

УДК 66.0992.002.237

Макаренков Д.А.

Московский государственный университет инженерной экологии

КЛАССИФИКАЦИЯ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ПО РЕОЛОГИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ

D. Makarenkov

Moscow State University of Environmental Engineering, Moscow, Russia

CLASSIFICATION OF DISPERSE MEDIA BASED ON SECONDARY MATERIAL RESOURCES BY RHEOLOGICAL PROPERTIES

Аннотация. Приведена классификация методов гранулирования многокомпонентных полидисперсных шихт в зависимости от технологической влажности, особое внимание уделено описанию реологических моделей деформируемых тел. Возможность такой классификации дисперсных сред (далее - ДС) обоснована тем, что в процессе технологической переработки (смешивания, гранулирования методами окатывания и прессования) материал переходит из одного реологического состояния в другое, часто противоположное первому. Установлены общие закономерности уплотнения ДС и развития их реологических свойств в различных условиях с учетом механических и физико-химических воздействий. Приведены компрессионные кривые ДС, характеризующие процесс компактирования от приложенного давления. Механизм гранулообразования методом окатывания представлен в виде шестистадийного процесса, отражающего структурообразование материала в процессе его переработки.

Ключевые слова: Классификация дисперсных сред, реологические модели, деформация, упругое тело Гука, вязкий элемент Ньютона, скорость деформации, компрессионные кривые, гранула.

Abstract. The methods of granulation of multicomponent polydisperse media (DM) are classified depending on the technological humidity, and special attention is given to the description of rheological models of deformable bodies. The possibility of such a classification of DM is proved by the fact that in the course of technological processing (mixing, granulation by nodulizing and pressing) the material passes from one rheological condition to another, often opposite to the first one. The general properties of DM packing and development of their rheological properties under various conditions taking into account mechanical and physico-chemical effects are determined. The compression DM curves characterizing the process of compaction from the applied pressure are given. The mechanism of granulation is presented in the form of a six-stage process reflecting structurization of the material in the course of its processing.

Key words: classification of disperse media, rheological models, deformation, Guk's elastic body, Newton's viscous element, deformation rate, compression curves, granule.

Ресурсосбережение и расширение сырьевой базы на основе наиболее дешевых природных аналогов для производства целевых продуктов в различных отраслях промышленности является актуальной задачей по настоящее время. Экологическая ситуация в современной России определяется двумя факторами: уменьшением расходов на охрану окружающей среды и меньшими, чем ранее, масштабами хозяйственной деятельности. В 2011 г. в целом по России образовалось более 130 млн. т. отходов, из которых использованы и обезврежены порядка 40%. Решением этой проблемы является эффективное использование отходов в качестве вторичных материальных ресурсов (ВМР) вместе с основными компонентами. Разработка процессов гранулирования многокомпонентных, полидисперсных шихт на основе ВМР, различающихся физико-химической природой и структурно-деформационными свойствами, позволяет получать новые высококачественные целевые продукты. С другой стороны, вовлечение в производственный цикл в качестве ВМР различных отходов позволит снизить экологическую нагрузку на окружающую среду. В ряде отраслей эта задача решается следующим образом.

В химической промышленности и при производстве строительных материалов исполь-

© Макаренков Д.А., 2012.

зуются гранулированные комплексные химические модификаторы, полученные с использованием отходов целлюлозно-бумажных комбинатов, использование торфа в качестве органической части позволяет отечественным заводам получать комплексные гранулированные органоминеральные удобрения [10; 11]. Порошковые и зернистые материалы после гранулирования приобретают новые технологические свойства и становятся экологически безопасными при использовании. Гранулированные продукты зачастую позволяют применять ВМР (например, твердые бытовые или растительные отходы) вместо природного сырья или в качестве альтернативных источников топлива. В последние годы класс перерабатываемых материалов расширился за счет новых типов отходов: технический углерод после пиролиза покрышек и полимеров, пивной дробины, спиртовой барды, кизельгура, ферментных препаратов (пищевой и фармацевтической промышленности), древесных и растительных отходов. Задача их перевода в гранулированное состояние является актуальной и носит как прикладной, так и научный характер [4].

При гранулировании широкого класса многокомпонентных и полидисперсных веществ необходимо выявить общие закономерности структурообразования и лимитирующие факторы, определяющие потребительские свойства гранул. При прессовом гранулировании и окатывании дисперсных сред структура гранулы формируется за счет внешнего воздействия. С учетом их реологического поведения, разработанные реологические модели уплотнения сложных дисперсных систем основаны на таких фундаментальных знаниях, как теория адгезии Б.В. Дерягина, физико-химическая механика дисперсных сред П.А. Ребиндера, представления о капиллярно-пористых телах и механики уплотнения дисперсных сред М.Б. Генералова [2; 3; 8].

При уплотнении сложных многокомпонентных полидисперсных систем происходят структурные превращения под действием таких факторов, как: молекулярное взаи-

модействие, априори присущее исходным частицам, а также адсорбционных, поверхностно-активных и капиллярных сил, возникающих при вводе связующих. Результаты таких воздействий на мелкодисперсные частицы приводят к образованию агломератов или гранул. Из способов их образования можно выделить три основные группы:

- сухое гранулирование, которое осуществляется при отсутствии в зоне контакта частиц адсорбционных слоёв и капиллярной конденсации, а гранулы образуются при действии молекулярных и электростатических сил, а также за счет взаимодействия вдавливанием их друг в друга;

- граничное гранулирование, осуществляемое при зазорах между частицами такой малой величины, что находящиеся в них адсорбционные слои жидкости по своим свойствам существенно отличаются от частиц, что является основной причиной образования гранул;

- жидкостное (влажное) гранулирование, соответствующее соединению сухих частиц посредством жидкости в таких условиях, когда решающим фактором гранулообразования становится гидродинамика вязкой жидкости без учета природы частиц порошка и молекулярных взаимодействий.

Гранулирование ВМР сопровождается образованием кристаллизационных структур, мостиков из твердых частиц за счет сплавления, химических и твердофазных реакций, а также применения связующих, способных к отверждению. Большое распространение в технике утилизации отходов получило прессовое гранулирование, основанное на силовом воздействии, создающее определенные структуры в дисперсных системах с высокой концентрацией дисперсной фазы. В промышленности, на основе вышеперечисленных способов, применительно к многокомпонентным и полидисперсным шихтам сложилась следующая классификация методов гранулирования с учетом технологической влажности исходных материалов ($W_{исх}$, % масс): 1) метод таблетирования (таблет-машины), $W_{исх}=(1-6)$; 2) метод компактирова-

ния и брикетирования на валковых прессах $W_{исх}=(6-8)$; 3) метод формования и проходного прессования как в экструдерах, так и в роторных грануляторах с кольцевой и плоской матрицей $W_{исх}=(10-18)$; 4) метод окатывания в тарельчатых, барабанных и скоростных грануляторах $W_{исх}=(18-40)$.

При выборе метода гранулирования разнородных сред необходимо руководствоваться определенными принципами. Перерабатываемые среды следует объединить в несколько групп, отличающиеся физико-химическими и структурно-деформационными свойствами, а также реологическими характеристиками [5]. Набор таких характеристик рассматриваемых материалов связан с тем, что они являются многокомпонентными шихтами, содержащими в своем составе хрупкие, пластичные, гигроскопичные и др. компоненты. При анализе характеристик дисперсных сред, промышленных шихт и отходов их реологические свойства в процессах гранулирования можно описать с помощью реологических моделей. Это связано с тем, что при подготовке шихт и гранулировании за счет механоактивации, ввода связующих и смешения, смесь «переходит» из одного реологического состояния в другое [6]. При этом дисперсная среда обладает предельным напряжением сдвига; предельные напряжения сдвига разрушают дисперсную среду, а напряженное состояние в любой точке объема описывается симметричным тензором напряжения. Изменения напряжения при нагружении в условиях сдвига можно описать с помощью механических моделей ньютоновских, вязких и вязкоупругих жидкостей. Деформация дисперсных сред происходит во время сдвига или скольжения объемов частиц под действием касательных напряжений вдоль полос скольжения [1]. Рассмотрим некоторые группы промышленных шихт, ДС и отходов и механические модели, используемые для их описания.

Стекольные, эмалевые и стеклообразующие шихты, поведение которых описывается моделью сыпучесвязных сред, а связь между нормальными σ_n и касательными τ_n напряже-

ниями описывается уравнением Кулона-Мора;

$$\tau_n \leq f \cdot \sigma_n + C, \quad (1)$$

где: $f = \operatorname{tg} \varphi$ - коэффициент внутреннего трения; φ - угол внутреннего трения; C - коэффициент сцепления.

Шихты, составленные из песчаных смесей, кремнеземистых отходов и вяжущих на основе оксидов кальция (например, формовочные смеси, безобжиговый силикатный гравий) ведут как сыпучепластичные среды, реологическое поведение которых описывается уравнением Кулона-Мора или Ньютона. Для вязкой среды Ньютона напряжения пропорциональны скорости деформации [9]

$$\tau = \eta \dot{\epsilon}; \quad \sigma = \eta_r \dot{\epsilon} \quad (2),$$

где: η - вязкость при сдвиге, Па·с; $\dot{\epsilon}$ - скорость сдвига, с⁻¹; η_r - вязкость при продольном течении, Па·с; $\dot{\epsilon}$ - скорость продольного течения, с⁻¹

Гранулы и прессовки из природных цеолитов, перлита, трепела и углеродсодержащих адсорбентов получают обычно экструзией или таблетированием с дальнейшей термообработкой. Их реологические свойства могут быть описаны при помощи моделей упругопластической среды, состоящей из элементов Гука и Сен-Венана, а также упруго-вязко релаксирующей среды Максвелла. При возрастании нагрузок могут возникать эффективные напряжения, которые превзойдут прочность жестких структурных связей, то есть при $\tau < \tau_t$ происходит упругая деформация, а при $\tau = \tau_t$ - пластическое течение. При этом в местах контактов возникают как жесткие структурные, так и водно-коллоидные связи. Для несвязных сыпучих, например сухих шихт, сопротивление сдвигу определяется только их сопротивлением трению (кулоново трение). Считают, что трение остается неизменным при постоянном нормальном давлении, а деформация независима от скорости нагружения. Работа, затраченная на пластическую деформацию, идет на преодоление внутреннего трения и полностью рассеивается, обращаясь в теплоту.

Продукты медицинской и пищевой промышленности (такие, как биологиче-

ские добавки, ферменты, абомин, лактозим, анальгин, молокосвертывающие сычужные ферментные препараты, содержащие сычужные ферменты, поваренную соль, крахмал, хлористый кальций и другие компоненты) получают методами таблетирования. Процесс уплотнения материала описывается компрессионными кривыми, характеризующими изменение плотности таблеток от удельного давления прессования. Графическая интерпретация результатов компрессионных испытаний выявила три стадии уплотнения материала. Это упругая деформация каркаса материала; структурно-механические изменения уплотняемых частиц материала и их пластическая деформация; пластическое затекание связующего в пространство между порами материала и образование плотно-прочной прессовки. В зависимости от химического состава эти материалы могут вести себя как упругое и упругопластическое тело, а их реологическое поведение описывается моделью, состоящей из упругого элемента Ньютона и пластического элемента Сен-Венана.

Глинистые массы в виде порошков, содержащие воду и связующее ведут как упруговязкие и пластичные тела, а их реологические свойства описываются моделями Кельвина-Фогта и Максвелла [8]. Для увлажненных вязких шихт, содержащих агрегаты частиц с водно-коллоидными связями, сопротивление сдвигу складывается из сил вязкости (вязкое сопротивление) и сил сцепления. Силы вязкости определяются скоростью нарастания напряжений сдвига, а силы сцепления – уплотняющими давлениями в местах контактов частиц. Деформация ϵ тела Максвелла представляет сумму деформаций упругого и вязкого элементов ϵ_y и ϵ_b [9]:

$$\epsilon = \epsilon_y + \epsilon_b \quad (3)$$

Согласно закону Гука $\epsilon_y = y/N$, где y – относительная линейная деформация; N – модуль упругости, Па. Из закона Ньютона следует, что $\dot{\epsilon}_b = y/z_e$, где z_e – коэффициент объемной вязкости. Дифференцируя (3) и подставляя значения $\dot{\epsilon}_b$ и $\dot{\epsilon}_y$, получим:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_b = \frac{1}{N} \dot{y} + \frac{1}{z_e} y. \quad (4)$$

Особенностью вязкоупругого тела, описываемого при помощи модели Кельвина-Фогта, является то, что деформация упругого и вязкого элементов одинакова и равна деформации тела в целом, а усилие, действующее на тело, равно сумме усилий в упругом и вязком элементах:

$$\tau = \nu G_c + \eta \dot{y} \quad (5)$$

где: ν – деформация в момент времени t ; G_c – модуль упругости при сдвиге, Па.

Рассматриваемые среды характеризуются такими реологическими свойствами, как релаксация – процесс перехода упругой деформации в пластическую или процесс длительно протекающих деформаций под постоянной нагрузкой. Релаксация проявляется в конце процесса формования таких масс после снятия нагрузки.

Органоминеральные удобрения (ОМУ) содержат органическую и минеральную части. Их получают в порошковом виде на основе отходов химической промышленности, осадков сточных вод, торфа и сапропеля. В процессе гранулирования прокаткой, компактированием или окатыванием они ведут как пластичные упруговязкие или упруготвердеющие тела. Их поведение описывается комбинацией сложных реологических моделей, таких, как Кельвина-Фогта, Бингама, Шведова, Максвелла, а также Оствальда-де-Вилля. При выводе реологических уравнений таких моделей учитывается, что при последовательном соединении элементов общая деформация системы в каждый момент времени равна сумме деформаций её элементов, а усилия последних – такие же, как и усилие, приложенное к системе в целом. При параллельном соединении элементов в модели деформации элементов одинаковы и равны деформации системы в целом, а сумма сил, действующих на каждый элемент системы, равна общей силе, приложенной к телу.

Рассмотрим подробнее сложные модели упруговязких и упругопластических тел. Деформация тела, при последовательном соединении упругого $\sigma = E(\epsilon_1)$ и вязкого $\sigma = k(\epsilon_2)$ элементов запишется как [9]:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (6)$$

Согласно закону Гука и Ньютона $\varepsilon_1 = f_1(\sigma)$; $\dot{\varepsilon}_2 = f_2(\dot{\sigma})$. Дифференцируя (6) получим

$$\dot{\varepsilon} = f_1'(\sigma)\dot{\sigma} + f_2(\dot{\sigma}) \quad (7)$$

Обозначив $f_1'(\sigma) = \Phi(\sigma)$; $f_2(\dot{\sigma}) = \varphi(\dot{\sigma})$, запишем уравнение (7) в виде

$$\dot{\varepsilon} = \varphi(\dot{\sigma}) + \dot{\sigma}\Phi(\sigma) \quad (8)$$

При наличии зависимостей $\varphi(\dot{\sigma})$ и $\Phi(\sigma)$ псевдолинейное дифференциальное уравнение может быть решено относительно ε .

При параллельном соединении упругого и вязкого элементов (тело Фогта) их деформации одинаковы и равны деформации тела в целом, а усилие, действующее на тело, равно сумме усилий в упругом и вязком элементах $\sigma_1 = E(\varepsilon)$; $\sigma_2 = \kappa(\dot{\varepsilon})$:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (9)$$

Запись уравнения относительно $\dot{\varepsilon}$ имеет вид

$$\dot{\varepsilon} = \Phi_1(\sigma - E(\varepsilon)) \quad (10)$$

где: Φ_1 – функция, обратная функции κ . При известном виде функций Φ_1 и $E(\varepsilon)$ уравнение также имеет аналитическое решение относительно ε .

В отличие от тела Фогта, тело Кельвина испытывает при нагружении мгновенную упругую деформацию, а затем уже развивается явление ползучести, т.е. соответствующая мгновенная деформация. Упругое тело Кельвина имеет две пружины и один амортизатор (рис.1).

Общий вид реологического уравнения для этого тела имеет вид:

$$A \frac{d\gamma}{dt} + B\gamma = C \frac{d\tau}{dt} + D\tau, \quad (11)$$

где A, B, C, D – выражения, составленные из модулей упругости и коэффициента вязкости.

Упруговязкое тело Бингама характеризуется тем, что в начале приложения нагрузки проявляются упругие свойства, а по дости-

жению некоторого предельного значения, «превращается» в тело с вязкими характеристиками. При этом скорость вязкого течения возрастает с увеличением внешнего усилия. Зависимость τ от скорости деформации $\dot{\gamma}$ имеет вид

$$\tau = \tau_T + \eta \cdot \dot{\gamma}, \quad (12)$$

где: τ_T – предел текучести; $\eta = \text{tg}\beta$ – коэффициент текучести.

Упруговязкопластическое тело Шведова отличается от тела Бингама способностью к релаксации напряжений и имеет вид

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau_0 - \tau_T}{\eta} + \frac{\dot{t}}{G}, \quad (13)$$

где τ_0 , τ_T – начальное напряжение и предел текучести, характерные для тела Сен-Венана. Первый член правой части уравнения (13) характеризует скорость вязкого течения, а второй – скорость упругой деформации, пропорциональную скорости изменения напряжений. После преобразований уравнение (13) имеет вид:

$$\tau = \tau_T + (\tau_0 - \tau_T)\exp(-t/T_p), \quad (14)$$

где T_p – время релаксации.

Модели Сен-Винана и Бингама используются при описании процесса гранулирования ОМУ методом окатывания. При получении ОМУ методом компактирования на валковых прессах реологическая модель выражается через элементы Гука и Сен-Венана, соединенные параллельно.

Большую группу зернистых и дисперсных сред составляют **древесные и растительные**

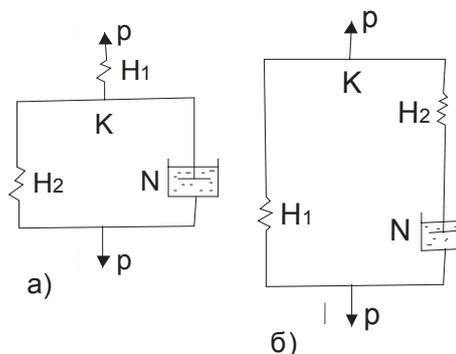


Рис. 1 Упруговязкое тело Кельвина: а) механическая модель при последовательном соединении элементов б) механическая модель при параллельном соединении элементов.

отходы, а также комбикорма. При их гранулировании на роторных грануляторах и компактировании на валковых прессах при использовании связующего и термонагрева до $t=(70-200)^{\circ}\text{C}$ и механоактивации они «ведут» себя как сыпучая, сыпучепластичная и условно пластичная среды. Древесные отходы в виде опилок являются сложной реологической системой, содержащей целлюлозу, лигнин, растворимые в воде сахара и смолы. При их нагреве в процессе формования происходит деструкция этих компонентов с образованием жидкой пластифицированной фазы, что придает системе вязко-пластичные свойства. На первой стадии прессования под воздействием внешнего усилия происходит структурное уплотнение дисперсного слоя в результате смещения частиц относительно друг друга, а на второй стадии происходит его уплотнение в результате деформации частиц. При повышении нагрузки в точках контакта частиц возникают деформации, распространяющиеся по всему объему частиц. Соответствующие напряжения вначале не превышают предела упругости, а при увеличении нагрузки (на третьей стадии) достигают предела текучести. На этой стадии прессования упруго-пластическая деформация частиц определяет основные энергетические затраты процесса. В результате проходного прессования образуется прочная гранула с пористой структурой.

Описание реологической модели мелкодисперсных пластифицированных опилок в условиях сдвига основано на следующих положениях. При нагружении во входной части канала смесь вначале ведет себя как упругое тело Гука. С ростом напряжения сдвига достигается некоторый предел, после чего начинается вязкое течение со скоростью, пропорциональной напряжению сдвига. Рост температуры в объёме древесных отходов, проходящих через канал фильеры, приводит к выделению смол и лигнина. ДС «переходит» из сухого состояния в вязкое, что придает системе новые свойства. Реологическую модель таких сред можно представить в виде вязкого элемента Ньютона (N_1), характеризующе-

го вязкие свойства связующего при сдвиге, упругого элемента Гука (H_0) при сдвиге и пластического элемента Сен-Венана, характеризующего кулоново трение основы смеси (stv_1).

Реологическая модель проходного прессования древесных опилок (ДО) методом проходного прессования можно представить в виде трех элементов, соединенных по схеме:

$$DO_{\text{сдвиг}} = N_1 - (H_0/stv_1) \quad (15)$$

Деформация механической модели будет складываться из деформации упругого элемента N_1 и суммарного элемента ($N+H_2$), то есть можно записать

$$\gamma = \gamma_{N_1} + \gamma_{\Sigma}, \quad (16)$$

где γ_{Σ} - деформация комплексного элемента тел Гука и Сен-Венана.

Значение γ_{N_1} определяется из уравнений

$$\gamma_1 = \frac{\tau}{G_1}, \dot{\gamma}_1 = \frac{\dot{t}}{G_1}$$

Деформация γ_{Σ} определяется из следующих соображений. При параллельном соединении полная нагрузка на тело равна сумме нагрузки на каждый элемент, а деформация (скорость деформации) равна деформации (скорости деформации) любого из составляющих его элементов. Исходя из общего правила реологии, для сложного элемента $N+H_2$ можно записать

$$\tau = G_2 \gamma_{\Sigma} + \eta \dot{\gamma}_{\Sigma}, \quad (17)$$

где: τ - напряжение сдвига комплексного элемента ($N+H_2$), G_2 - модуль упругости сдвига элемента H_2 , η - коэффициент вязкости N , $\dot{\gamma}_{\Sigma}$ - скорость деформации элемента N .

Продифференцируем уравнение (17) и получим выражение следующего плана

$$\dot{\gamma} + \frac{G_2}{\eta} \gamma = \frac{G_1 + G_2}{G_1 \cdot G_2 \cdot \eta} \dot{t} + \frac{1}{G_1} \tau \quad (18)$$

Уравнение (18) - линейное дифференциальное уравнение первого порядка, решение которого позволяет определить величину сдвига при статическом воздействии на дисперсную древесную среду. Установлено, что в зависимости от состава опилок, температуры, способа нагружения древесная смесь с пластифицирующими компонентами ведет себя как вязко-упругое пластичное тело.

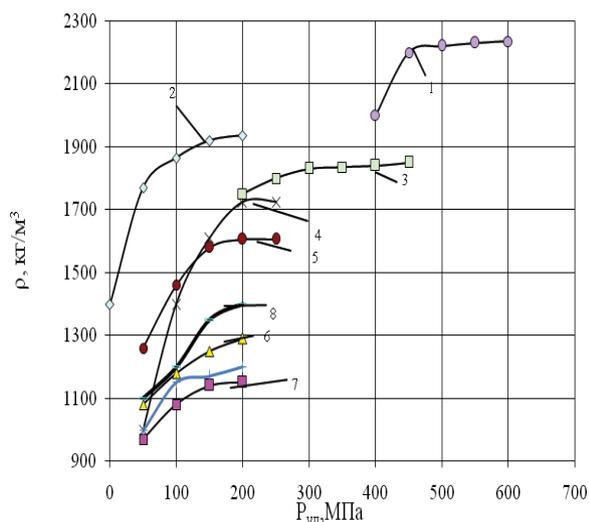


Рис. 2. Зависимость плотности многокомпонентных дисперсных сред от удельного давления прессования: 1- металлические порошки; 2-стекольные и эмалевые шихты; 3- золошлаковые отходы; 4- углеродсодержащие адсорбенты; 5- ферментные препараты и БАД; 6- пылевидная глина; 7- пористые материалы:перлит, микротальк; 8- древесные опилки (пеллеты); 9- ОМУ

Правомерность разделения ДС и отходов на такие группы по реологическим свойствам подтверждают компрессионные кривые, полученные при прессовании порошков в закрытой матрице (рис.2). Для оценочных расчетов компрессионные кривые могут быть описаны уравнениями степенного или экспоненциального вида [7]:

$$\theta = \theta_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{|\sigma_{cp.}|}{\lambda \cdot \theta_0}} \right) \quad (19),$$

где: $\theta = \ln(V_0/V)$ – натуральная логарифмическая оценка изменения объема порошка от начального значения V_0 до текущего V ; θ_0 – объем порошка, при насыпной плотности; $\sigma_{cp.} = -P_{уд}$ – среднее напряжение; $P_{уд}$ – давление. Построив зависимость $\rho = \rho(P_{уд})$ в виде

$$\theta = f \left(\frac{|\sigma_{cp.}|}{\lambda} \right),$$

можно для нелинейного участка кривой получить зависимость

$$|\sigma_{cp.}| = \lambda \cdot \theta_0 \cdot \ln \cdot \frac{\theta_0}{\theta_0 \cdot \theta},$$

где λ - угол, образованный касательной к компрессионной кривой в начале координат.

Ряд продуктов предпочтительнее гранулировать методом окатывания, который характеризуется получением менее прочных гранул. Механизм гранулообразования можно представить в виде шести стадий (рис.3).

Таким образом, проведенная классификация ДС и ВМР на основе реологических моделей их поведения в процессе деформирования и требований к конечному сгранулированному продукту (например, по форме частиц – сферические гранулы, «крупка», плитка, пеллеты и таблетки) позволяет спрогнозировать механизм структурообразования материалов. Приведенная классификация позволяет определить комплексные физико-химические методы, механические и терми-



Рис. 3 Механизм гранулообразования шихты при её получении методом окатывания: 1-исходная шихта после перемешивания при начальной технологической влажности; 2-стадия увлажнения шихты; 3- первичная стадия образования гранул; 4- завершающая стадия образования гранулы; 5- стадия роста гранул; 6- окончательное структурообразование гранулы.

ческие действия, направленные на получение качественного плотнопрочного материала и тем самым, является элементом управления свойствами дисперсной среды.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Виноградов Г.А., Каташинский В.П. «Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул». – М.: Металлургия, 1979. – 224 с.
2. Генералов М.Б. Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии: Учебное пособие для ВУЗов. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2002. – 592 с.
3. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смигла В.П. Адгезия твердых тел. – М.: Наука, 1973. – 280с.
4. Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.П. Гранулирование. – М.: Химия, 1991. – 240 с.
5. Макаренков Д.А. «Исследование процесса компактирования и окатывания дисперсных сред с регулируемыми реологическими характеристиками»: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГУИЭ, 2000. – 260 с.
6. Назаров В.И., Макаренков Д.А. «Управление процессами грануляции полидисперсных шихт и порошков методами компактирования и окатывания на основе реологических моделей // Химическое и нефтегазовое машиностроение». – 2005 г., №6. – С.6-9
7. Перельман В.Е. Формование порошковых материалов. – М.: Металлургия, 1979. – 350 с.
8. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
9. Степанов Р.Д. Введение в механику полимеров. Издательство Саратовского университета, 1975. – 230 с.
10. Сулименко Л.М., Альбац Б.С. Агломерационные процессы в производстве строительных материалов. ВНИИЭСМ. – 1994. – 297с.
11. Чехов О.С., Назаров В.И., Калыгин В.Г. Вопросы экологии в стекольном производстве. – М.: Легпромбытиздат, 1990. – 144 с.