

УДК 66.0992.002.237

**Макаренков Д.А., Назаров В.И.**

*Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ) (Университет машиностроения)*

## **РОЛЬ СВЯЗУЮЩИХ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОБАВОК И ПРОЦЕССА МЕХАНОАКТИВАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЦЕЛЕВЫХ ПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ**

**D. Makarenkov, V. Nazarov**

*Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI)  
(Mechanical Engineering University)*

### **INFLUENCE OF BINDING AGENTS, TECHNOLOGICAL ADDITIVES AND CRUSHING PROCECESS ON PRODUCTION OF TARGET PRODUCTS FROM WASTE**

*Аннотация.* Приведены результаты исследований по использованию связующих, поверхностно активных веществ и механических методов воздействия применительно к многокомпонентным полидисперсным материалам. Рассмотрены механизмы при «сухом» и «влажном» гранулировании в зависимости от количества вводимого связующего. Выявлены три характерных вида распределения жидкости (связующего) в зависимости от количественного соотношения жидкой и твердой фаз. Составлена таблица технологических связующих применительно к перерабатываемым шихтам, приведены критерии, характеризующие эффективность процесса гранулирования.

*Ключевые слова:* Связующее, фаза, механическое воздействие, метод гранулирования.

*Abstract.* We present the results of the research on use of binding agents, superficially active substances and mechanical methods of influence with reference to multicomponent polydisperse materials. We consider mechanisms of 'dry' and 'damp' granulation depending on the quantity of the introduced binding agents. Three characteristic types of liquid (binding agent) distribution are found, depending on a quantitative ratio of liquid and solid phases. The table of technological binding agents with reference to processed powders is composed, and criteria characterizing efficiency of a granulation process are presented.

*Key words:* binding agent, phase, mechanical influence, granulation method.

В производстве стекла, строительных материалов, органоминеральных удобрений, ферментных фармацевтических препаратов, топливных гранул (пеллет), а также других продуктов используются полидисперсные и многокомпонентные шихты и порошки. Для экономии дорогостоящих компонентов (например, оксидов бора и свинца) и снижения вредных (пылевидных) выбросов в атмосферу (соединений кальция и сурьмы) в шихту вводят хвосты рудопромывки и шлаки, которые являются вторичными материальными ресурсами (ВМР). Вводимые ВМР имеют более крупный грансостав и не пылят. Кроме того, после компактирования и загрузки этих шихт в гранулированном виде снижается температура и время варки шихты, поскольку эти материалы уже прошли стадию термообработки. Такие ВМР, как отработанный кизельгур, пивная дробина являются основными отходами пивоваренной промышленности и используются в производстве строительных материалов и кормовых добавок. В составе ВМР часто присутствуют кремнеземистые материалы (кварц, песок), подвергающиеся при высокой температуре полиморфным превращениям. При получении из таких шихт с ВМР гранулированных продуктов требуются высокие удельные давления и энергозатраты.

Ввод добавок и связующих, механоактивация материалов придают шихте пластичность, связность, обеспечивает полное смачивание поверхности частиц влагой и снижает их твердость [2; 4]. За счет механоактивации увеличивается удельная поверхность дисперсной среды, что позволяет контролировать количество вводимого связующего и способствует полиморфным превращениям в шихте (например, увеличение количества лимонно-растворимого  $P_2O_5$  при измельчении исходного сырья). Ввод в шихту связующего также позволяет переводить её из исходного состояния в новое, с заданными реологическими свойствами. Получив заданный набор структурно-деформационных характеристик шихты, соответствующий параметрам той или иной реологической модели среды, можно управлять свойствами шихт на разных стадиях их переработки, тем самым выбирая наиболее эффективный метод гранулирования. В различных методах гранулирования порошковых и зернистых материалов исходная влажность шихты меняется от 0,5 до 40%, а водопоглощение пористых материалов может достигать 300%. Процесс уплотнения таких «сухих» или «влажных» шихт, является многостадийным и осуществляется методами окатывания, компактирования или экструдирования. Рассмотрим подробнее механизмы при «сухом» и «влажном» гранулировании.

«Сухое» или граничное гранулирование определяет группу процессов, состоящих в связывании сухих частиц адсорбированными на их поверхностях тонкими слоями жидкости. Механизм гранулообразования при окатывании на тарели или в барабане определяется особыми свойствами граничных слоёв смоченных частиц. В первую очередь они различаются концентрацией молекул или ионов в слое и иной молекулярной структурой слоя на расстоянии порядка 0,01 мкм от поверхности. При этом силы молекулярного и электростатического характера подчиняются законам, отличающимся от законов притяжения Ван-дер-Ваальса, и обеспечивают гораздо более прочную связь ча-

стиц. Поверхностные взаимодействия между мелкодисперсными частицами определяются вязкостью жидкости и её количеством в объеме и в тонком граничном слое. Установлено, что для каждой жидкости характерна своя величина предельной толщины слоя (от 0,05 до 0,1 мкм), при уменьшении которой жидкость переходит в квазитвердое или квазикристаллическое состояние [3; 8]. Адсорбционные слои жидкости, образующиеся на поверхности контактирующих тел, также обладают свойствами, отличающимися от свойств жидкости в объеме: большей прочностью на сдвиг и повышенной вязкостью. Вязкость граничного слоя  $\mu_T$  в несколько раз превышает объемную  $\mu_{об}$ . Безразмерный коэффициент граничного загущения для оценки изменения свойств адсорбционных слоев жидкости может быть определен по формуле Г.И. Фукса:

$$\Psi = (\tau_{отр} \cdot F_{отр}) / \mu, \quad (1)$$

где:  $\tau_{отр}$  - время отрыва слоя жидкости с поверхности твердого тела, сек;  $F_{отр}$  - сила отрыва в расчете на единицу площади, н/м<sup>2</sup>;  $\mu$  - динамическая вязкость жидкости, н-сек/м<sup>2</sup>.

Область, для которой наиболее существенным фактором, определяющим прочность гранул, являются адсорбционные силы, занимает промежуточное положение между сухим гранулированием, где определяющими являются силы Ван-дер-Ваальса, и влажным, где гранулообразование определяется капиллярными силами. Влажное гранулирование ( $W_{исх} = 15-35\%$ ) характеризуется взаимодействием жидкости и сухих частиц. В зависимости от количественного соотношения твердой и жидкой фаз и условий проведения процесса возможны разнообразные варианты связывания частиц в гранулы [2; 4]. Так, например, при гранулировании стеклотарели на тарели частицы сближаются, избыточная влага выдавливается на её поверхность, а структура гранулы становится более плотной. Под действием центробежных сил, возникающих при вращении гранулятора, и сил поверхностного натяжения водных пле-

нок мелкие агломераты вырастают в более крупные и при определенных условиях становятся ядрами – так называемыми источниками гранулообразования. В дальнейшем неувлажненные (сухие) частицы наслаиваются на смоченные ядра. Если размеры капли велики, то образуются ядра-зародыши диаметром 3-5 мм, но механизм укрупнения гранулы остается тем же. Дальнейшее уплотнение структуры гранул происходит за счет сил взаимодействия между частицами в плотных динамических слоях.

Размер гранулы в значительной мере определяется числом её проходов через зону увлажнения и характером распределения влаги в агломерате. Выявлены три характерных вида распределения жидкости (связующего) в зависимости от количественного соотношения жидкой и твердой фаз (рис. 1). При манжетном распределении жидкость находится только в зоне контакта частиц материала, образуя при этом дискретные, двояковогнутые кольца (рис. 1а). В сетчатом варианте жидкость находится в материале в виде сетки, а манжеты из неё соединены между собой краями (рис. 1б). При капиллярном механизме все поры между частицами мелкодисперсного материала заполнены жидкостью (рис. 1в).

Как видно из рис. 1а, если жидкости мало, она распределена дискретными разобщенными линзами (или мостиками) в точках соприкосновения частиц. Здесь имеет место

капиллярно разобщенное состояние, или состояние заземленной жидкости. При увеличении количества жидкости она втягивается порами вследствие их капиллярности, и мостики сливаются между собой. При слиянии жидкостных мостиков создаются условия для непрерывного перехода от одной точки жидкой фазы к другой. Если жидкость полностью обволакивает сухие частицы (например, при прохождении через факел форсунки), то сила связывания частиц в этом случае определяется силой поверхностного натяжения жидкости на границе с воздухом. Такое состояние является предельным и временным, так как жидкость будет вновь смачивать другие частицы, тем самым открывая частицы и поры, прежде скрытые ею. При влажном гранулировании одновременно действуют оба механизма связывания частиц в гранулы: посредством жидкостных мостиков и капиллярного разрежения в порах. Мостики из твердой фазы образуются при гранулировании многокомпонентных шихт за счёт введения связующего различной химической природы. В зависимости от вида процесса и свойств шихты, связующее может вводиться в расплавленном состоянии или в виде суспензии, которая при высыхании влаги скрепляет суспензированными частичками исходные материалы. При получении безобжигово силикатного гравия перспективно использование высококонцентрированных вяжущих систем (ВКВС) на основе

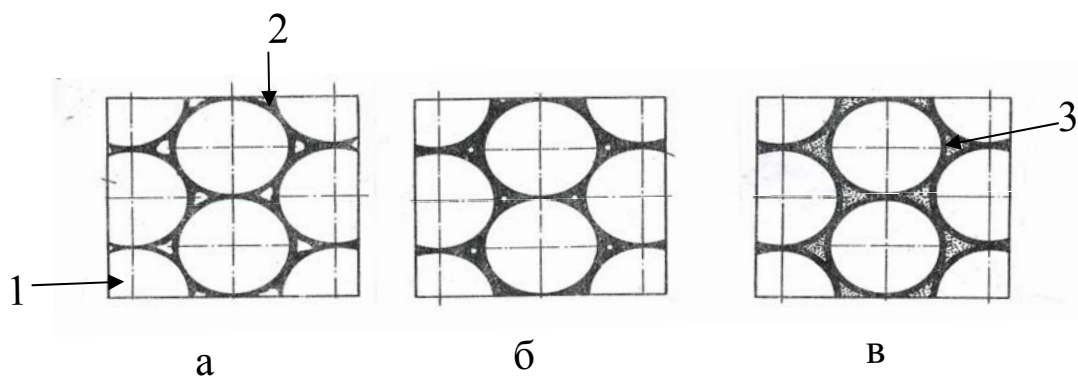


Рис. 1. Схема распределения связующего в гранулируемой шихте:  
1 – зерно; 2 – воздух; 3 – жидкость; а – манжетное, б – сетчатое, в – капиллярное

нанодисперсных частиц [7]. ВКВС представляет собой минеральные водные суспензии, получаемые при мокром измельчении природных кремнеземистых, алюмосиликатных материалов или отходов на их основе. Ввод в вязущую систему определенного количества механоактивированных нанодисперсных частиц, полученных при повышенной температуре, позволяет регулировать эффективность гранулирования.

Для повышения прочности гранул часто используют строительные неорганические смеси, которые смешиваются с водой, образуя пластифицированную массу, затвердевающую на воздухе в прочное камневидное тело. Такие связующие, как гашеная и негашеная известь, гипс, цементный клинкер, глины за счет процесса цементации упрочняют пространственную структурную сетку материала, не меняя при этом основных свойств конечного продукта. Средство обрабатываемого дисперсного материала и связующего определяется энергией смачивания, которая может быть охарактеризована его гидрофильностью или гидрофобностью. В зависимости от природы твердого тела и выбирается тип связующего. Выбор связующего и метода гранулирования также определяются дисперсностью и пластичностью агломерируемых порошков, гетерогенностью химических реакций и термолабильностью продукта. Так, например, термо- и механолабильность ферментных и фармацевтических препаратов (ФП) накладывает ограничения на использование повышенных температур и давлений в процессе гранулирования. Это делает гранулирование окатыванием более привлекательным по сравнению с прессовым гранулированием. При окатывании конечный продукт, как правило, имеет форму, близкую к сферической, характеризуется высокой прочностью, сыпучестью, не пылит и не слеживается. Рассмотрим некоторые особенности процесса гранулирования таких продуктов. Высокая дисперсность и большая удельная поверхность порошковых ФП позволяет получать прочные влажные гранулы. Зависимость прочности влажной гранулы от

дисперсности составляющих её частиц определяется уравнением Румпфа для идеально пористого тела, состоящего из сферических частиц одинакового размера [9]:

$$\sigma = \frac{(1 - \varepsilon) \cdot k \cdot H}{\pi \cdot d^2}, \quad (2)$$

где:  $\sigma$  – прочность комка на разрыв, Па;  $\varepsilon$  – объемная доля пустот в общем объеме комка;  $d$  – средний эффективный диаметр зерен, м;  $k$  – среднее координационное число, то есть среднее число точек контакта сферического зерна со смежными зёрнами;  $H$  – сила сцепления зерен в одном контакте, Н.

Растворимость отдельных компонентов ферментных препаратов обуславливает упрочнение гранул в процессе их сушки в результате образования кристаллических мостиков, связывающих зерна каркаса гранулы. В тех случаях, когда ферментный препарат, например сычужный фермент, доводится до стандартной активности хлоридом натрия (пищевой поваренной солью), кристаллы соли играют роль прочного каркаса гранулы, наполнителем в которой является мелкодисперсный ферментный порошок. Кроме того, в таких препаратах за счет кристаллического хлорида натрия улучшается их сыпучесть. При гранулировании ФП необходимо учитывать ряд особенностей их свойств и тип происхождения. Так, в препаратах микробиального происхождения содержится большое количество балластных веществ, в том числе органические остатки питательной среды, минеральные соли, клеточные стенки бактерий-продуцентов. Препараты животного происхождения содержат частицы эпителия органов, из которых они были получены. Нами установлено, что вещества, содержащиеся в ферментных препаратах, имеют различную смачиваемость связующими (водой и водными растворами высокомолекулярных веществ). Краевой угол смачивания находится в пределах от 0° (полное смачивание) до 80°. Такая неоднородность обуславливает различную прочность связи частиц в грануле

и, соответственно, ведет к общему понижению структурной прочности гранул.

Микроскопические исследования показали, что при смачивании ФП водой и водными растворами высокомолекулярных веществ в двухфазной системе образуется третья фаза – пузырьки газа размером до 90 мкм (рис. 2). Их появление объясняется десорбцией газа, изначально сорбированного на отдельных компонентах ФП. Количество пузырьков достаточно велико, что приводит к появлению еще одной структурной неоднородности, отражающейся как на пластичности влажной гранулы, так и на пористости и прочности конечного продукта. Избавиться от этой неоднородности можно предварительным нагревом порошка, однако высокая термолабильность фермента не позволяет этого сделать.

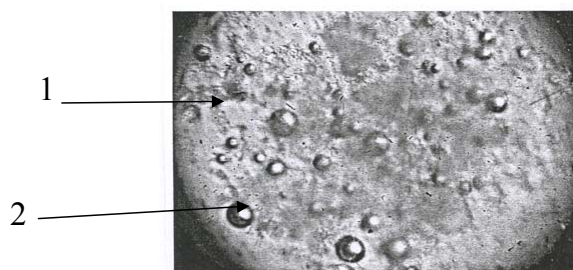


Рис. 2. Микроструктура гранулированного фермента после окатывания на тарели:

1- поверхность гранулы; 2- пузырьки воздуха

При гранулировании окатыванием минерального сырья, например железорудных и фосфоритных материалов или минеральных удобрений, в капиллярах формирующихся окатышей находится вода или водный раствор соли. В случае ФП капиллярная влага представляет собой раствор высокомолекулярного вещества – белкового фермента. Как следствие, поровый раствор имеет более высокую вязкость по сравнению с исходным связующим. При гранулировании вязкость увеличивается, в результате снижается скорость капиллярной пропитки и увеличивается вязкость всей структуры гранулы, что может затруднять её формирование в процессе окатывания.

Одной из стадий механизма гранулообразования и роста гранул из мелкодисперсных порошков является получение прочных зародышевых центров. В дальнейшем они становятся центрами роста гранул и растут до определенного размера в результате наложения мелких частиц материала или агломерации с аналогичными зародышами. Механизм образования центра роста гранул при влажном гранулировании несколько отличается для материалов различной природы и дисперсности и определяется характером подачи связующей жидкости в слой гранулируемого порошка. Кинетику гранулообразования можно описать следующим образом. В ходе гранулирования ФП подача связующей жидкости (например, воды) осуществляется в виде крупных или мелких капель на слой воздушно-сухого материала. При попадании капли связующей жидкости на слой мелкодисперсного препарата (размер частиц от 1 до 10 мкм), находящегося в движущемся грануляторе, она взаимодействует с ним, как с гидрофобным материалом, то есть частица связующего скатывается с наклонной поверхности слоя материала. Одновременно за счет контакта жидкости с порошком частицы смачиваются. Силы поверхностного натяжения, с одной стороны, и недостаточная прочная связь частиц между собой, с другой стороны, обуславливают внедрение частиц препарата в текучую структуру капли. Скорость этого процесса невелика из-за высокой дисперсности порошка и наличия в нем компонентов с невысокой смачиваемостью. Следствием внедрения в структуру капли частиц ФП является изменение её механофизических свойств, в частности вязкости. Вязкость  $\eta$  дисперсной системы (золя, суспензии) увеличивается с ростом содержания объемной концентрации частиц дисперсной фазы и описывается формулой Эйнштейна [1]:

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + K v_{об}), \quad (3)$$

где:  $\eta$ ,  $\eta_0$  – вязкость суспензии и чистой дисперсионной среды;  $K$  – коэффициент, зависящий от формы частиц, для сферических

частиц  $K=2,5$ ;  $v_{об} = V_d/V$  – **объемная концентрация дисперсной фазы** ( $V_d$ ) в общем объеме системы ( $V$ ). Формула (3) справедлива, если величина  $v_{об}$  не превышает 6%. При увеличении концентрации до 30% можно использовать формулу

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + 2,5 \cdot v_{об} + 14,7 \cdot v_{об}^2). \quad (4)$$

Постепенно структура капли становится всё плотнее, а эффективная вязкость увеличивается настолько, что прекращается внедрение порошка внутрь капли и она начинает расти за счет наложения частиц сухого материала на свою поверхность. В этот момент можно говорить о начале процесса роста гранулы и уплотнения её структуры в результате механических воздействий. При уплотнении на поверхность гранулы выходит часть внутренней влаги, которая обуславливает её дальнейший рост при отсутствии подвода связующего извне. Ограниченность внутренних ресурсов свободной влаги и малая скорость пропитки определяют плотный характер укладки на поверхности гранулы. В результате гранула имеет рыхлую сердцевину и плотную, менее влажную оболочку. Плотная оболочка гранулы характеризуется низкой пластичностью и препятствует значительным пластическим деформациям. Для получения гранулы сферической формы малого размера (2-3 мм) необходимо обеспечить ее формирование ещё на стадии внедрения частиц порошка в каплю связующей жидкости. Упрочнение гранул с заданным гранулометрическим составом можно обеспечить, устанавливая внутри тарели механикоактиватор или вводя на последней стадии керамические шары. Воздействие активатора и шаров позволяет получать гранулы с требуемыми характеристиками. Необходимо отметить, что при получении гранулированных целевых продуктов на основе ВМР использование технологических связующих и добавок снижает в системе межчастичное трение, изменяет ее пластичность, смачиваемость, сцепление частиц и соответственно прочность

получаемых гранул. Регулируя подачу связующего и место его ввода на поверхность тарели, можно прогнозировать размеры гранул.

По результатам собственных исследований гранулирования широкого класса многокомпонентных полидисперсных материалов (МПМ), таких, как стекольные, стеклообразующие и эмалевые шихты, золошлаковые отходы, пористые материалы (перлит, микротальк, углеродсодержащие адсорбенты), пылевидная глина, древесные и растительные отходы (пеллеты), органоминеральные удобрения (ОМУ), наполнители на основе оксидов титана, ферментные и фармацевтические препараты и БАД была составлена табл. 1 технологических связующих. Кроме жидких связующих, при гранулировании используют твердые добавки (ТД). Они применяются для устранения слеживаемости на стадии подготовки шихты, взаимодействуя на активные центры её образования. Твердые связующие, обладающие клеящими свойствами, используются в качестве пластификаторов для увеличения прочности уплотненного продукта. Для интенсификации процесса гранулирования шихты с ТД подвергают термонагреву, придавая смеси новые реологические свойства.

Для оценки гранулируемости МПМ используют различные подходы. В основном они оценивают возможность возникновения физико-химических форм связи шихты со связующим. Так, например, показателем гранулируемости в целом как на стадии смешения (подготовки) шихты, так и окатывания является критерий комкуемости [2; 4]:

$$K = \text{МКВ} / (\text{МКВ} - \text{ММВ}), \quad (5)$$

где: МКВ – максимальная капиллярная влагоемкость, ММВ – максимальная молекулярная влагоемкость. Возможность гранулирования стекольных, эмалевых шихт и золошлаковых отходов оценивается по числу формуемости [6]

$$E_{\phi} = (G_{г.к.} + G_{пк}) / (G_{о.м.} + G_{\text{SiO}_2}), \quad (6)$$

где:  $G_{г.к.}$ ,  $G_{пк}$ ,  $G_{о.м.}$ ,  $G_{\text{SiO}_2}$  – соответственно

Таблица 1

## Технологические связующие в процессах гранулирования МПМ

Характер межчастичных связей	Типы связующих	Стадия гранулирования/ метод гранулирования	Перерабатываемые материалы
Поверхностные силы и капиллярное воздействие. Поверхностное натяжение пленки жидкости	Вода, водные суспензии бентонита и глины, гель диоксида кремния	Подготовительная стадия / стихийная агломерация, окатывание	Стекольные и эмалевые шихты, золошлаковые отходы. Пылевидная глина
Адгезионные и когезионные силы в мостиках связующего с ограниченной поверхностью. Образование гидрофобного покрытия на поверхности пористых частиц	Органические вещества: водные растворы лигносульфонатов, лигнопаны, кремнеорганические гидрофобизирующие соединения; поливиниловые спирты. Неорганические связующие: сульфат магния, сульфат калия	Окатывание, компактирование, прокатка через фильеру	Стекольные и эмалевые шихты; пористые материалы; древесные отходы, ферментные препараты, ОМУ, золошлаковые отходы, комбикорма
Образование твердофазных мостиков между частицами	Органические соединения: водные растворы лигносульфонатов, лигнопанов. Неорганические связующие	Компактирование; прокатка и экструзия через фильеру	Стекольные, стеклообразующие и эмалевые шихты; древесные и растительные отходы, углеродсодержащие отходы

массовая доля гигроскопичных, пластичных компонентов и оксидов металлов, песка, %. Для классификации шихт по их склонности к формуемости предложен обобщенный параметр модуль формуемости [5]:

$$M_{\Phi} = 0,01 \cdot (G_{SiO_2} - (G_{ГСК} + G_{ПК})), \quad (7)$$

$G_{SiO_2}$ ,  $G_{ГСК}$ ,  $G_{ПК}$  – массовая доля содержания в шихте кварца, гигроскопичных и пластичных компонентов, %.

Установлено, что критерий комкуемости изменяется от 0,2 до 1, и чем ближе показатель комкуемости к единице, тем большей потенциальной склонностью к гранулированию обладает дисперсный материал. Чем ближе значение рабочей влаги окомкования к значению наименьшей капиллярной влагоемкости, тем прочнее гранулы. Тонкодисперсные коллоидизированные материалы по величине

$K$  делятся на некомкующиеся (0,2), слабокомкующиеся (0,2-0,3), среднекомкующиеся (0,5-0,8), сильнокомкующиеся (>0,8). Видно (см. табл. 2), что в исходном состоянии показатель  $K = 0,31$  для шихты НС-2. Следовательно, она слабо комкуется, что негативно скажется на ее дальнейшей обработке (большое количество просыпи при гранулировании и низкая прочность). Поэтому необходим ее перевод в другое реологическое состояние. Изменение грансостава, путем измельчения и ввода пластифицирующей добавки приводят к изменению качества среды ( $K = 0,59$ ). Шихта становится комкующейся и хорошо гранулируется методом компактирования.

Для порошковых добавок в бетонные и растворные смеси и грануляции стеклообразующих шихт и пористых материалов в качестве жидкого связующего нами было разработано новое связующее на основе лигносульфонатов «Лигнопан» [6]. Добавки

Таблица 2

## Влияние типа связующего и температуры шихты на критерий комкуемости

Тип шихты	Тип связующего	t° С	К
содовая НС-2	уголь	27 - 63	0,31 - 0,59
содовая Салаватского завода	Уголь, мазут	27 - 63	0,5 - 0,65
содовая Борского завода	Уголь, мазут	27 - 63	0,5 - 0,65

марки «Лигнопан Б» относятся к пластифицирующим и водоредуцирующим добавкам, ускоряющим твердение материала, а также повышающим прочность. При получении безобжигово силикатного гравия и ОМУ применение «Лигнопана Б» позволяет получать прочноплотные прессовки при низком давлении прессования. Микроскопические исследования выявили механизм воздействия на структуру связующего «Лигнопан Б» на стадиях смешения и компактирования стеклообразующих шихт и пористых порошковых добавок. При использовании лигносульфонатных групп вода обволакивает частицы порошка тонким слоем, на внешней поверхности которого размещаются лигносульфонатные группы. Такой двойной слой позволяет снизить межчастичное трение и трение частиц с прессующей поверхностью, тем самым уменьшая их прилипание к поверхности пресс-инструмента. Ввод водного раствора «Лигнопана Б», имеющего полимерную структуру, приводит к реакции полимеризации эпоксидных циклов. В результате частицы лигнинов, находящиеся в одном растворе действуют как клей уже на стадии подготовки шихты. Их дальнейшее твердение может происходить или в зоне активного нагружения пресса, или после выхода из нее прессовки, на стадии транспортировки. В результате образуются прессовки или плитка повышенной прочности. Так, при прокатке, через плоскую фильеру с каналами переменного сечения, древесных опилок происходит разогрев материала, содержащий лигнин. Процесс гранулирования сопровождается деструкцией среды с образованием жидкой пластифицированной фазы, что приводит к образованию плотнопрочных пелет [5].

При гранулировании ОМУ, комбикормов, глинистых масс следует учитывать явление пластикации – процесса образования высококонцентрированной коагуляционной структуры, способной в дальнейшем к переходу в кристаллизационную. Процесс реализуется под действием таких механических факторов, как сдвиг, сжатие, давление, нагрев и механоактивация. Введение в шихту поверхностно активных веществ (ПАВ) облегчает процесс пластикации за счет уменьшения адсорбционного взаимодействия жидкости с твердыми частицами. Это снижает общую прочность системы и приводит к образованию плотнопрочных гранул при меньшем механическом воздействии. Кинетика гранулообразования зависит как от технологических параметров (например, наличие внутреннего ретурна), так и от физико-химических свойств шихты и связующего.

Кроме вышеперечисленных способов воздействия на дисперсную структуру МПМ, в технике их переработки широко используются процессы механоактивации. При механическом воздействии энергия, передаваемая от воздействующего оборудования на шихту, расходуется на изменение грансостава, упорядочение структуры и дотацию эндотермических и твердофазных превращений. Материал «переходит» из одного исходного состояния в новое, с раскрытием наиболее опасных дефектов – слабых мест. В структуре частицы при этом образуются новые фазы. Используя связующие (ПАВ) совместно с методами механоактивации, также возможно интенсифицировать процессы образования новых поверхностей. В результате получается конечный продукт с измененными свойствами, такими, как плотность, прочность



(гранулы) прессовки, удельная поверхность и реакционная способность. Механоактивация происходит на стадии подготовки материала при измельчении, окатывании в скоростных грануляторах и компактировании дисперсных сред. Установлено, что при полусухом прессовании глинистых масс за счет механоактивации можно получать изделия, характеризующиеся вязкопластичными свойствами. Такие способы механоактивации, как ударно-раздавливающее измельчение, позволяет ускорить процессы декарбонизации в шихтах, а ударно-истирающая активация интенсифицирует твердофазные реакции. Можно отметить следующие эффекты, достигаемые механоактивацией:

- при получении ОМУ возрастает доля лимонно-растворимого  $P_2O_5$  при его предварительном дроблении в шаровой мельнице;

- в зависимости от режимных параметров смещения в барабане с шарами возможно получать активированные плотно-прочные ОМУ и калиймагниевого (КМ) гранулированные удобрения, при этом структурные свойства оцениваются по показателю «пластическая прочность  $P_m$ ».

- при получении высокодисперсного наполнителя ( $TiO_2$ ) для красок происходят его полиморфные превращения анатаз  $\rightarrow$  брукит  $\rightarrow$  рутил  $\rightarrow$  ( $TiO_2$ ), что сказывается на его кроющей способности;

- механоактивация стеклообразующих шихт и золошлаковых отходов инициирует протекание твердофазных реакций в массе шихты;

- использование механоактивации при смещении и измельчении в барабане с шарами приводит к увеличению удельной поверхности, и, как следствие, в дальнейшем к снижению энергозатрат при компактировании и получению более прочных прессовок из эмалевых шихт;

- предварительная механическая активация ферментных препаратов позволяет получать при грануляции продукт, характеризующийся «высокой» активностью.

Результаты по механоактивации дисперсных сред, полученные авторами, показали,

что эффект воздействия частично напоминает механизм воздействия на структуру частиц шихты связующих различного типа, так как происходит изменение удельной поверхности материала, что интенсифицирует процесс взаимодействия между частицами. Ввод связующего также приводит к интенсификации взаимодействия между частицами. В результате получаются шихты с новыми реологическими свойствами, обеспечивающие более эффективное гранулирование. После проведения активации необходимо определить последовательность операций механической обработки и тип оборудования, затем необходимо обеспечить условия, при которых эти операции и режимные параметры могут быть проведены при минимальном расходе энергии и заданной производительности.

Таким образом, представленные результаты исследований по применению связующих, ПАВ, процессов механоактивации для дисперсных сред с ВМР позволили установить, что при гранулировании порошковых и зернистых материалов реализуется «сухое» или «влажное» гранулирование в зависимости от количества вводимого связующего. При этом в обоих случаях взаимодействие между твердой и жидкой фазой происходит посредством жидкостных мостиков, капиллярного разряжения в порах и сил поверхностного натяжения. Особо для МПМ рассмотрены принципы выбора связующих, учитывающие гидрофильность и гидрофобность твердых частиц, причем выявлен механизм гранулообразования ФП при окатывании, определяемый характером подачи связующей жидкости в слой порошка, размером капель и десорбцией газа из частиц порошка. Предложена классификация МПМ, содержащих отходы, с учетом типа технологических связующих и характера межчастичных связей. В этой связи проанализированы критерии гранулируемости дисперсных сред на разных стадиях переработки и рассмотрена эффективность процесса гранулирования МПМ различными методами за счет использования твердых добавок, технологических приемов и процессов механоактивации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Зимон А.Д., Лещенко Н.Ф. Коллоидная химия: учебник для вузов, 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Влад МО, 1999. – 320 с.
2. Ильина Т.Н. Процессы агломерации в технологии переработки дисперсных материалов. – Белгород: издательство БГТУ, 2009. – 229 с.
3. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. – М.: Metallurgia, 1966. – 152 с.
4. Назаров В.И., Мелконян Р.Г., Калыгин В.Г. Техника уплотнения стекольных шихт. – М.: Легпромиздат, 1985. – 128 с.
5. Назаров В.И., Макаренко Д.А., Булатов И.А. Исследование процесса гранулирования дисперсных сред на роторных прессах с плоской матрицей // Вестник МИТХТ. – 2010. – Том V (№6). – С. 13-16.
6. Макаренко Д.А. Исследование процесса компактирования и окатывания дисперсных сред с регулируемыми реологическими характеристиками: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2000. – 18 с.
7. Череватова А.В. Строительные композиты на основе высококонцентрированных вяжущих систем: автореф. дис. ... докт. техн. наук. – М., 2007. – 144 с.
8. Шумаков Н.С., Талхаев М.П., О.С. Ковалев. Термическая обработка и окускование фосфатного сырья. – М.: Химия, 1987. – 192 с.
9. Rumpf H., Herrmann W. Properties, bonding mechanism and strength of agglomerates // Aufbereitungstechnik. – 1970. – № 11. – P. 117-127.