

Севостьянов В. С., д-р техн. наук, проф.,  
Ильина Т. Н., канд. техн. наук, проф.,  
Севостьянов М. В., канд. техн. наук, доц.,  
Шкарпеткин Е. А., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПРОЦЕССА МИКРОГРАНУЛИРОВАНИЯ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

lina50@rambler.ru

Проведены аналитические исследования процессов фильтрации газообразной и жидкой фаз при вибро-валковом уплотнении дисперсных систем. Исследованы условия упругого последействия в сформированном микрогрануляте. Получены уравнения для расчёта конструктивно-технологических параметров уплотняющего устройства.

**Ключевые слова:** микрогранулирование, уплотнение, деформация, фильтрация, релаксация напряжений, уплотняющие валки, виброжёлоб.

Результаты экспериментальных исследований процесса формирования порошкообразных материалов с различными физико-механическими свойствами свидетельствуют о необходимости аналитического описания основных закономерностей указанного процесса [1]. Следует отметить, что в существующих подходах к описанию процессов уплотнения порошкообразных смесей не учитываются специ-

фические особенности процесса гранулообразования трехфазных шихт при малых давлениях формирования. Постадийный процесс уплотнения дисперсной системы, состоящей из трехфазной шихты, включает стадии удаления газообразной фазы и перемещения жидкости в поровом пространстве, формирования образца и упругой деформации (рис. 1).

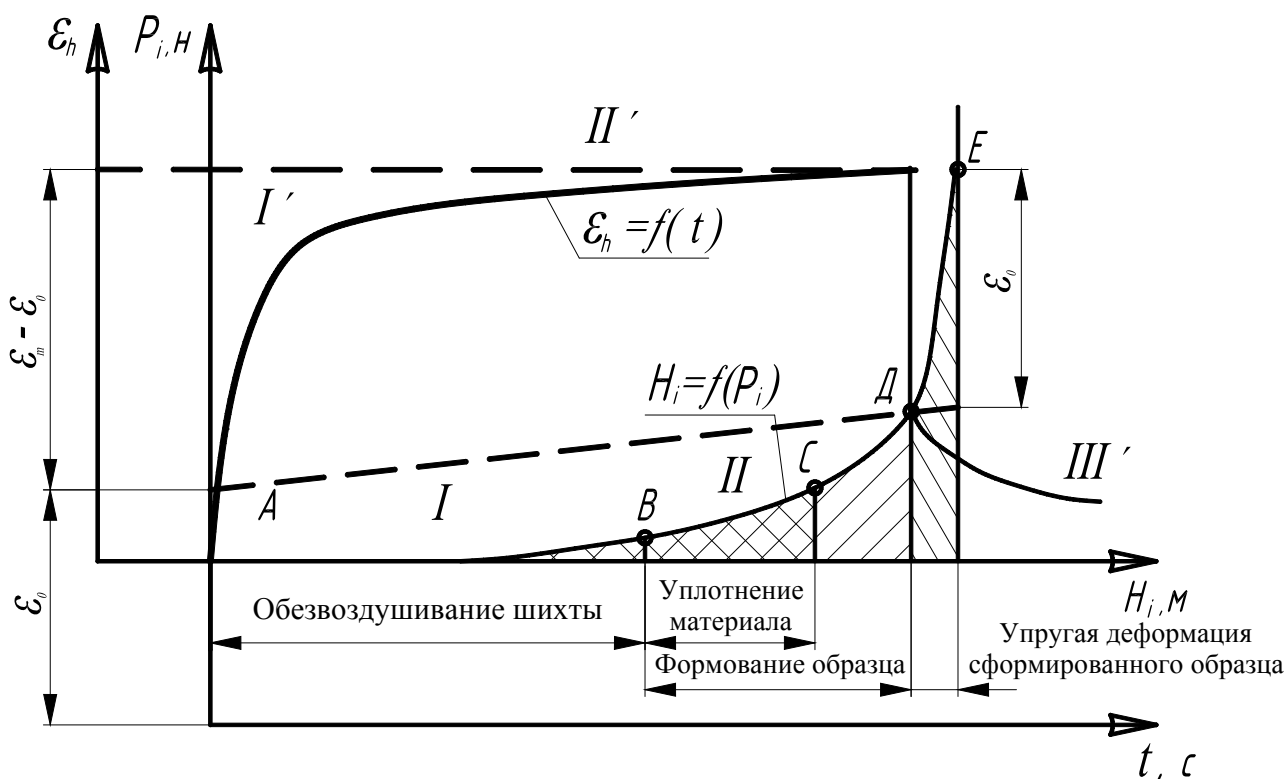


Рисунок 1. Схема постадийного процесса уплотнения трехфазной шихты

Скорости абсолютной ( $\mathcal{G}_a$ ) и относительной ( $\mathcal{G}_{омн}$ ) деформации равны

$$\mathcal{G}_a = \frac{d(\Delta H)}{dt}, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \mathcal{G}_{омн} = \frac{d(\varepsilon_H)}{dt}, \text{ с}^{-1}. \quad (1)$$

Так как  $d(\varepsilon_H) = \frac{d(\Delta H)}{H_{обр}}$ , где  $H_{обр}$  - высота деформируемого образца, м, тогда

$$\mathcal{G}_{омн} = \frac{d(\Delta H)}{dt} \cdot \frac{1}{H_{обр}} = \frac{\mathcal{G}_a}{H_{обр}}, \text{ с}^{-1}. \quad (2)$$

Из приведенных выражений можно сделать следующие выводы: скорость абсолютной деформации формуемого образца изменяется пропорционально степени его уплотнения, т.е. уменьшению высоты образца. Установленные нами экспериментально общие закономерности процесса уплотнения порошкообразных шихт с различными физико-механическими характеристиками свидетельствуют о снижении величины абсолютной деформации формуемого тела с ростом внешнего усилия [2].

Величину относительной деформации шихты можно установить из выражения [3]:

$$\varepsilon_H = \frac{\bar{P}_i}{E_1} + \frac{\bar{P}_i - \bar{P}_k}{E_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_1}\right) \right], \quad (3)$$

которое свидетельствует о наличии при уплотнении шихты упругой составляющей деформации (первый член -  $E_1, E_2$  - модуль упругости и эластичности, соответственно) и вязкопластической составляющей (второй член -  $\eta_1$  - пластическая вязкость,  $P_k$  - предел текучести).

После дифференцирования выражения (3) по  $t$  получим

$$\bar{P}_i = E_1 \cdot \mathcal{G}_{омн} \cdot t + \bar{P}_i - \frac{E_1(\bar{P}_i - \bar{P}_k) \cdot t}{\eta_1} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_1}\right) \right]. \quad (7)$$

Учитывая, что в результате преобразования уравнения (6) значение  $\bar{P}_{\varepsilon=const}$  - напряжение при постоянной деформации, является составной частью выражения (7), соответственно, имеем:

$$\bar{P}_i = \bar{P}_{\varepsilon=const} + E_1 \cdot \mathcal{G}_{омн} \cdot t. \quad (8)$$

Анализ исследуемых нами процессов уплотнения и деформации трехфазной шихты,

$$\mathcal{G}_{омн} = \frac{\mathcal{G}_{\varepsilon_H}}{E_1} + \frac{\bar{P}_i - \bar{P}_k}{\eta_1} \exp\left(-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_1}\right), \quad (4)$$

где  $\mathcal{G}_{\varepsilon_H}$  - скорость нарастания напряжения в процессе уплотнения частиц сформованного тела,  $\text{Н/м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

При реализации процесса формирования шихты способом гранулообразования в отличие от процесса прессования, как правило, используются незначительный диапазон внешнего силового воздействия в различных вариантах его реализации (окачивание, виброгранулирование, экструдирование, центробежное формование и др.), что свидетельствует о необходимости изучения условий напряженного состояния сформованных тел при прекращении внешнего силового воздействия.

При вышеуказанном условии  $\mathcal{G}_{омн} = 0$  выражение (4) принимает вид:

$$0 = \frac{\mathcal{G}_{\varepsilon_H}}{E_1} + \frac{\bar{P}_i - \bar{P}_k}{\eta_1} \exp\left(-E_2 \frac{t}{\eta_1}\right), \quad (5)$$

откуда скорость падения напряжения при прекращении силового воздействия

$$\mathcal{G}_{\varepsilon_H} = -E_1 \cdot \frac{\bar{P}_i - \bar{P}_k}{\eta_1} \cdot \exp\left(-E_2 \frac{t}{\eta_1}\right). \quad (6)$$

Отсюда следует важный для практики формирования смесей вывод о том, что при постоянной скорости их деформации скорость падения напряжения в материале пропорциональна скорости пластических деформаций. При создании технических средств для реализации процесса формирования необходимо обеспечить временные условия для релаксации напряжений в материале, возникающих при его деформировании, т.е. время релаксации должно быть достаточным для превращения упругих деформаций в пластические:

описанных аналитическими выражениями, показывает, что при внешнем давлении уплотнения, не превышающем предела текучести упруговязкопластической шихты (на стадии ее обезвоздушивания), скорость ее деформации существенно не влияет на сопротивление деформации (напряжения) со стороны уплотняемой шихты.

При внешнем давлении, превышающем предел текучести влажной шихты, сопротивление деформации зависит от скорости деформации, требующей определенного времени релаксации упруго-вязко-пластической структуры.

Указанные общие закономерности необходимо учитывать при разработке процессов формования гранул и технических средств для его реализации.

Из известных технологических приемов удаления газообразной фазы при формовании порошкообразных смесей (виброуплотнение, вакуумирование, шнековое предуплотнение и др.), наиболее целесообразно применять способ комбинированного воздействия. Это может

обеспечить не только рациональный способ предподготовки уплотняемой смеси к гранулообразованию при минимальных энергозатратах, но и позволит сочетать два технологических приема: удаление газообразной фазы и получение микрочастиц (микрогранулята), являющихся центрами гранулообразования.

Техническим решением указанного технологического приема может служить вибро-валковый способ предварительного уплотнения шихты, который позволит сочетать удаление газообразной фазы и получение микрочастиц (микрогранулята), являющихся центрами гранулообразования, за счёт профильной поверхности валков (рис. 2).

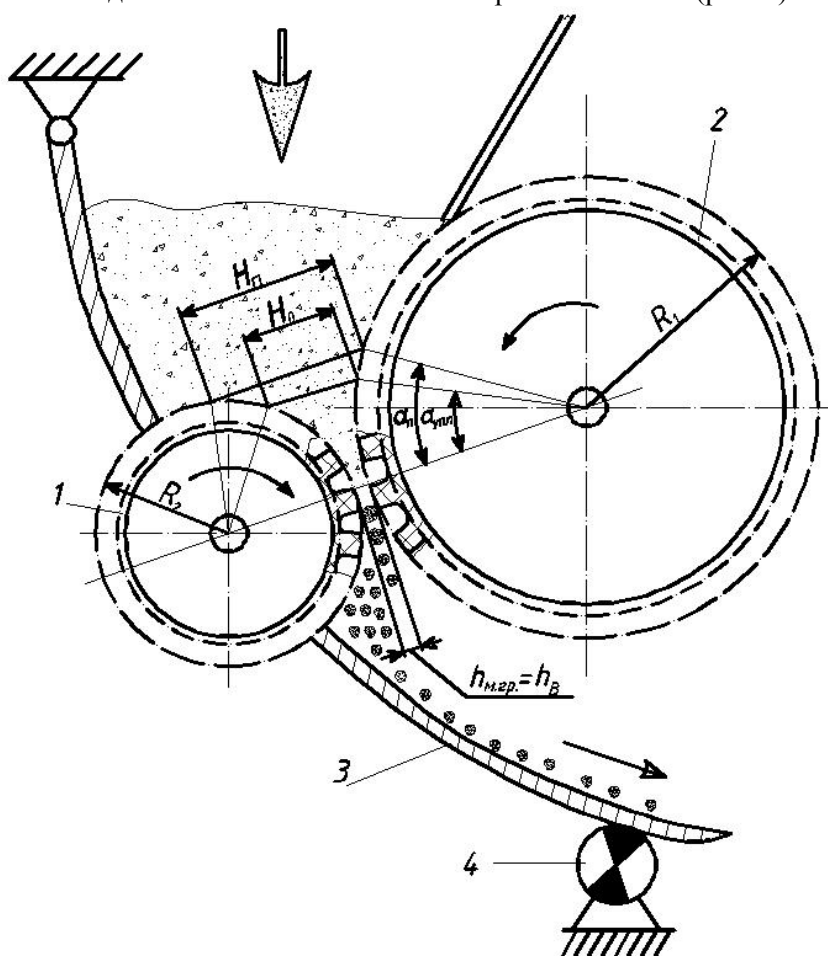


Рисунок 2. Схема процесса предварительного уплотнения:  
1, 2 – уплотняющие валки; 3 – виброжелоб; 4 – вибратор

На процесс предварительного уплотнения шихты большое влияние оказывают ее физико-механические параметры: сыпучесть материала, зависящая от гранулометрического состава и влажности материала, формы его частиц; коэффициенты внутреннего и внешнего трения, скорость удаления газообразной фазы и др.

Сыпучесть порошкообразных материалов  $q$  можно представить для нашего случая в виде функции [4].

$$q = f \left( Ar, \frac{h_{м.сп}}{H_0}, f_i, \frac{h_{м.сп}}{d_{ср.взв}} \right), \quad (9)$$

где  $Ar$  - критерий Архимеда;  $h_{м.сп}$  - толщина уплотненного между валками слоя материала (микрогранулята), м;  $H_0$  - толщина исходного слоя материала, м;  $f_i$  - коэффициент внутренне-

го трения;  $d_{ср.взв}$  - средневзвешенный размер частиц, м.

Массовый расход материала с учетом его сыпучести  $q$  через межвалковый зазор равен

$$G_q = Bh_B \cdot q. \quad (10)$$

Массовый расход материала при его микрогранулировании

$$G_{м.зр} = \dots \cdot \rho_{м.зр}. \quad (11)$$

С учетом закона сохранения массы  $G_q \geq G_{м.зр}$  или с учетом значений (10) и (11) получим численное значение минимальной скорости микрогранулирования

$$\mathcal{G}_{м.зр\min} = \frac{q}{\rho_{м.зр}}. \quad (12)$$

Максимальное значение скорости микрогранулирования  $\mathcal{G}_{м.зр\max}$  ограничивается скоро-

$$\mathcal{G}_{з.ф} = \mathcal{G}_{\max} \left( \frac{\rho_{м.зр}}{\rho_0} - 1 \right) \frac{h_{м.зр}}{h_{м.зр} + (R_1 + R_2)(1 - \cos \alpha_{\text{упл.д}})}. \quad (14)$$

С учетом  $Re_{кр} = \frac{\mathcal{G}_{кр} \cdot d_{ср.взв}}{\nu}$ , а также выражений (13) и (14) получим максимальную скорость предварительного уплотнения шихты

$$\mathcal{G}_{\max} = \frac{Ar^{0,68} \cdot H_0 \cdot \nu \cdot \rho_0}{600 \cdot h_{м.зр} \cdot (\rho_{м.зр} - \rho_0) d_{ср.взв}}. \quad (15)$$

Таким образом, при разработке конструктивно-технологических решений процесса микрогранулирования порошкообразных частиц в устройствах валкового типа необходимо соблюдать условие  $\mathcal{G}_{м.зр\min} \leq \mathcal{G}_{з.ф} \leq \mathcal{G}_{м.зр\max}$  т.е.

$$\frac{q}{\rho_{м.зр}} \leq \pi D_1 n_e \leq \mathcal{G}_{\max} = \frac{Ar^{0,68} \cdot H_0 \cdot \nu \cdot \rho_0}{600 \cdot h_{м.зр} \cdot (\rho_{м.зр} - \rho_0) d_{ср.взв}},$$

откуда частота вращения формующего вала

$$n_e \geq \frac{q}{\pi D_1 \rho_{м.зр}}, \quad (16)$$

$$n_e \leq \frac{Ar^{0,68} \cdot H_0 \cdot \nu \cdot \rho_0}{1884 \cdot D_1 \cdot h_{м.зр} \cdot (\rho_{м.зр} - \rho_0) d_{ср.взв}}.$$

стью фильтрации газообразной фазы (воздуха), движущейся навстречу уплотняемому слою порошкообразного материала и затрудняющей его доставку в зону уплотнения между валками.

Критическая скорость фильтрации газообразной фазы через слой порошкообразного материала ограничивает значение  $\mathcal{G}_{м.зр\max}$  и определяется значением критерия Рейнольдса [4]:

$$Re_{кр} = \frac{Ar^{0,68}}{600} \left[ \frac{H_{II}}{h_{м.зр} + (R_1 + R_2)(1 - \cos \alpha_{\text{упл.д}})} \right]. \quad (13)$$

Полагая, что расход газообразной фазы через верхнее сечение зоны уплотнения шириной  $H_0 = h_{м.зр} + (R_1 + R_2)(1 - \cos \alpha_{\text{упл}})$  составляет  $Q_{з.ф} = \mathcal{G}_{з.ф}$ , определяем критическую скорость фильтрации газообразной фазы

Если процесс предварительного уплотнения формуемой порошкообразной смеси не сопровождается значительными энергозатратами, то процесс деформирования уплотненной влагонасыщенной шихты сопровождается как структурно-механическими изменениями формуемых образцов (переориентацией и упаковкой полидисперсных частиц, их адгезионо-аутогезионным взаимодействием и др.), так и миграцией жидкой фазы из зон наибольшего напряжения.

Для описания этого процесса использовано уравнение фильтрации Дарси, при решении которого получено уравнение для расчёта необходимого времени фильтрации жидкости через зернистый слой формуемой смеси:

$$\tau_{\phi} = 0,5 \eta_{ж} \cdot r_0 \cdot X_0 \frac{V_{ж}^2}{S^2 \cdot \Delta P}. \quad (17)$$

где  $r_0, X_0$  – удельное сопротивление и приведенная толщина слоя зернистой среды,  $m^{-1}$ , соответственно.

В силу несжимаемости жидкой фазы и недостаточности времени ее фильтрации в слое формуемой смеси при  $\Delta P = const$  значительно возрастают упругие деформации в формуемом теле, что не способствует наиболее плотной

упаковке частиц, а следовательно, проявлению сил сцепления между ними.

Проведенные нами теоретические исследования процесса постадийного уплотнения влагонасыщенных порошкообразных материалов свидетельствуют о необходимости при формировании микрогранулята обеспечивать определенную выдержку формируемой шихты под давлением. Это способствует не только созданию благоприятных условий для окончательного удаления газообразной фазы из формируемого материала, но и обеспечению релаксации появившихся напряжений в микрогранулах, а также создает необходимые условия для фильтрации жидкой фазы в межпоровом пространстве.

Изучение процессов деформирования порошкообразных материалов и их релаксации после снятия напряжения позволило установить необходимое время упругой релаксации материала:

$$\tau_{\text{упр.р}} = \frac{(\ln \sigma_0 - \ln \sigma_\tau) \Theta}{\ln l}, \quad (18)$$

где  $\sigma_0$  - начальное напряжение материала, Н/м<sup>2</sup>;  $\sigma_\tau$  - текущее напряжение в слое формируемого материала, Н/м<sup>2</sup>;  $\Theta$  - период упругой релаксации

$$\frac{\Theta(\ln \sigma_0 - \ln \sigma_\tau)}{\ln l} \leq \frac{2}{\pi n_{\text{ф.в.}}} \sqrt{\frac{P(1-\mu^2)}{\pi E_{\text{ф.в.}} R_{\text{ф.в.}}}} \geq 0,5 \eta_{\text{жс}} \rho_0 X_0 \frac{V_{\text{жс}}^2}{S^2 \Delta P}, \quad (20)$$

откуда, для обеспечения упругой релаксации материала

$$n_{\text{ф.в.}} \leq \frac{2 \ln l \cdot \sqrt{P(1-\mu^2)}}{\pi (\ln \sigma_0 - \ln \sigma_\tau) \Theta \cdot \sqrt{\pi E_{\text{ф.в.}} R_{\text{ф.в.}}}}. \quad (21)$$

Для обеспечения условий фильтрации жидкой фазы

$$n_{\text{ф.в.}} \leq \frac{2 \cdot \sqrt{P(1-\mu^2)} \cdot S^2 \Delta P}{0,5 \eta_{\text{жс}} r_0 X_0 V_{\text{жс}}^2 \cdot \sqrt{\pi E_{\text{ф.в.}} R_{\text{ф.в.}}}}. \quad (22)$$

Для обеспечения заданной производительности гранулятора при получении качественной продукции необходимо учитывать требуемые значения  $n_{\text{ф.в.}}$ .

На структурообразование гранул при их постадийном формировании важное значение оказывает процесс микрогранулирования (образования уплотненных зародышей), который в

дальнейшем стабилизирует качественные характеристики гранул (их геометрические размеры, форму, плотность и др.)

дальнейшем стабилизирует качественные характеристики гранул (их геометрические размеры, форму, плотность и др.)

дальнейшем стабилизирует качественные характеристики гранул (их геометрические размеры, форму, плотность и др.)

дальнейшем стабилизирует качественные характеристики гранул (их геометрические размеры, форму, плотность и др.)

дальнейшем стабилизирует качественные характеристики гранул (их геометрические размеры, форму, плотность и др.)

дальнейшем стабилизирует качественные характеристики гранул (их геометрические размеры, форму, плотность и др.)

$$n \leq \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{[K_{\text{м.к.}} - \sigma_r (1 + K_\varphi) \zeta]}{[K_{\text{упл.}} \cdot \rho_0 \cdot r_{0\text{м.зр.}} (r_0 + r_{0\text{м.зр.}})] (1 + K_\varphi)}}, \quad (23)$$

где  $K_{\text{м.к.}} = 2K_{\text{сц}} \cos \varphi$  и  $K_\varphi = \sin \varphi$  ( $\varphi$  - угол внутреннего трения материала,  $K_{\text{сц}}$  - коэффициент сцепления) [6], где  $\zeta = \frac{2\kappa_\varphi}{1 + \kappa_\varphi} = \frac{2 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$ .

Окончательно получим

$$n \leq \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2K_{\text{сц.}} \cos \varphi - \sigma_r (1 + K_\varphi) \zeta}{K_{\text{упл.}} \cdot \rho_0 \cdot r_{0\text{м.зр.}} (r_0 + r_{0\text{м.зр.}}) (1 + \sin \varphi)}}. \quad (24)$$

Это выражение, характеризующее общие условия процесса микрогранулирования частиц способом их объемного сжатия, позволяет установить не только скоростной параметр динамического воздействия на уплотняемые частицы для данного технического решения (уплотняющих валков), но и позволяет определить влияние других физико-механических характеристик материала и технологических параметров уплотняющего устройства на процесс гранулообразования.

С увеличением коэффициента уплотнения смеси  $K_{упл}$  значения « $H_0$ » (см. рис. 2) должны быть уменьшены, т.к. для достижения большей степени деформации уплотняемых частиц необходим больший период динамического воздействия (время формования), а это может быть достигнуто лишь при меньшей частоте вращения уплотняющих валов, либо при увеличении их геометрических размеров. Для уплотняющих валков большего диаметра, соответственно, возрастает и время деформации материала.

Данное утверждение подтверждается полученным аналитическим выражением, согласно которому длина зоны уплотнения и деформации частиц равна  $L_{упл.д} = \frac{2\pi r_1 \alpha_0}{360}$ , а длительность

процесса

$$t = \frac{\alpha_0}{360n} = \frac{\arccos \left[ 1 - \frac{H_0 - 2(r_{м.сп} - R_{сп} - r_1)}{2R_{сп}} \right]}{360n}. \quad (25)$$

С увеличением геометрических размеров микрогранул (до  $r_{м.сп}$ ) время динамического воздействия на уплотняемые частицы также должно быть увеличено, а частота вращения уплотняющих валков, соответственно, уменьшена. Это обусловлено необходимостью создания бла-

гоприятных условий для удаления газообразной фазы из уплотняемой смеси, осуществления миграционных процессов жидкой фазы, а также обеспечения равномерного распределения напряжений по объему формируемых микрогранул.

Таким образом, проведенные нами теоретические исследования позволяют научно обоснованно подходить к разработке конструктивно-технологических решений для реализации процесса гранулообразования в дисперсных системах с различными физико-механическими свойствами материалов, учитывая условия уплотнения и упругого последствия в сформованном микрогрануляте.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ильина, Т.Н.* Процессы агломерации в технологиях переработки дисперсных материалов : Монография / Т.Н. Ильина. – Белгород : Изд. БГТУ, 2009. – 229 с.
2. *Ильина, Т.Н.* Механизм постадийного гранулообразования полидисперсных материалов / Т.Н. Ильина, В.С. Севостьянов, В.И. Уральский, М.В. Севостьянов, Е.А. Шкарпеткин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010.- № 4. – С.3 – 7.
3. *Ничипоренко, С.П.* Основные вопросы теории процессов обработки и формования керамических масс. – Киев: Изд. АН УССР, 1960. – 112 с.
4. *Генералов, М. Б.* Расчет оборудования для гранулирования минеральных удобрений / М.Б. Генералов, П.В. Классен, И.П. Шомин. – М.: Машиностроение, 1984.– 192с.
5. *Рындин, Н.И.* Краткий курс теории упругости и пластичности. – Л.: Изд. Ленинград. унта, 1974. – 134 с.
6. *Терцаги, К.* Теория механики грунтов. – М.: Гостройиздат, 1961. – 86 с.