

## Литература

1. Шойхет Б.А. Улучшение седиментационных и фильтрационных свойств рапной гидроокиси магния / Б.А. Шойхет, С. М. Карасик, Л.Я. Ульянова // Тр. ГИПХ. — 1966. — № 55. — С. 43–56.
2. Ставров С.Н. Улучшение седиментационных и фильтрационных свойств гидроокиси магния / С.Н. Ставров, В. Д. Тодираш // Хим. пром-ть Украины. — 1970. — № 1. — С. 6–8.
3. Посторонко А.И. Применение поверхностно-активных веществ для улучшения седиментационных и фильтрационных свойств гидроокиси магния / А.И.Посторонко, В.С. Ривный, Ю.М. Волков // В кн.: Вопросы химии и химической технологии: Харьков, 1974. — Вып. 36. — С. 123–126.
4. Посторонко А.И. Исследование устойчивости суспензии гидроокиси магния в присутствии добавок ПАВ.— В кн.: Вопросы химии и химической технологии: Харьков, 1974. — Вып. 36. — С. 69–72.
5. Посторонко А. И. Исследование влияния солей четвертичных аммониевых оснований на устойчивость суспензии гидроокиси магния // Химическая технология. — 1984. — № 5. — С. 22–25.
6. Савицька М.М. Нові коагулянти для прискорення очистки розсолів у содовому виробництві / М.М. Савицька, Ю.Д. Холодова, А.І. Посторонко, А.П. Гризодуб // Хімічна промисловість. — 1963. — № 3. — С. 32–35.
7. Коростылева Р.Н. Изучение реакции прививки метилакрилата на полиакриламид / Р.Н. Коростылева, С.И. Трахтенберг, Р.В. Визгерт // Изв. вузов. Химия и химическая технология. — 1970. — Т. 13, № 80. — С. 1203–1206.

© Посторонко А.И., 2011

Надійшла до редколегії 22.09.2010

УДК 628.54+628.47

**А.И. Кутняшенко, А.С. Парфенюк, Д.И. Тасиц (ДонНТУ), S. Heinrich, S. Antonyuk (ТУНН)**

### НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ГРАНУЛИРОВАНИЯ-АГЛОМЕРАЦИИ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

*В статье рассматривается влияние факторов процесса гранулирования на параметры выходного материала, определена математическая модель, позволяющая рассчитать свойства получаемых частиц, а также на основе опытных экспериментов проанализирована возможность гранулирования дисперсных твердых отходов.*

*Ключевые слова: гранулирование, агломерация, связующая жидкость, частица, твердые отходы.*

Процессы гранулирования–агломерации улучшают такие важные физико-механические параметры любого дисперсного продукта как сыпучесть, дозируемость и снижение слеживаемости за счет придания частицам округлой формы и необходимого размера. Гранулирование применяют практически во всех отраслях промышленности, но этот процесс нуждается в дальнейшем изучении с целью создания эффективного математического описания для разработки и проектирования новых технологий и оборудования. Работы в этом направлении давно уже ведутся в техническом университете Гамбурга (ТУНН) [1, 2], а также в Магдебургском техническом университете [3]. Вопросы

гранулирования и компактирования дисперсных твердых отходов изучается также в Донецком национальном техническом университете (ДонНТУ) применительно к их термолизно-энергетической переработке [4, 5]. В последние годы исследования по гранулированию дисперсных твердых материалов в ТУНН выполняются при участии сотрудников кафедры машин и аппаратов химических производств ДонНТУ [6].

Для усовершенствования процесса гранулирования-агломерации необходимы практические исследования. Эксперименты по исследованию особенностей процесса гранулирования проводились на пилотной установке-грануляторе с псевдоожиженным слоем (рис. 1).

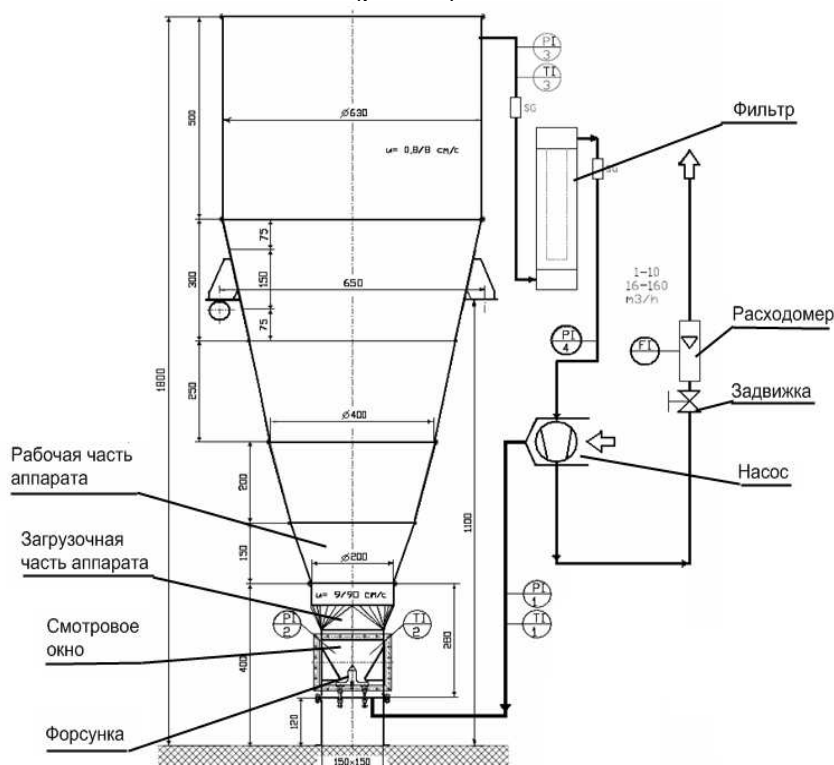


Рис. 1. Схема экспериментальной установки-гранулятора

Целью исследований являлось определение влияния факторов процесса гранулирования (расход воздуха, расход связующего, температура псевдоожиженного слоя) на параметры материала на выходе (форма, размер и другие свойства частиц), что позволило бы создать математическую модель и рассчитать свойства получаемых частиц и проанализировать возможность гранулирования дисперсных твердых отходов даже в качестве энергетического топлива [7].

В качестве модельного материала для исследований использовали тонкодисперсные частицы аэрогеля на основе кремния, на который наносили связующее для образования гранул. Частицы аэрогеля обладают свойствами, схожими со свойствами дисперсных частиц твердых отходов [8]. В ходе опытов исследовали зависимость эффективности процесса гранулирования и качества покрытия связующим от условий процесса гранулирования [9].

При проведении процесса нанесения покрытия в аппарате изменяли расход полимерного связующего и температурные режимы обогрева псевдоожиженного слоя [10].

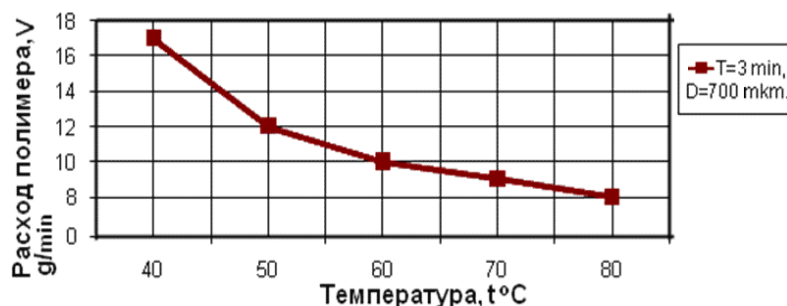
Температуру слоя измеряли с помощью термодатчиков, расположенных внутри аппарата.

На основе предыдущих исследований для предотвращения застывания отдельных капель полимера до попадания на поверхность покрываемых частиц и массового слипания уже покрытых гранул, т.е. по существу неконтролируемой агломерации, была выбрана температура кипящего слоя 60°C. Некоторые параметры процесса приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Параметры процесса нанесения покрытия связующего на поверхность частиц

Параметр	Интервал значений
Расход воздуха на псевдооживление, м <sup>3</sup> /ч	15-60
Расход воздуха через форсунку, л/мин	5-15
Температура в форсунке при подачи полимера, °C:	30-80
Расход полимера, г/мин	5-25
Плотность покрываемого материала, кг/м <sup>3</sup>	150-220

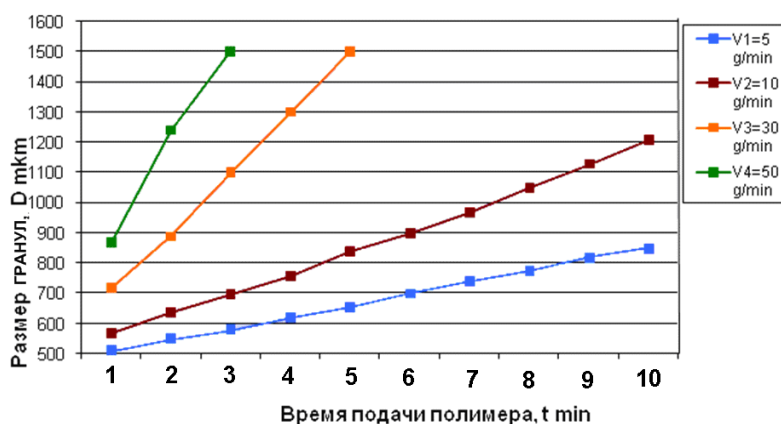
Исследования зависимости объемного расхода полимера от температуры псевдооживленного слоя показали, что с увеличением температуры происходит многократное уменьшение расхода покрывающей жидкости (рис. 2).



**Рис. 2.** Зависимость объемного расхода полимера от температуры псевдооживленного слоя для одинакового времени протекания процесса и стабильного размера частиц ( $T = \text{const}$ ,  $D = \text{const}$ )

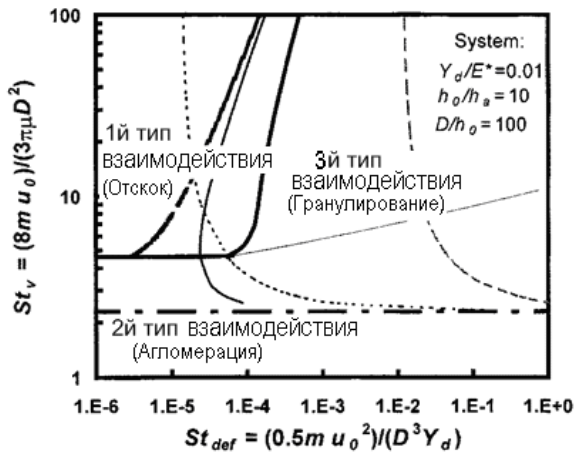
С увеличением расхода полимера возрастает скорость нанесения покрытия и, соответственно, скорость роста гранул. Однако при достижении некоторого порогового значения объемного расхода полимер на поверхности частиц не успевает высохнуть, гранулы слипаются, происходит процесс агломерации и даже образование конгломератов [11].

В данном конкретном случае было установлено значение объемного расхода связующего (25–30 г/мин), который позволяет получить необходимую толщину покрытия и предотвращает возможность слипания частиц с неконтролируемым образованием агломератов и конгломератов.



**Рис. 3.** Влияние расхода полимера  $V$  на рост гранул  $D$

Непосредственное влияние расхода полимера на рост гранул исследовали путем изменения времени подачи и объемного расхода связующего, контролируя при этом размер получаемых частиц (рис. 3). Диаметр частиц измеряли электронным растровым микроскопом.



**Рис. 4.** К определению типа взаимодействия частиц при соударении:

1 тип взаимодействия – отскок частиц при соударении; 2 тип взаимодействия – слипание гранул без деформации поверхности частиц; 3 тип взаимодействия – слипание частиц с деформацией поверхности частиц

взаимодействия). При взаимодействии частиц без деформации поверхностей самого материала происходит процесс агломерации, т.е. частицы слипаются только за счет контакта покрывающего их слоя связующего. Такие образования отличаются хрупкостью и зачастую не имеют правильной формы (2й тип взаимодействия). При взаимодействии же частиц с деформацией поверхностей получают прочные гранулы правильной формы и их равномерным покрытием (3й тип взаимодействия).

В математическом описании процесса гранулирования-агломерации критерии Стокса  $St_v$  и  $St_{def}$  рассчитаны по формулам:

$$St_v = \frac{(8mu_0)}{(3\pi\mu D^2)},$$

$$St_{def} = \frac{(0,5mu_0^2)}{(D^3 Y_d)},$$

где  $m$  — масса частицы;  $u_0$  — скорость удара частицы;  $\mu$  — динамическая вязкость связующего;  $D$  — диаметр частицы;  $Y_d$  — предел текучести материала частицы.

Для конкретных параметров процесса гранулирования-агломерации области взаимодействия частиц на графике будут выглядеть по-разному, так как функции, описывающие линии границ различных типов взаимодействий, зависят от свойств частиц.

Так, график, описывающий границу слипания гранул до соударения поверхностей частиц (2-й тип взаимодействия), соответствует функции:

$$St_v < l,$$

где  $h_0$  — толщина нанесенного слоя покрытия;  $h_a$  — шероховатость поверхности частицы.

Функция взаимодействия сферических частиц:

$$St_v = \left(1 + \frac{1}{e}\right) \ln\left(\frac{h_0}{h_a}\right),$$

где  $e$  — коэффициент восстановления при ударе ( $e = \frac{U_1}{U_2}$ ).

Главная функция, которая описывает линию границы между слипанием и отскоком частиц:

$$\left(\frac{Y_d}{E^*}\right)^{1/2} (St_{def})^{-9/8} < \frac{0,172}{St_v} \left(\frac{D}{h_0}\right)^2 \left[1 - \frac{1}{St_v} \ln\left(\frac{h_0}{h_a}\right)\right]^{5/4} \times \left[\left(\frac{h_0^2}{h_a^2} - 1\right) + \frac{2h_0}{\delta''} \left(\frac{h_0}{h_a} - 1\right) + \frac{2h_0^2}{(\delta'')^2} \ln\left(\frac{h_0}{h_a}\right)\right] \times \left\{1 - 7,36 \left(\frac{Y_d}{E^*}\right) (St_{def})^{-1/4} \left[1 - \frac{1}{St_v} \ln\left(\frac{h_0}{h_a}\right)\right]^{-1/2}\right\}^2,$$

где  $E^*$  — модуль упругости материала частиц;  $\delta''$  — величина пластической деформации ( $\delta'' = \delta^* - \delta$ ).

В качестве значений для теоретических расчетов были выбраны среднестатистические данные характеризующие твердые частицы малой крупности, близкие по свойствам дисперсным частицам твердых отходов [8] (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики частиц отходов

Средний диаметр частицы, $D$ м;	$8 \cdot 10^{-4}$
Толщина нанесенного слоя покрытия, $h_0$ м;	$0,1 \cdot 10^{-4}$
Величина шероховатости поверхности частицы, $h_a$ м;	$0,07 \cdot 10^{-4}$
Скорость удара частицы, $u_1$ м/с;	0,3
Скорость отскока частицы, $u_2$ м/с;	0,4
Предел текучести материала, $Y_d$ Па;	$0,2 \cdot 10^6$
Модуль упругости материала, $E^*$ Па;	$1 \cdot 10^6$
Максимальное сжатие (деформация) $\delta^*$ м.	$0,08 \cdot 10^{-4}$

Подставив значения характеристик в формулы, получим график, позволяющий прогнозировать характер протекания процесса гранулирования-агломерации (рис. 5):

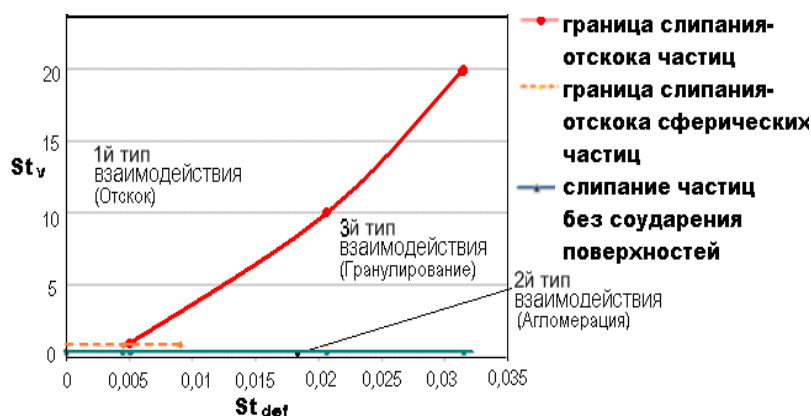


Рис. 5. К определению типа динамического взаимодействия частиц

При этом значения критериев Стокса  $St_v$  и  $St_{def}$  имеют значения:

$$St_v = 11,942675; St_{def} = 0,0316.$$

Значения критериев  $St_v$  и  $St_{def}$  показывают, что частицы материала при взаимодействии образуют прочные гранулы. Это подтвердили опыты с модельным материалом.

В результате экспериментов с модельным материалом были определены параметры режима гранулирования применительно к дисперсным твердым отходам. Полученные в процессе экспериментальных исследований зависимости влияния расхода связующего на рост частиц позволяют определить режимы процесса гранулирования для получения размера гранул необходимой величины.

Приведенный подход к анализу особенностей процесса гранулирования позволяет прогнозировать характер взаимодействия частиц и управлять процессом, в том числе гранулированием-агломерацией дисперсных частиц твердых отходов.

### Литература

1. Heinrich S., Peglov M., Ihlow M., Henneberg M., Morl L.: Analysis of the start-up process in continuous fluidized bed spray granulation by population balance modeling. Chem. Eng. Sci. 57 (2002) 20, 4369-4390
2. Heinrich S. Coating of aerogels in a spouted fluidized bed apparatus dem modeling of particle dynamics / Heinrich S., Antonyuk S., Ershova A. // *Машиностроение и техносфера*. — 2010. — № 4. — С. 7–11.
3. Morl L. Fluidized Bed Spray Granulation. Handbook of powder technology / Morl L., Heinrich S. and Peglow M. // *Granulation*. — 2007. — V. 11. — P. 21–189.
4. Парфенюк А.С. Определение режима підготовки компаунд-смесей углеродистых промбытотходов к термолізу / А.С. Парфенюк, С.И. Антонюк // *Наукові праці ДонНТУ, Серія: Хімія і хімічна технологія*. — 2001. — Вип. 33. — С. 92–96.
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. — С. 254.
6. 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.
7. Гонопольский А. М. Твердые бытовые отходы как энергетическое топливо / Гонопольский А. М., Федоров Л. Г. и др. // *Сб. докладов Международной конференции «Инженерная защита окружающей среды»*. — М., 2002. — С. 56–60.
8. Меньшутина Н. В. Наночастицы и наноструктурированные материалы для фармацевтики / Меньшутина Н. В. — Калуга: Изд-во Н.Ф. Бочкаревой, 2008. — 192 с.
9. Rajonk G. M. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. — 1998. — № 225. — P. 307–314.
10. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / Касаткин А.Г. — М., 2005. — 753 с.
11. Классен П.В. Основы техники гранулирования / Классен П.В., Гришаев И.Г. — М., 1982. — 272 с.
12. Hapgood K. P., Iveson S. M., Litster J. D., Liu L. X. Granulation Rate Processes: Chapter 20. — 2007. — P. 898–962.

© Кутняшенко А.И., Парфенюк А.С., Тасиц Д.И., Heinrich S., Antonyuk S., 2011

Надійшла до редколегії 24.02.2011