

Дорогой Е. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина,
evgeniy.dorogoy@gmail.com)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОКОМКОВАНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ БОЛЬШОЕ КОЛИЧЕСТВО ТОНКОИЗМЕЛЬЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ. СООБЩЕНИЕ 2: МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ, РОСТА И РАЗРУШЕНИЯ ГРАНУЛ ПРИ ОКОМКОВАНИИ

В статье рассмотрена современная теория образования зародышей из тонкоизмельченных материалов, их рост и разрушение в процессе мокрого гранулирования на движущейся поверхности. Показана важность этих процессов в условиях недостатка центров окомкования, который наблюдается при окомковании агломерационной шихты, содержащей большое количество тонкоизмельченных материалов. Приведены выводы и направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: окомкование, зародышеобразование, рост гранул, разрушение гранул, тонкоизмельченные материалы.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Изучение процесса мокрого гранулирования (окомкования) дисперсных материалов на движущейся поверхности, к которому относится окомкование агломерационной шихты, базируется на закономерностях, полученных эмпирическим путем [1]. Несмотря на то, что окомкование является предметом исследования отечественных и зарубежных ученых на протяжении более чем 50-ти лет, в настоящее время не существует четко оформленной теории образования, роста и разрушения гранул.

Этим обусловлено зачастую низкое качество получаемого продукта, трудности, а иногда и полная невозможность масштабирования результатов лабораторных исследований на промышленные установки. В свою очередь, при изменении шихтовых условий или требований к конечному продукту (гранулам) для отработки технологии окомкования используется дорогостоящее лабораторное и полупромышленное оборудование, увеличиваются финансовые и временные затраты на ввод новой технологии в эксплуатацию [2].

Понимание и строгое математическое описание трех важнейших явлений, происходящих при окомковании (образование, рост и разрушение гранул) является необ-

ходимым условием для ведения эффективного процесса окомкования, характеризующегося высоким качеством получаемого гранулята и низкими затратами на процесс, разработки новых технологий, оборудования и оперативного управления технологическим процессом окомкования.

Экономия материальных, финансовых и временных ресурсов, которая становится возможной при условии строгого научного подхода к созданию и использованию технологий окомкования, является важной частью многих государственных программ развития металлургической отрасли Украины [3; 4].

Постановка задачи. Данная работа является второй из цикла статей, посвященных современному состоянию вопроса окомкования агломерационной шихты, содержащей большое количество тонкоизмельченных материалов.

Задачей данной работы является анализ современной теории образования, роста и разрушения гранул в ходе процесса мокрого гранулирования дисперсных материалов на движущейся поверхности (применительно к окомкованию агломерационной шихты) с целью обоснования необходимости в дальнейших исследованиях процесса и разработки новых технологий

окомкования, обеспечивающих наперед заданные свойства получаемых гранул.

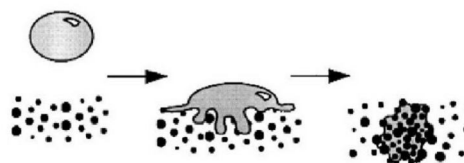
Изложение материала и его результаты. Ход процесса окомкования зависит от нескольких составляющих: свойств окомковываемого материала (смачиваемость, крупность), связующего вещества (поверхностное натяжение, вязкость) и технологических параметров процесса (тип окомкователя и параметры его работы) [2; 5]. Эффективное окомкование возможно лишь при организации таких условий, когда потенциальная склонность шихты окомковываться реализуется путем выбора технологических параметров процесса, обеспечивающих эффективное образование, рост и удаление гранул из окомкователя.

Ключевыми стадиями (рисунок 1), определяющими все вышеперечисленные составляющие при окомковании тонкоизмельченных материалов, являются [2; 5; 6]:

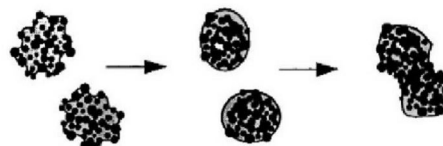
- увлажнение и зародышеобразование, когда жидкое связующее попадает на слой сыпучего материала, проникает в него и образует зародыши гранулы;
- уплотнение и рост, когда зародыши вступают во взаимодействие между собой, с сухим материалом и стенками окомкователя;
- истирание и разрушение, когда гранулы разрушаются в процессе окомкования в результате взаимодействия с другими гранулами и стенками окомкователя.

Стоит отметить, что гранулообразование по такой схеме происходит в случае недостатка центров окомкования, т.е. в случае окомкования агломерационной шихты, содержащей большое количество тонкоизмельченных материалов. При окомковании грубозернистой шихты присутствует определенное количество гранул, зародыши которых образованы из тонкоизмельченных материалов, но в основном в качестве зародышей выступают кусочки руды, возврата, известняка и пр.

Увлажнение и зародышеобразование (1)



Уплотнение и рост (2)



Истирание и разрушение (3)

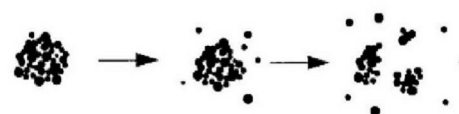


Рисунок 1 – Ключевые стадии гранулообразования при окомковании тонкоизмельченных материалов

Стадия увлажнения и зародышеобразования является важным этапом в процессе гранулообразования и заключается в подаче жидкого связующего на слой сыпучего материала, проникновении связующего в слой с образованием зародыша [7]. Данная стадия проходит в зоне увлажнения, а размер конечной гранулы окомкованной шихты зависит от характера ее протекания. На образование зародыша сильное влияние оказывают термодинамические и кинетические показатели процесса увлажнения, а эффективность взаимодействия связующего и сыпучего материала определяется технологическими параметрами процесса.

Термодинамика процесса увлажнения в данном случае характеризуется двумя величинами: краевым углом смачивания и коэффициентом растекания. Многочисленными исследованиями установлено [2; 5], что с увеличением величины краевого угла смачивания (т.е. с ухудшением смачиваемости сыпучего материала) средний диаметр образующихся зародышей уменьшается. Увлажнение и зародышеобразование может быть описано с исполь-

зованием величины свободной энергии поверхности. Коэффициент растекания λ является мерой измерения способности связующего (жидкая фаза) и сыпучего материала (твердая фаза) распространяться по поверхности друг друга, и зависит от работы сил адгезии и когезии. Уравнения работы когезии для сыпучего материала (1), работы когезии для связующего (2) и работы адгезии на границе «связующее-сыпучий материал» (3а и 3б) приведены ниже [2]

$$W_{КТ} = 2\gamma_{ТГ}, \quad (1)$$

$$W_{КЖ} = 2\gamma_{ЖГ}, \quad (2)$$

$$W_A = \gamma_{ТГ} + \gamma_{ЖГ} - \gamma_{ТЖ}, \quad (3а)$$

$$W_A = \gamma_{ЖГ}(\cos \theta + 1), \quad (3б)$$

где $W_{КТ}$ – работы когезии для сыпучего материала;

$W_{КЖ}$ – работы когезии для связующего;

W_A – работы адгезии на границе «связующее-сыпучий материал» ;

γ – свободная энергия системы;

θ – краевой угол смачивания системы «связующее-сыпучий материал»;

Т, Ж и Г – индексы, обозначающие твердую, жидкую и газообразную фазы соответственно.

Уравнение 3б получено на основе уравнения Юнга-Дюпре и справедливо для случая, когда $\theta > 0^\circ$.

Коэффициент растекания λ для каждой фазы рассчитывается с помощью следующих уравнений [2]

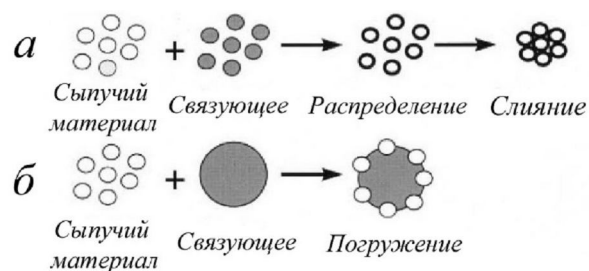
$$\lambda_{ЖТ} = W_A - W_{КЖ}, \quad (4)$$

$$\lambda_{ТЖ} = W_A - W_{КТ}. \quad (5)$$

В случае, когда $\lambda_{ЖТ}$ принимает положительное значение, связующее образует пленку на поверхности частиц сыпучего материала, а между большинством контактирующих частиц образуются мостики из жидкости, что способствует образованию прочных, плотных гранул. В случае, когда

положительным является $\lambda_{ТЖ}$, происходит образование непрочных и пористых зародышей, обусловленное затруднением проникновения связующего в слой и образованием пленки на поверхности частиц сыпучего материала. Методы определения краевого угла смачивания, работы адгезии и когезии известны и широко используются [8].

После начала увлажнения связующее проникает сквозь поры в сыпучем материале, а его излишек выдавливается на поверхность гранул по мере их роста. Отношение размера капли связующего к частице сыпучего материала влияет на механизм зародышеобразования [9]. Если частица материала больше, чем капля (рисунок 2а), то происходит *распределение* капель по поверхности частиц с объединением последних. Если капля связующего больше, чем частица материала (рисунок 2б), то происходит *погружение* частиц в каплю.

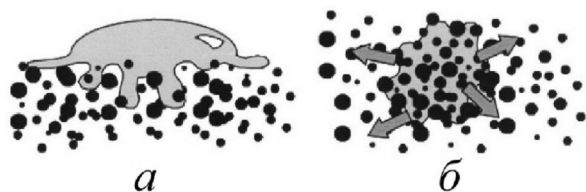


а – частица материала больше капли связующего;
б – частица материала меньше капли связующего;

Рисунок 2 – Механизм образования зародышей в зависимости от отношения размера капли связующего к размеру частицы сыпучего материала

Кинетика образования зародышей зависит от размеров капель связующего и частиц сыпучего материала. Схема образования зародыша приведена на рисунке 3.

При окомковании тонкоизмельченной агломерационной шихты капли связующего, как правило, больше, чем частицы сыпучего материала.



а – начальный период проникновения капли в слой;
б – распространение связующего внутри слоя сыпучего материала

Рисунок 3 – Схема образования зародыша при попадании капли связующего на слой дисперсного материала.

Время проникновения капли в слой сыпучего материала рассчитывается по формуле [10]:

$$\tau_{\text{прон.}} = \frac{2V_0^2}{\pi^2 \varepsilon^2 r_k^4 R_{\text{пор}}} \cdot \frac{\mu}{\gamma_{\text{ж}} \cos \theta}, \quad (6)$$

где V_0 – полный объем капли;

r_k – радиус капли;

ε – пористость слоя сыпучего материала;

$\gamma_{\text{ж}}$ – поверхностное натяжение жидкости;

μ – вязкость жидкости;

θ – краевой угол смачивания;

$R_{\text{пор}}$ – эффективный радиус пор.

Большое влияние на процесс зародышеобразования оказывает характер ввода связующего в слой сыпучего материала. Постоянный во времени характер ввода позволяет получать зародыши одинакового размера. В практике агломерационного производства используются два способа ввода связующего в слой материала [10]: струйный и капельный. Существует три технологических параметра, характеризующих характер ввода связующего: размер капли, расход связующего и размер зоны увлажнения.

При струйном вводе наблюдается образование крупных, переувлажненных гранул, в то время как при капельном гранулометрический состав образовавшихся зародышей сдвигается в сторону более мелких фракций. Зависимость размера зародыша от размера капли связующего имеет вид [11]:

$$d_z = d_k^n, \quad (7)$$

где d_z – диаметр зародыша;

d_k – диаметр капли;

n – коэффициент корреляции.

Для хорошо комкующихся сыпучих материалов $n = 0,8-0,9$. С ростом расхода связующего средний размер зародышей увеличивается, что подтверждается результатами работы [11]. С ростом расстояния между увлажняющим устройством и поверхностью материала увеличивается зона увлажнения. Это уменьшает вероятность слипания капель связующего на пути к поверхности материала, увеличивает однородность гранулометрического состава образующихся зародышей.

Очень важное значение имеет количество материала, проходящее через зону увлажнения в определенный промежуток времени. Так, увеличение этого параметра приводит к уменьшению среднего размера образующихся зародышей.

Количественно интенсивность увлажнения можно оценить с помощью следующего уравнения [12]

$$\Psi = \frac{3V}{2Ad_k}, \quad (8)$$

где Ψ – интенсивность увлажнения;

V – объемный расход связующего;

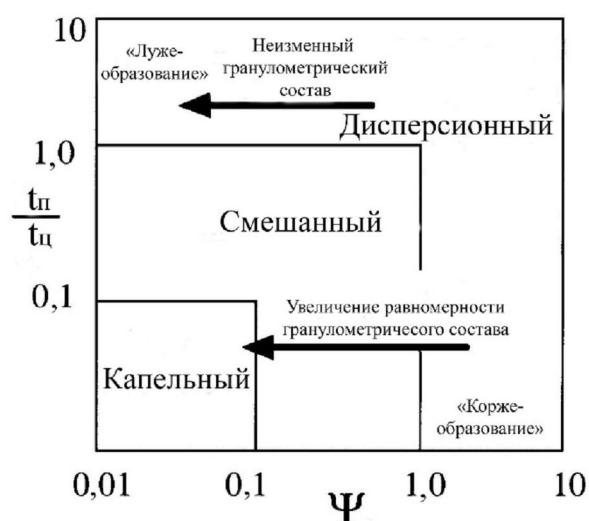
d_k – диаметр капли;

A – площадь зоны увлажнения.

Высокое значение Ψ указывает на то, что связующее подается слишком быстро, в результате чего происходит слипание капель на поверхности материала, гранулометрический состав зародышей становится непредсказуем. Низкое значение данного параметра говорит о рациональном распределении капель связующего по поверхности материала, когда каждая капля ложится на поверхность отдельно, а образовавшиеся зародыши удаляются из зоны увлажнения быстрее, чем переувлажняются следующей каплей. Другими сло-

вами, при низком значении Ψ одна капля образует один зародыш, что облегчает управление процессом зародышеобразования [12].

Зародышеобразование (рисунок 4) зависит как от поведения отдельной капли на поверхности сыпучего материала (например, время проникновения зависит от краевого угла смачивания и других свойств сыпучего материала), так и от взаимодействия капель между собой (например, изменение характеристик зоны увлажнения путем управления подачей связующего) [13].



t_n – время проникновения капли в слой;

t_{ψ} – время перемешивания слоя;

Ψ – интенсивность увлажнения;

Рисунок 4 – Карта режимов зародышеобразования

В зависимости от того, какой из этих механизмов преобладает, зародышеобразование идет по одному из трех режимов [14]: капельному, дисперсионному и смешанному. В капельном режиме размер образовавшегося зародыша зависит преимущественно от размеров капли связующего, а одна капля образует один зародыш. Этот режим реализуется при соблюдении двух условий: быстрое движение материала через зону увлажнения, предотвращающее слипание капель связующего («коржеобра-

зование») и полное проникновение капли в слой с образованием зародыша до того, как произойдет перемещение слоя и взаимодействие с другими частично впитавшимися каплями. В случае, когда связующее плохо проникает в слой (обладает высокой вязкостью или плохо смачивает поверхность) на его поверхности образуется «лужа», и процесс гранулообразования становится независим от свойств капли и переходит в дисперсионный режим. Зародышеобразование при этом зависит от механического перемешивания слоя.

Смешанный режим сочетает в себе признаки капельного и дисперсионного, и является наиболее трудноуправляемым.

Стадия роста гранул является следующей после стадии зародышеобразования. Процесс роста гранулы, характеризующийся слипанием нескольких зародышей называется *коалесценцией*, в то время как накатывание тонкоизмельченного материала на зародыш называется *наслаиванием*. Рост гранул начинается практически одновременно с зародышеобразованием и заканчивается с прекращением подачи связующего или его выхода на поверхность из центра гранулы [15]. Рост гранул зависит от многих параметров процесса окомкования, в первую очередь от механических свойств зародышей и наличия связующего на их поверхности. В процессе окомкования механические свойства зародышей изменяются, что связано с изменением количества жидкости в поровом пространстве, оказывая значительное влияние на рост гранул.

Гранула ококовываемой шихты может находиться в нескольких состояниях насыщения жидкостью [16; 17] (рисунок 5): *маятниковом, канатном, капиллярном, капельном, псевдокапельном*. В процессе окомкования гранула может проходить все стадии насыщения от маятникового до капельного.

Прочность влажной гранулы определяется двумя составляющими: прочностью жидкостных мостиков и силами межчастичного трения.



Рисунок 5 – Различные стадии насыщения пор жидкостью

Жидкостные мостики обеспечивают существование сил как статической, так и динамической прочности. Статическую прочность обеспечивают силы капиллярного всасывания и силы поверхностного натяжения жидкости. Сила капиллярного всасывания $\Delta P_{\text{кап}}$ описывается уравнением Лапласа-Юнга

$$\Delta P_{\text{кап}} = \frac{2\gamma_{\text{жс}}}{r} = \gamma_{\text{жс}} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (9)$$

где $\gamma_{\text{жс}}$ – поверхностное натяжение жидкости;

r_1 и r_2 – радиусы кривизны поверхности мениска.

В настоящее время существует несколько мнений [18; 19] о том, в каком месте необходимо измерять силу поверхностного натяжения и силу капиллярного всасывания (рисунок 6): в середине «моста» (метод «горловины») или по линии контакта с одной из сфер (граничный метод).

$$F_{\text{горл.}} = \pi \Delta P r_2^2 + 2\pi r_2 \gamma_{\text{жс}}, \quad (10)$$

$$F_{\text{гран.}} = \pi \Delta P a^2 \sin^2 \phi + 2\pi a \sin(\phi) \sin(\theta + \phi), \quad (11)$$

Численное решение уравнения Лапласа-Юнга для случая, когда $V/a^3 < 0,001$ (где V – объем жидкостного мостика) имеет вид

$$\frac{F}{2\pi a \gamma_{\text{жс}}} = \frac{\cos \theta}{1,0 + 2,1 \left(\frac{h^2 a}{V} \right) + 10,0 \left(\frac{h^2 a}{V} \right)}. \quad (12)$$

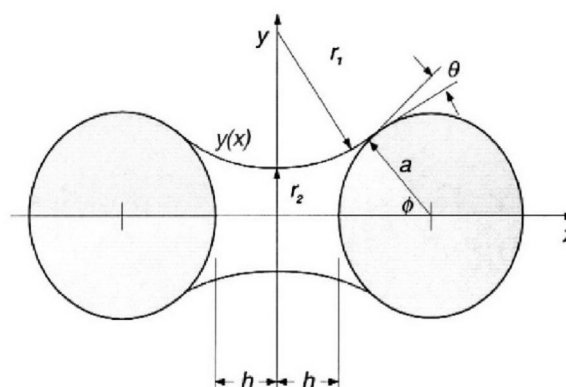


Рисунок 6 – Схема жидкостного мостика между двумя одинаковыми сферами

Нормальная сила, обусловленная наличием жидкостных мостиков, является активатором сил трения между частицами дисперсного материала.

Прочность гранул уменьшается с уменьшением силы поверхностного натяжения связующего. Для гранулы в канатном и капиллярном состоянии предел прочности на разрыв определяется по формуле [20]

$$\sigma_{\text{разр.}} = SC \frac{1 - \varepsilon \gamma_{\text{жс}} \cos \theta}{\varepsilon d_z}, \quad (13)$$

где S – степень заполнения пор жидкостью;

C – константа (для сферы $C = 6$);

ε – пористость гранулы;

d_z – диаметр гранулы;

$\gamma_{\text{жс}}$ – поверхностное натяжение жидкости;

θ – краевой угол смачивания.

В то же время, уравнение не совсем справедливо для гранул из тонкоизмель-

ченного материала [21]: в случае зернистой шихты прочность гранулы растет вплоть до полного заполнения пор жидкостью, в то время как для тонкоизмельченного материала максимальная прочность наблюдается при заполнении пор на 20-30 % от максимально возможного значения, после чего начинает стремительно падать.

Динамическая прочность гранул в маятниковом состоянии F_D рассчитывается по формуле [22]

$$F_D = \frac{3\pi\mu r_z^2}{2h} \frac{dh}{dt}, \quad (14)$$

где r_z – радиус гранулы;

$2h$ – расстояние между гранулами.

В течении всего процесса окомкования гранулы подвергаются столкновениям с другими гранулами и элементами окомковательного оборудования. Это приводит к уменьшению их размера и пористости, выходу воздуха и связующего на поверхность гранулы. Пористостью гранулы определяется ее прочность: чем пористость выше, тем прочность ниже.

Вначале пористость гранулы падает довольно быстро, со временем стабилизируясь на определенном уровне [23; 24]. Это явление описывается уравнением

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\min}} = \exp(-kN), \quad (15)$$

где ε – средняя пористость гранул после N оборотов барабана;

ε_0 – начальная средняя пористость шихты;

ε_{\min} – минимальная пористость при данных условиях окомкования;

k – константа степени укрупнения гранулы.

Связующее оказывает комплексное воздействие на процесс гранулообразования [25]. Так, увеличение количества связующего с низкой вязкостью (например, воды) стимулирует процесс роста гранулы и увеличивает ее прочность. Это связано со «смазывающим» действием жидкости, по-

зволяющим частицам внутри гранулы перестраиваться в более компактные упаковки. Вязкое связующее оказывает противоположное действие на рост гранул. Уменьшение поверхностного натяжения связующего увеличивает возможность слипания зародышей, но, в то же время, прочность таких связей снижается. Начальный размер зародышей также оказывает влияние на рост гранулы. Крупные зародыши слипаются хуже, чем мелкие. При этом пористость гранул из мелких зародышей оказывается ниже, чем из крупных, а жидкость из них выходит медленнее, что замедляет процесс гранулообразования. Увеличение скорости вращения окомкователя также способствует слипанию зародышей, но, в то же время приводит к повышенному их разрушению. Иными словами, все факторы, способствующие повышению степени консолидации гранул увеличивают их прочность. Степень консолидации выражается уравнением [25]

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} \cong - \left\{ 1 - \frac{(1-\varepsilon)^3}{\varepsilon K_\varepsilon} \right\}^n, \quad (16)$$

где ε – пористость гранулы в момент τ ;

K_ε – безразмерный показатель степени сжатия гранулы, пропорциональный энергии столкновения и размеру гранулы и обратно пропорциональный силе межчастичного трения и адгезионному натяжению связующего;

n – параметр, описывающие распределение энергии столкновения гранул;

τ – безразмерное время столкновения, пропорциональное частоте столкновений гранул.

Принимая $d\varepsilon/d\tau = 0$ получаем минимальную пористость через бесконечно большой промежуток времени

$$\frac{\varepsilon_{\min}}{(1-\varepsilon_{\min})^3} = \frac{1}{K_\varepsilon}. \quad (17)$$

В настоящее время существует множество моделей, описывающих поведение

гранул при их столкновении [26]. Все они делятся на два класса: учитывающие упругость гранул (класс 1) при столкновении, и не учитывающие таковую (класс 2). Рост гранул зависит как от склонности к деформации при столкновении, так и от наличия связующего в месте контакта гранул. Взаимодействие первого класса [27] возможно в системах, где силы столкновения слишком малы или гранулы слишком прочны (например, конечная стадия окомкования). Рост гранул в этом случае обеспечивается слипанием водных оболочек, окружающих их. В остальных случаях присутствует взаимодействие второго класса [28], когда энергия столкновения рассеивается путем деформации оболочек гранул, образуя при этом контактную площадку в месте удара.

Изменение размеров гранул в процессе окомкования обычно представляется как функция от времени. Можно выделить несколько характерных зон гранулообразования [29]:

- зона гранулообразования;
- индуктивная зона (или зона уплотнения);
- зона коалесценции;
- зона медленного роста;

Невозможно провести четких границ между этими зонами, но для качественного хода процесса окомкования они должны быть пространственно разделены.

В процессе окомкования могут реализовываться несколько режимов роста гранул [29]: *стабильный, индуктивный, только зародышеобразование, «крошкообразование», переувлажнение*.

Стабильный режим характеризуется линейным увеличением размеров гранул во времени, в то время как индуктивный имеет период запаздывания, в течении которого рост гранул практически отсутствует. Режим роста гранул зависит от двух параметров: степени заполнения пор жидкостью (S_{\max}) и величины деформации гранул в процессе столкновения (дефор-

мационное число Стокса, St_{def}), которые выражаются следующим образом [29]

$$S_{\max} = \frac{w\rho_m(1-\varepsilon_{\min})}{\rho_{ж}\varepsilon_{\min}}, \quad (18)$$

где w – массовое отношение жидкой и твердой фаз;

ρ_m – плотность твердой фазы;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкой фазы;

ε_{\min} – минимальная пористость гранулы, достигаемая при существующих условиях окомкования.

$$St_{def} = \frac{\rho_z U_c^2}{2Y_z}, \quad (19)$$

где U_c – скорость столкновения гранул в окомкователе;

ρ_z и Y_z – плотность и динамический предел текучести гранул.

Режим роста гранул в зависимости от S_{\max} и St_{def} представлен на рисунке 7.

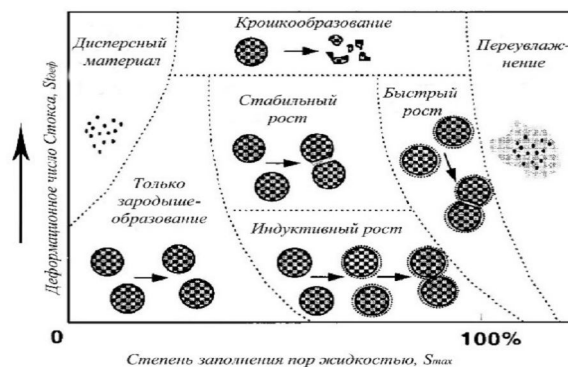


Рисунок 7 – Карта режимов роста гранул

Стадия разрушения гранул всегда сопутствует стадиям зародышеобразования и роста гранул. Различают разрушение влажных гранул в пространстве окомкователя и разрушение сухих гранул в процессе транспортировки и хранения. Из-за своего незначительного развития в устройствах барабанного типа этой стадией пренебрегают. Большинство работ [30], изучающих разрушение гранул, посвящено

изучению этого процесса в высокоскоростных окомкователях.

Выводы и направление дальнейших исследований:

– за последние 10-15 лет исследование процесса мокрого гранулирования мелко-дисперсных материалов на движущейся поверхности (к которому относится и окомкование агломерационной шихты,) позволило перейти от качественного описания многих параметров процесса окомкования к количественному;

– при исследовании процесса окомкования и дальнейшем переносе результатов на промышленные установки необходимо учитывать ряд факторов, которым ранее не уделялось должного внимания: термодинамические и кинетические параметры процесса увлажнения, упругопластические свойства гранул и т.д.;

– современная модель увлажнения материала и образования зародышей позволяет с высокой точностью предсказать скорость образования и конечный размер получающихся зародышей;

– ряд моделей процесса укрупнения гранул, основанных на их упругопластических свойствах и степени насыщения порового пространств жидкостью, позволяет предсказать возможность коалесценции зародышей (гранул) в ходе процесса окомкования.

Дальнейшее исследование процесса окомкования должно обеспечить полный переход от качественного к количественному описанию, а также возможность его легкого масштабирования.

Библиографический список

1. Sastry K.V.S. *Advances in the modelling and simulation of granulation circuits* / Sastry K.V.S. // *First international particle technology forum*, 7–19 aug. 1994.: abstracts. – Denver, 1994. – P. 155–160.
2. Pietsch W. *Size enlargement by agglomeration* / Pietsch W. – N.Y.: Wiley-Interscience, 1991. – 541 p.
3. Мищенко И.М. Состояние и основные направления повышения технического уровня агломерационного производства предприятий черной металлургии / И.М. Мищенко // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2005. – № 1. – С. 23–26.
4. Про затвердження Державної програми активізації розвитку економіки на 2013-2014 роки [Електронний ресурс] / Постанова Кабінету міністрів України № 187 від 27 лютого 2013 р. // Режим доступу до ресурсу: www.zakon4.rada.gov.ua/laws/show/187-2013-%D0%BF.
5. Коротич В.И. Агломерация рудных материалов / Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. – Екатеринбург: ГОУ ВПО “УГТУ-УПИ”, 2003. – 400 с.
6. Tardos G.I. *Critical parameters and limiting conditions in binder granulation of fine powders* / Tardos G.I., Khan M., Mort P.R. // *Powder Technology*. – 1997. – № 94. – P. 245–258.
7. Mort P.R. *Scale-up of agglomeration processes using transformations* / Mort P.R., Tardos G.I. // *Kona*. – 1999. – № 17. – P. 64–75.
8. Zajic L. *The use of surface energy values to predict optimum binder selection for granulations* / Zajic L., Buckton G. // *International Journal of Pharmaceutics*. – 1990. – № 59. – P. 155–164.
9. Schafer T. *Melt pelletization in a high shear mixer: IX. Effects of binder particle size* / Schafer T., Mathiesen C. // *Int. J. Pharm.* – 1996. – № 139. – P. 139–148.
10. Iveson S. *Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review* / Iveson S.M., Litster J.D., Hapgood K. // *Powder Technology*. – 2001. – № 117. – P. 3–39.
11. Schaafsma S.H. *Effects and control of humidity and particle mixing in fluid bed granulation* / Schaafsma S.H., Kossen N.W.F., Mos M.T. // *AIChE Journal*. – 1999. – № 45. – P. 1202–1210.
12. Litster J. *Liquid distribution in wet granulation: dimensionless spray flux* / Litster J., Hapgood K.P., Michaels J. // *Powder Technology*. – 2001. – № 114. – P. 29–32.

13. Litster J.D. Predicting and controlling granule properties in granulation processes / Litster J.D., Iveson S., Hapgood K. // *World congress on particle technology 3, 7–9 July 1998.: abstracts.* – Brighton, 1994. – Paper № 92.
14. Hapgood K. Nucleation regime map for liquid bound granules / Hapgood K., Litster J., Smith R // *AIChE Journal.* – 2003. – № 49. – P. 350–361.
15. Теоретически основы производства окускованного сырья / [Ковалев Д.А., Ванюкова, Н.Д., Иващенко, В.П. и др.]. – Днепронетровск: ИМА-пресс, 2011 – 476 с.
16. Pietsch W. Agglomeration in industry / Wolfgang Pietsch. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2004. – 826 p.
17. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов / Коротич В.И. // М. : Металлургия, 1966. – 151 с.
18. Hotta K. The capillary binding force of a liquid bridge / Hotta K., Takeda K., Inoya K // *Powder technology.* – 1974. – № 10. – P. 231–242.
19. Lian G. A theoretical study of the liquid bridge forces between two rigid spherical bodies / Lian G., Thornton C., Adams M. // *Journal of colloid and interface science.* – 1993. – № 161. – P. 138–147.
20. Rumpf H. The strength of granules and agglomerate / Rumpf H. // *AIME, Agglomeration, Inter-science, 1962.: abstracts.* – New York, 1962. – P. 379–418.
21. Wynnickyj J.R. Microstructure and growth mechanisms in pelletizing / Wynnickyj J.R. // *6-th Int. Symp. Agglomeration. 15-17 nov. 1993.: abstracts.* – Nagoya, 1993. – P. 143–159.
22. Adams M. Forces between particles in continuous and discrete liquid media / Adams M., Edmondson B. // *Tribology in particulate technology.* – 1987. – P.154–172
23. Harnby N. Measurement of the adhesional force between individual particles with moisture present. Part 1: A review / Harnby N., Hawkins A., Opalinski I. // *ICHEME.* – 1996. – № 74. – P. 605–615.
24. Harnby N. Measurement of the adhesional force between individual particles with moisture present. Part 2: A novel measurement technique / Harnby N., Hawkins A., Opalinski I. // *ICHEME.* – 1996. – № 74. – P. 616–626.
25. Iveson S. Fundamental studies of granule consolidation. Part 1. Effects of binder viscosity and binder content / Litster J.D., Ennis B.J. // *Powder technology.* – 1996. – № 88. – P. 15–20.
26. Iveson S. Granule coalescence modelling: including the effects of bond strengthening and distributed impact separation forces / Iveson S. // *Chemical engineering science.* – 2001. – № 56. – P. 2175–2220.
27. Ennis B. A microlevel-based characterization of granulation phenomena / Ennis B., Tardos G., Pfeffer R. // *Powder Technology.* – 1991. – № 64. – P. 257–272.
28. Ouchiya N. The probability of coalescence in granulation kinetics / Ouchiya N., Tanaka T. // *I&EC Process Des. Dev.* – 1975. – № 14. – P. 286–289.
29. Iveson S. Growth regime map for liquidbound granules / Iveson S., Litster J. // *AIChE journal.* – 1998. – № 44. – P. 1510–1518.
30. Sastry K.V.S. Kinetic and process analysis of the agglomeration of particulate materials by green pelletization / Sastry K.V.S., Fuerstenau D.W. // *Agglomeration 1977 AIME, 1977.: abstracts.* – New York, 1977. – P. 381.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А. М.

Статья поступила в редакцию 04.09.13.

Дорогий Є. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

**СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ОГРУДКУВАННЯ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ ШИХТИ, ЩО МІСТИТЬ ВЕЛИКУ КІЛЬКІСТЬ ТОНКОПОДРІБНЕНИХ МАТЕРІАЛІВ.
ПОВІДОМЛЕННЯ 2: МЕХАНІЗМ УТВОРЕННЯ, ЗРОСТАННЯ І РУЙНУВАННЯ
ГРАНУЛ ПРИ ОГРУДКУВАННІ**

В статті розглянута сучасна теорія утворення зародків з тонкоподрібнених матеріалів, їх ріст і руйнування в процесі мокрого гранулювання на рухомій поверхні. Показано важливість цих процесів в умовах нестачі центрів огрудкування, які спостерігаються при огрудкуванні агломераційної шихти, що містить велику кількість тонкоподрібнених матеріалів. Наведено ви-

сновки та напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: огрудкування, зародкоутворення, зростання гранул, руйнування гранул тонкоподрібнені матеріали.

Dorogoy E. V. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine evgeniy.dorogoy@gmail.com)

ACTUAL STATUS OF PELLETIZING OF SINTER CHARGE CONTAINING A LARGE AMOUNT OF FINELY GROUND CONCENTRATE. REPORT 2: MECHANISM OF FORMATION, GROWTH AND FRACTURE OF PELLETS IN THE PROCESS OF PELLETIZING

Within the scope of this article, the modern theory of nucleation from finely ground concentrate, nucleuses growth and fracture in the process of wet pelletizing on the moving surface was considered. The article shows the importance of these processes in the context of nucleus deficiency, which is observed during the process of pelletizing of sinter charge, containing a large amount of finely, ground concentrate. Conclusions and directions for future research were introduced.

Keywords: pelletizing, nucleation, pellets growth, pellets fracture, finely ground concentrate.