С.Антонюк предложил зависимость для определения вероятности разрушения, основанную на модели Вейбулла:

$$P = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_{50,3}}{d_0} \right)^2 \left(\frac{W_m}{W_{m,0}} \right)^z \right] \quad (5),$$

где $d_{50,3}$ – средний диаметр гранул; d_0 – характеристическое значение диаметра гранул; W_m – искомая массовая энергия удара; $W_{m,0}$ – характеристическое значение искомой энергии удара; z – параметр дефектов.

Экспериментально установлено, что показатель уровня z характеризует свойства материала и распределение дефектов в грануле.



Рис. 4 Динамика разрушения гранул и агломератов

Параметры W_{m0} и $d_{50,3}$ определяют положение функции вероятности разрушения. Если $z = \text{const}$, то с увеличением W_{m0} распределение смещается вправо. Параметр z определяет подъем кривой вероятности разрушения. Чем меньше значение z , тем шире распределение.

Последняя модель, выведена на основе предыдущих исследований, но является более универсальной и точной, поскольку учитывает большее количество факторов, влияющих на процесс агломерации. Это подтвердили проведенные эксперименты по разрушению агломератов в аппарате с фонтанирующим слоем [9, 11].

Разрушение агломератов в ходе эксперимента происходило за счет столкновения частиц друг с другом, а также частиц со стенкой гранулятора в псевдоожиженном слое. Целью проведения этого эксперимента являлся анализ негативного фактора – разрушения части образованных агломератов, что проявляется в процессе псевдоожижения и образования новых агломератов. Необходимо было рассмотреть, как агломераты разрушаются с течением времени агломерации.

На основе полученных результатов [10] построена диаграмма популяционного баланса, описывающая динамику разрушения частиц (рис. 4).

Как видно из графика, разрушение частиц в процессе гранулирования-агломерации существенно изменяет соотношение количества частиц разных размеров. Моделирование и прогнозирование динамики разрушения и роста частиц при помощи расчета популяционного баланса позволит оптимизировать продолжительность процесса с целью получения необходимого гранулометрического состава [12]. Это, в свою очередь, окажет влияние на насыпную плотность и другие характеристики получаемого продукта и даст возможность повысить эффективность дальнейшей термической переработки продукта [2, 12] и его конечного использования.

Библиографический список

1. Antonyuk S. Impact breakage of spherical granules: experimental study and DEM simulation / S. Antonyuk, M. Khanal, J. Tomas, S. Heinrich, L. Mörl // *Chemical Engineering and Processing*. – 45 (2006). – P. 838-856.
2. Парфенюк А.С. Новый агрегат для переработки твердых отходов / Александр Сергеевич Парфенюк // *Кокс и химия*. – 1999. – № 2. – С. 35-37.
3. Antonyuk S. Discrete Element Study of aerogel particle dynamics in a spouted bed apparatus / S. Antonyuk, S. Heinrich, I. Smirnova // *Chemical Engineering & Technology*. – 35 (2012) 8. – P. 1427-1434.
4. Классен П.В. Основы техники гранулирования / П.В. Классен, И.Г. Гришаев. – М.: Химия, 1982. – 272 с.
5. Парфенюк А.С. Альтернативное решение проблемы твердых отходов в Украине / А.С. Парфенюк С.И. Антонюк, А.А. Топоров // *Экотехнологии и ресурсоснабжение* – 2002. – № 4. – 254 с.
6. Кутняшенко А.И. Некоторые особенности технологии гранулирования-агломерации тонко-дисперсных частиц / А.И. Кутняшенко, А.С. Парфенюк, Д.И. Тасиц, S. Heinrich, S. Antonyuk // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Хімія і хімічна технологія*. – 2011. – Вип. 16 (184). – С. 167-172.
7. Кутняшенко А.И. Особенности гранулирования-агломерации дисперсных частиц / А.И. Кутняшенко, С.И. Антонюк // *Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів. Збірник доповідей XX всеукраїнської наукової конференції аспірантів та студентів*. – 2010. – Том 1. – С. 165-166.
8. Heinrich S. Экспериментальные исследования поведения гранулята при динамических воздействиях / S. Heinrich, S. Antonyuk, А.И. Кутняшенко, А.С. Парфенюк, Д.И. Тасиц, А.И. Сова // *Машиностроение и техносфера*. – 2010. – № 4. – С. 107-111.

9. **Heinrich S.** Coating of aerogels in a spouted fluidized bed apparatus dem modeling of particle dynamics / **S. Heinrich, S. Antonyuk, A. Ershova** // *Машиностроение и техно-сфера*. – 2010. – № 4. – С. 7-11.

10. **Кутняшенко А.И.** К вопросу управления процессом получения гранулированных сорбентов для очистки газа от примесей / **А.И. Кутняшенко, А.С. Парфенюк, А.Е. Караченцев, S. Heinrich, S. Antonyuk** // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Хімія і хімічна технологія*. – 2013. – Вип. 2 (21). – С.179-189.

11. **Кутняшенко А.И.** Моделирование процесса агломерации тонкодисперсных фракций твердых отходов / **А.И. Кутняшенко, А.С. Парфенюк** // *Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів: збірка доповідей XX всеукр. наук. конфер. аспірантів та студентів, 13-15 квітня 2010 р.* – Донецьк, 2010. – Т. 1. – С. 165-166.

12. **Парфенюк А.С.** Определение режима подготовки компаунд-смесей углеродистых промбытотходов к термолizu / **А.С. Парфенюк, С.И. Антонюк** // *Наукові праці ДонНТУ, Серія: Хімія і хімічна технологія*. – 2001. – Вип. 33. – С. 92-96.

Рукопись поступила в редакцию 11.06.2013