

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-99-107

Севостьянов В.С., *Шкарпеткин Е.А., Севостьянов М.В., Бабуков В.А.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
*E-mail: tkmm_bstu@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА В КАМЕРЕ ГРАНУЛИРОВАНИЯ

Аннотация. В статье проведен анализ применения технологии компактирования в различных сферах производственной деятельности. Определено направление проведения научно-технических разработок, теоретических и экспериментальных исследований процессов агломерации порошкообразных и вязко-пластичных материалов, а также материалов анизотропной структуры для получения сформованных тел заданной гранулометрии с целью улучшения их потребительских свойств. Приведена математическая модель, описывающая условия движения материала в камере гранулирования, которая была представлена в виде системы дифференциальных уравнений для движения вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической системе координат. По результатам аналитического решения уравнений установлено, что скорость сдвиговых деформаций слоя гранулируемого материала по ширине камеры цилиндрической формы изменяется неравномерно, то есть степень свободы находящихся в ней частиц ограничена. Предложено решение по устранению данного недостатка путем создания более благоприятных условий для реализации процессов гранулообразования, которые могут быть достигнуты в торообразной или близкой к ней по форме камере за счет интенсификации объемно-пространственного перемещения материала. Результаты теоретических исследований подтверждаются при физическом моделировании технологического процесса гранулообразования и свидетельствуют о целесообразности предложенных технических решений.

Ключевые слова: переработка, техногенные материалы, гранулообразование, математическая модель, движение материала, скорость сдвиговых деформаций, моделирование процесса.

Введение. Во многих сферах производственной деятельности широкое применение находит технология компактирования материалов: гранулирование, экструдирование, брикетирование и другие. Каждый из этих способов обладает своими достоинствами и технологически целесообразен. При этом должны быть учтены технологические способы использования сформованных тел для производства строительных изделий, облегченных конструкций, теплоизоляционных смесей и покрытий; поризованных материалов, обладающих повышенной фильтрующей способностью; уплотненных техногенных материалов при их термической обработке и др. [1–10].

В некоторых случаях процесс получения гранул сферообразной или близкой к ней формы является более предпочтительным, так как позволяет сохранить им товарный вид и потребительские свойства, снизить потери при перевозке и хранении без смерзания и пыления, повысить сыпучесть сплошной среды, обеспечить более плотную упаковку полифракционных сформованных тел [11, 12].

Однако, существующие машины и аппараты для гранулирования материалов (окаточные барабаны, тарельчатые и вибрационные грануля-

торы) не всегда обеспечивают условия для необходимого динамического воздействия на обрабатываемый материал и получение сформованных тел из вязко-пластичных материалов с заданными характеристиками (фракционным составом, плотностью, прочностью и др.) [11].

В связи с этим возникает необходимость проведения научно-технических разработок, теоретических и экспериментальных исследований процессов агломерации порошкообразных, вязко-пластичных материалов, а также материалов анизотропной структуры, например, фиброаполнителей для получения сформованных сферообразных тел заданной гранулометрии.

Материалы и методы. При проведении теоретических исследований было принято, что предварительно подготовленные компоненты смеси со связующим поступают в камеру гранулирования (рис. 1), где подвергаются воздействию центробежных сил F_c и сил трения $F_{тр}$, возникающих в результате ее движения с постоянной угловой скоростью ω по круговой траектории с центром вращения в точке О. Горизонтальная ось камеры находится на расстоянии $R_{ОА}$ от центра О, то есть в сечении А-А отрезок ОА равен эксцентриситету e эксцентрикового вала. Камера выполнена так, что диаметр D_k больше ее ширины B_k .

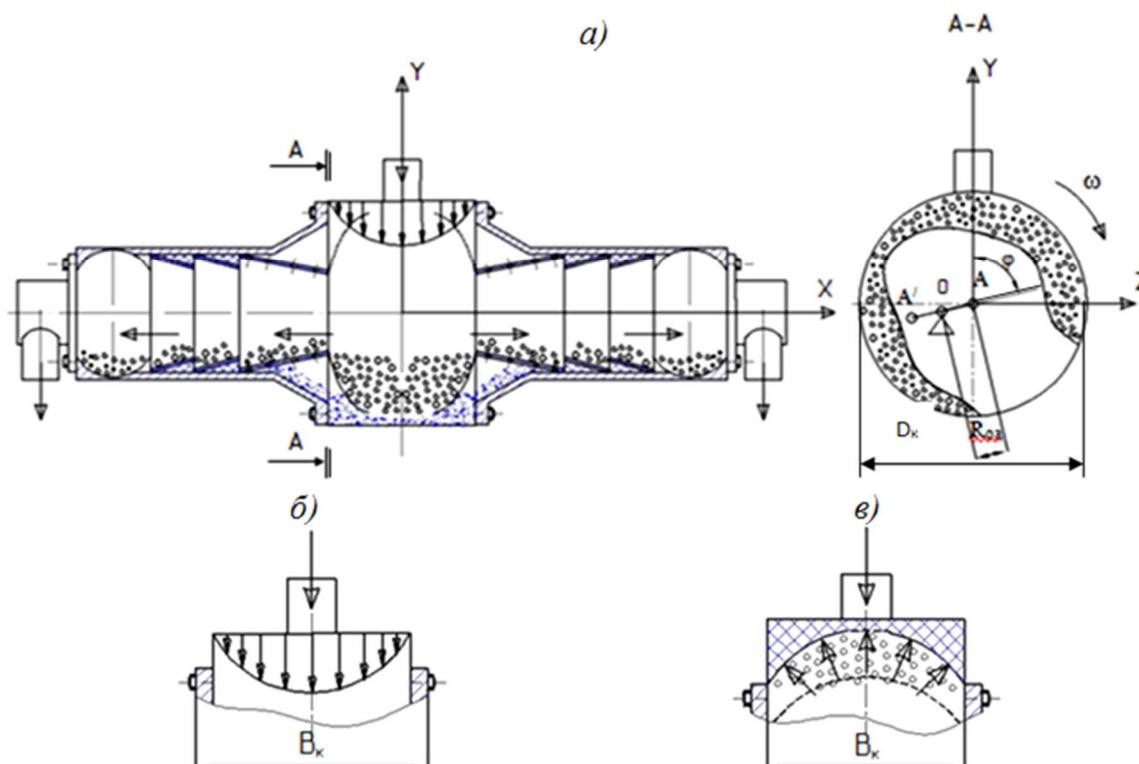


Рис. 1. Схема к расчету условий движения материала в камере гранулирования:
 а) общий вид; б) эпюра скоростей потока в цилиндрической камере;
 в) эпюра скоростей потока в сферообразной камере

Допускаем, что в процессе работы агрегата камера перемещается на некоторый угол φ , а материал внутри нее движется в установившемся режиме и, достигнув наибольшего уплотнения, не деформируется, то есть образуется несжимаемый слой.

Основная часть. Для математической модели, описывающей условия движения материала в цилиндрической системе координат, может быть применена система дифференциальных уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости [13]. В данном случае эта система будет представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial v_{R_k}}{\partial t} + v_{R_k} \frac{\partial v_{R_k}}{\partial R_k} + \frac{v_\varphi}{R_{OA}} \frac{\partial v_{R_k}}{\partial \varphi} + v_{R_k} \frac{\partial v_{R_k}}{\partial t} - \frac{v_\varphi^2}{R_k} = F_{R_k} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R_k} + \lambda \left(\Delta_{R_k} - \frac{v_{R_k}}{R_{OA}^2} - \frac{2}{R_{OA}^2} \cdot \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} \right); \\ \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + v_{R_k} \frac{\partial v_\varphi}{\partial R_k} + \frac{v_\varphi}{R_{OA}} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{v_{R_k} v_\varphi}{R_{OA}} = F_{R_k} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R_k} + \lambda \left(\Delta_\varphi - \frac{v_\varphi}{R_{OA}^2} - \frac{2}{R_{OA}^2} \cdot \frac{\partial v_{R_k}}{\partial \varphi} \right); \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_{R_k} \frac{\partial v_z}{\partial R_k} + \frac{v_\varphi}{R_{OA}} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = F_{R_k} - \frac{\partial P}{\rho \partial z} + \lambda_\Delta v_z. \end{cases} \quad (1)$$

где R_k – радиус камеры гранулирования, м; R_{OA} – эксцентриситет эксцентрикового вала ($R_{OA} = e$), м; φ – угол поворота камеры гранулирования, град; ρ – плотность слоя материала, кг/м³; v_z, v_{R_k}, v_φ – скорости движение слоя материала по внутренней поверхности камеры гранулирования в направлении оси Z, радиуса R_k , вращения камеры, соответственно, м/с; P – давление, Па; F_{R_k} – сила, воздействующая на материал в камере гранулирования; Н.

Условие несжимаемости:

$$\frac{\partial v_{R_k}}{\partial R_k} + \frac{v_{R_k}}{R_{OA}} + \frac{v_\varphi}{R \partial \varphi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Оператор Лапласа:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial R_k^2} + \frac{1}{R_{OA}} \cdot \frac{\partial}{\partial R_k} + \frac{1}{R_{OA}^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (3)$$

В решении данного уравнения целесообразно учесть ряд следующих обстоятельств. Камера вращается с постоянной скоростью, а материал поступает в нее непрерывно и равномерно, то есть $\partial v / \partial t = 0$. При отсутствии сжимаемости слоя $\rho = const$. Действие массовых сил можно не учитывать ($F_m = 0$) виду их незначительной величины. Движение слоя по внутренней поверхности камеры в направлении оси Z и радиуса R не осуществляется. Тогда скорости $v_z = 0$ и $v_R = 0$. В свою очередь, скорость потока в направлении вращения камеры постоянна, поэтому $\partial v_\varphi / \partial \varphi = 0$. Однако, скорость движения слоя по ширине камеры будет изменяться под действием сил трения, возникающих в ее внутреннем объеме и у боковых стенок. Следовательно, $\partial v_\varphi / \partial z \neq 0$.

$$\Delta v_\varphi = \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial R_\kappa^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial v_\varphi}{\partial R_\kappa} + \frac{1}{R_{OA}^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2}. \quad (5)$$

При принятом ранее условии:

$$\frac{d^2 v_\varphi}{dR_\kappa^2} = 0, \quad \Delta v_\varphi = \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2}. \quad (6)$$

В этом случае система дифференциальных уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \frac{v_\varphi^2}{R_{OA}} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R_\kappa}; \\ 0 = -\frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} - \frac{v_\varphi}{R_{OA}^2} \right); \\ 0 = \frac{\partial P}{\partial z}. \end{cases} \quad (7)$$

После разделения переменных по функциям φ и Z , а также при $\frac{\partial P}{\partial \varphi} = C$, получаем неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$v_\varphi = C_1 \exp(ZR_{OA}^{-1}) + C_2 \exp(-ZR_{OA}^{-1}) - CR_{OA}\mu^{-1} \quad (11)$$

Примем во внимание, что движение материала в камере, осуществляемое за счёт центробежных сил, приводит к возникновению сил трения о ее внутреннюю поверхность. Тогда при определении условий получения гранул значительное влияние имеет фактор (величина и характер изменения) скорости сдвиговых деформаций v_φ по

Для определения оптимального профиля камеры гранулирования установим характер изменения скорости v_φ в направлении оси Z . Тогда, с учетом принятых выше допущений, запишем систему уравнений (1) в виде:

$$\begin{cases} \frac{v_\varphi^2}{R_\kappa} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R_\kappa}; \\ 0 = -\frac{1}{\rho R_{OA}} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \partial \left(\Delta v_\varphi - \frac{v_\varphi}{R_{OA}^2} \right); \\ 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}, \end{cases} \quad (4)$$

Здесь оператор Лапласа:

$$\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} - \frac{v_\varphi}{R_{OA}^2} = \frac{C}{R \cdot \mu}. \quad (8)$$

Это уравнение может быть представлено в общем виде:

$$v_\varphi = v_\varphi + v_\varphi', \quad (9)$$

где v_φ – общее решение однородного уравнения; v_φ' – частное решение неоднородного уравнения.

Применим метод неопределённых коэффициентов, для которого:

$$\begin{cases} v_\varphi = C_1 \exp(ZR^{-1}) + C_2 (\exp - ZR^{-1}); \\ v_\varphi' = -CR\mu^{-1}. \end{cases} \quad (10)$$

В результате получим неоднородное дифференциальное уравнение вида:

ширине камеры B_κ . При этом у боковых стенок камеры значения v_φ (в пристенных слоях) минимальны, а в средней части камеры максимальны.

Учитывая ряд условий ($Z = 0$; $Z = B_\kappa$ и $Z = 0,5B_\kappa$), постоянные примут вид:

$$\begin{cases} C_1 + C_2 - C \frac{R_{OA}}{\mu} = 0; \\ C_1 \exp \frac{B_k}{R_{OA}} + C_2 \exp \left(-\frac{B_k}{R_{OA}} \right) - \frac{CR}{\mu} = 0; \\ C_1 \exp \left[\frac{0,5B_k}{R_{OA} + R_k} \right] + C_2 \exp \left(-\frac{0,5B_k}{R_{OA} + R_k} \right) - C \left(R_{OA} + \frac{R_k}{\mu} \right) = 2\pi n (R_{OA} + R_k), \end{cases} \quad (12)$$

После решения системы уравнений (12) получим значения постоянных:

$$C_1 = \frac{-2\pi n (R_{OA} + R_k)}{\left[1 - \exp \frac{0,5B_k}{R_{OA} + R_k} \right]^2}, \quad (13)$$

$$C_2 = \frac{-2\pi n [(R_{OA} + R_k) \cdot \exp \frac{B_k}{R_{OA}}]}{(R_{OA} + R_k) \left[1 - \exp \frac{0,5B_k}{R_{OA} + R_k} \right]}, \quad (14)$$

$$C = \frac{-2\pi n \mu [(1 + R_{OA} B_k)]}{(R_{OA} + R_k) \left[1 - \exp \frac{0,5B_k}{R_{OA} + R_k} \right]}. \quad (15)$$

С учётом полученных значений C_1 , C_2 и C уравнение для определения значений скорости

сдвиговых деформаций слоя по ширине камеры B_k примет вид:

$$v_\varphi = \frac{2\pi n \left[(R_{OA} + R_k) \cdot \left(1 + \exp \frac{B_k}{R_{OA} + R_k} + \exp \frac{(B_k - B_{k,i})}{R_{OA} + R_k} \right) \right]}{\left[1 - \exp \frac{0,5B_k}{R_{OA} + R_k} \right]^2}. \quad (16)$$

Анализ уравнения показывает, что скорость сдвиговых деформаций (v_φ) слоя гранул по ширине камеры изменяется по параболическому закону с наибольшим значением в центральной части камеры.

С целью проверки и уточнения результатов теоретических исследований было проведено физическое моделирование процесса гранулирования. Для этого был использован вибрационно-центробежный агрегат комбинированного действия [14, 15]. Конструктивно агрегат представляет собой базовый кривошипно-ползунный механизм с автоматизированным управлением (рис. 2). Он может быть оснащён двумя или тремя камерами, которые позволяют добиться выполнения различных технологических операций в одной машине за счёт конструктивных особенностей и организации технологического процесса. Например, дезагломерации волокнистых материалов, классификации, гомогенизации, получения гранул из композиционных смесей и другие.

Механизм работает следующим образом: электродвигатель 1, через клиноременную 2 и зубчатую 3 передачи, передает вращение эксцентриковым валам 4 с противовесами 5. При этом подвижная рама 13 соединена с

эксцентриковыми валами, ползунами 14 и рабочими камерами 9, 10, 11. Таким образом, в результате вращения эксцентриковых валов каждая из закреплённых на подвижной раме рабочих камер совершает движение по заданной траектории (верхняя – возвратно-поступательное, средняя – по эллипсоидной траектории, нижняя – по круговой траектории). В тоже время при возвратно-поступательном движении рамы осуществляется вибрация желобов 8.

Для предварительной подготовки материала, конструкция может быть оснащена валковым уплотнителем 7 с собственным приводом 6.

Кроме того, для подготовки и переработки волокнистого материала способом дезагломерации верхняя камера может быть выполнена призматической формы, а внутри нее закреплены гирляндные цепные завесы. Тогда нижняя из двух камер будет составлена из двух дополнительных устройств 12 с загрузочными и выгрузочными устройствами.

Для получения фиброполнителей, например, в виде микрогранул может быть предусмотрена дополнительная камера, которая соединена

с нижней камерой и оснащена центральным загрузочным отверстием и с двух сторон двумя крайними выгрузочными отверстиями. Внутри она содержит по своему периметру вставки в

виде усеченных конусов, направленных большими основаниями от загрузки по центру в стороны к выгрузке.

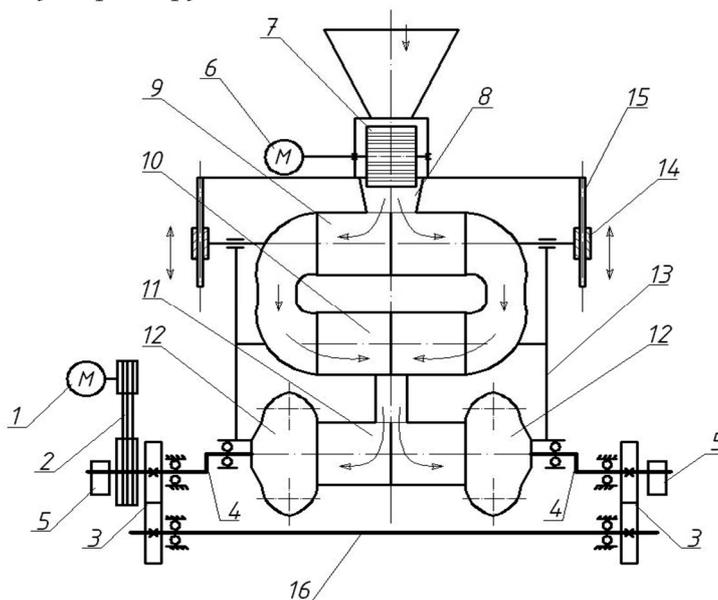


Рис. 2. Конструкция вибрационно-центробежный агрегат комбинированного действия:

1 – электродвигатель; 2 – ременная передача; 3 – зубчатая передача; 4 – эксцентриковый вал; 5 – противовесы; 6 – привод валка; 7 – валок; 8 – виброжелоба; 9, 10 и 11 – рабочие камеры; 12 – дополнительные устройства; 13 – подвижная рама; 14 – ползунки; 15 – стойки; 16 – промежуточный вал

Моделирование осуществлялось в нижней цилиндрической камере гранулирования с прозрачной торцевой крышкой (рис. 3), который

жестко соединен с подвижной рамой, закрепленной в подшипниковых узлах на двух эксцентриковых валах, соединенных с приводом.

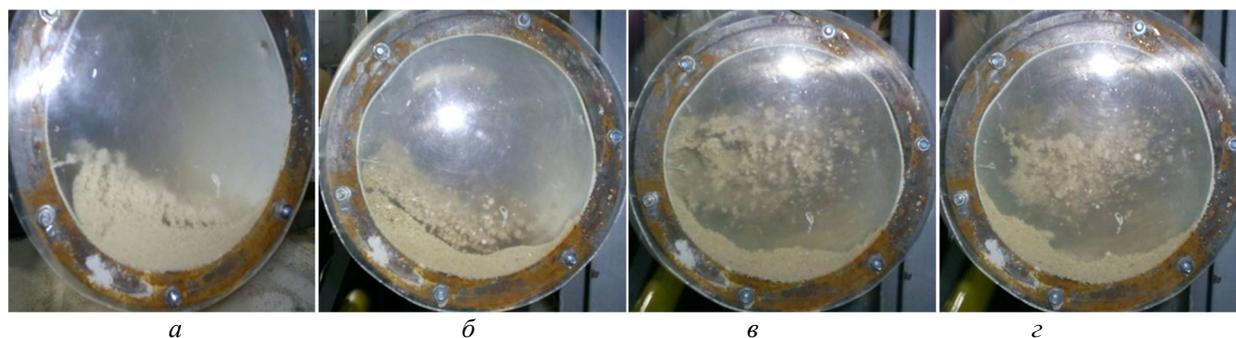


Рис. 3. Движение материала в камере агломерации:

а, б) при частоте вращения эксцентриковых валов $n = 200\text{--}250$ об/мин;
в, г) при частоте вращения эксцентриковых валов $n = 300\text{--}350$ об/мин

Установлено, что при движении камеры по круговой траектории без вращения вокруг собственной оси для находящегося в нем гранулируемого материала характерен: циркуляционный режим движения материала при частоте вращения эксцентриковых валов $n = 200\text{--}250$ об/мин (рис. 3, а, б); водопадно-каскадный – при $n = 300\text{--}350$ об/мин (рис. 3, в, г).

Для проведения моделирования и получения гранул были использованы смеси следующего состава:

1. в пропорции по весу: песок – 30 %, цемент – 40 %, перлит – 20 %, бентонит – 2 %, базальтовое фиброволокно – 6–8 %, при влажосодержании – 0,6;
2. связующее – меласса; $C_{св} = 15$ % на 100 г материала;
3. связующее – 5 % КМЦ; $C_{св} = 10$ % на 100 г материала.

Эксперимент показал, что гранулы (рис. 4), полученные при окатывании в нижней цилиндрической камере, особенно на начальной стадии гранулообразования (микрогранулирования), имеют более выраженную эллипсоидную

форму. Следует отметить, что получение сферобразных гранул в этом случае возможно, но это негативно сказывается на производительности,

так как время пребывания гранулята внутри камеры увеличивается.

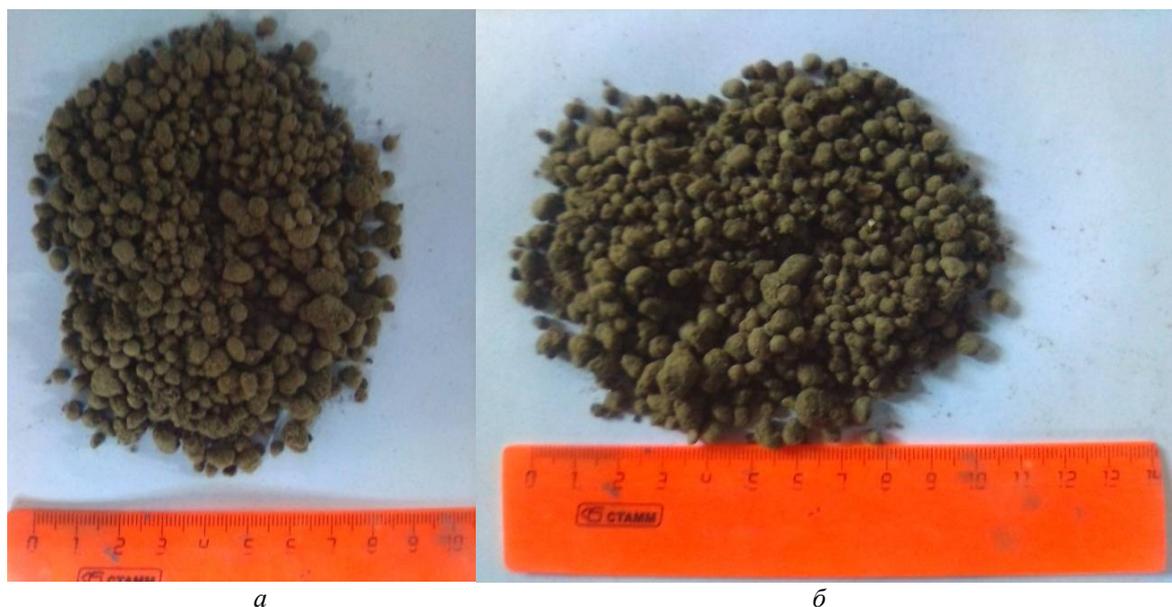


Рис. 4. Общий вид гранул:
 а) связующее – меласса, $C_{св} = 15\%$ на 100 гр. материала;
 б) связующее – 5% КМЦ, $C_{св} = 10\%$ на 100 гр. Материала

Также при проведении комплекса экспериментов по получению композиционных смесей со сформованными базальтовыми фиброволокнами и испытания полученных из них спрессованных образцов установлено, что при увеличении процентного содержания волокон в смеси (6–8 %), наблюдается повышение прочности на сжатие с $\sigma_{сж} = 0,45$ МПа до $\sigma_{сж} = 0,55$ МПа. При этом снижается плотность с $\rho = 400$ кг/м³ до $\rho = 350$ кг/м³ и теплопроводность с $\lambda = 0,018$ Вт/(м·К) до $\lambda = 0,013$ Вт/(м·К).

Все это, в свою очередь, свидетельствует о целесообразности создания условий для гранулирования с более равномерным изменением значений скоростей сдвиговых деформаций по ширине рабочих камер путем конструктивно-технологического совершенствования геометрического профиля этих камер, их внутренних устройств, а также организации самого процесса гранулообразования.

Одним из вариантов технического решения данной задачи (создания благоприятных условий гранулирования) является использование тороидального или близкого к нему профиля камеры гранулирования. Это позволит добиться улучшения качества продукции, например, при переработке техногенных материалов (базальто-волоконистых, целлюлозно-бумажных и других отходов производств) с получением фиброполнителей в виде отдельных фибр или высококонцентриро-

ванных сферообразных микрогранул. В последнем случае, как показывают теоретические и экспериментальные исследования, положительный эффект будет достигнут за счет более интенсивного перемещения частиц материала в пространстве по направлению координат XYZ.

Выводы. Проведенные аналитические исследования скорости распределения слоя материала по ширине камеры гранулирования позволили выявить неравномерность распределения потока, что указывает на ограничение степени свободы находящихся в ней частиц. Более благоприятные условия для реализации процессов агломерации возможно создать за счет интенсивного объемно-пространственного перемещения материала, что также оказывает положительное влияние на течение процесса гранулирования. При этом окатывающее воздействие на материал осуществляется в результате перемещения частиц в пространстве по направлению координат XYZ, а образующиеся центры гранулообразования (микрогранулы) являются основой для последующего гранулообразования. Данный технологический процесс может быть реализован на последней стадии агломерации (то есть получении конечных гранул) при использовании тороидального или близкого к нему профиля камеры гранулирования. На практике результаты исследований применены при разработке конструкций машин для комплексной переработки сырьевых и техногенных материалов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализуемого проекта НОЦ «Инновационные решения в АПК» № 10089447 (2020-2022 гг.) научно-производственной платформы «Рациональное природопользование».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сулименко Л.М., Альбац Б.С. Агломерационные системы в производстве строительных материалов. М.: Изд-во ВНИИЭСМ, 1994. 297 с.
2. Ильина Т.Н. Процессы агломерации в технологиях переработки дисперсных материалов: монография. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2009. 229 с.
3. Keleb E.I., Vermeire A., Vervaeck C., Remon J. P. Twin screw granulation as a simple and efficient tool for continuous wet granulation. *International Journal of Pharmaceutics*. 2004. Том. 273. №1-2. Pp. 183–194. doi: 10.1016/j.ijpharm.2004.01.001.
4. Makarenkov D.A., Volkov P.A., Nazarov V.I. Design of enzyme granulation processes // *Russian Journal of General Chemistry*. 2015. Том. 85. № 10. Pp. 2465–2475. doi: 10.1134/S1070363215100424.
5. Yegorov B.V., Batiievskaya N.O., Fedoryaka V.P. Application of granulation technology in various industries // *Grain products and mixed fodders*. 2017. Том. 17. №3. Pp. 33–38.
6. Bansal A.K., Balwani G., Sheokand S. Critical material attributes in wet granulation // *Handbook of Pharmaceutical Wet Granulation: Theory and Practice in a Quality by Design Paradigm*. 2018. Pp. 421–453. doi: 10.1016/B978-0-12-810460-6.00009-9.
7. Iveson S. M., Litster J. D., Nappgood K., Ennis B. J. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: A review // *Powder Technology*. 2001. Том. 117. № 1-2. Pp. 3–39. doi: 10.1016/S0032-5910(01)00313-8.
8. Simons S.J.R., Rossetti D., Paglia P. The relationship between surface properties and binder performance in granulation // *Chemical Engineering Science*. 2005. Том. 60. № 14. Pp. 4055–4060. doi: 10.1016/j.ces.2005.02.034.
9. Kelbaliyev G.I., Samedli V.M., Samedov M.M. Regularities of formation of granules at granulation of powdered materials in drum devices // *Azerbaijan Chemical Journal*. 2018. № 3. Pp. 57–65. doi: 10.32737/0005-2531-2018-3-57-65.
10. Dubinin N.N., Evtushenko E.I., Nemets I.I., Nosov O.A., Osokin A.V. Rotary machines for production of ceramic wall materials // *Advances in Environmental Biology*. 2014. Том. 8. № 13. Pp. 201–206.
11. Севостьянов М.В. Расчет и проектирование оборудования для компактирования техногенных материалов: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. 205 с.
12. Sevostyanov M.V., Il'ina T.N., Sevostyanov V.S., Emel'yanov D.A. Methodological Principles of Agglomeration Processes Improvement in Technologies of Disperse Materials Processing // *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. Том. 9. № 11. Pp. 738–744. DOI: 10.3923/rjasci.2014.738.744.
13. Ольховский И.И. Курс теоретической механики для физиков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Московского ун-та, 1974. 569 с.
14. Пат. 2412753, Российская Федерация, МПК В01J 2/00. Вибрационно-центробежный гранулятор / Т. Н. Ильина, М. В. Севостьянов, Е. А. Шкарпеткин, В. И. Уральский; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2009135800/05; заявл. 25.09.2009; опубл. 27.02.2011, Бюл. №6. 8 с.
15. Пат. 2692624, Российская Федерация, МПК В02С 17/08. Устройство и способ переработки техногенных волокнистых материалов для получения фиброполнителей (варианты) / М. В. Севостьянов, В. А. Полуэктова, В. С. Севостьянов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2018131819; заявл. 03.09.2018; опубл. 25.06.2019, Бюл. №18. 9 с.

Информация об авторах

Севостьянов Владимир Семенович, доктор технических наук, профессор кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: tkmm_bstu@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шкарпеткин Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: jonick86@inbox.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Севостьянов Максим Владимирович, доктор технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: msev31@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бабуков Владимир Александрович, аспирант кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: babukov-v@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 15.03.2022 г.

© Севостьянов В.С., Шкарпеткин Е.А., Севостьянов М.В., Бабуков В.А., 2022

Sevostyanov V.S., *Shkarpetkin E.A., Sevostyanov M.V., Babukov V.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: tkmm_bstu@mail.ru*

STUDY OF THE CONDITIONS OF MATERIAL MOVEMENT IN THE GRANULE CHAMBER

Abstract. *The article substantiates the need for scientific and technical developments, theoretical and experimental studies of the processes of agglomeration of powdery, viscous-plastic materials, as well as materials of an anisotropic structure to obtain molded bodies of a given granulometry in order to improve their consumer properties. A mathematical model is presented. It describes the conditions of material movement in the granulation chamber, which is presented as a system of differential equations for the movement of a viscous incompressible fluid in a cylindrical coordinate system. The results of the theoretical studies carried out are confirmed by physical modeling of the technological process of granulation. According to the study of the conditions of movement of the material in the granulation chamber, it is concluded that the rate of shear deformations of the material layer across the width of the chamber varies unevenly, that is, the degree of freedom of the particles in it is limited. A solution is proposed to eliminate this disadvantage by creating more favorable conditions for the implementation of granulation processes, which can be created in a toroidal or close to it in shape chamber due to the intensification of the volumetric and spatial movement of the material.*

Keywords: *processing, technogenic materials, granulation, mathematical model, material movement, shear strain rate, process modeling.*

REFERENCES

1. Sulimenko L.M., Albats B.S. Agglomeration systems in the production of building materials [Aglomeracionnye sistemy v proizvodstve stroitel'nyh materialov]. M.: Publishing House VNIIESM, 1994. 297 p. (rus)
2. Ilyina T.N. Agglomeration processes in technologies for processing dispersed materials: monograph [Processy aglomeracii v tekhnologiyah pererabotki dispersnyh materialov: monografiya]. Belgorod: Publishing house of BSTU named after V.G. Shukhov, 2009. 229 p. (rus)
3. Keleb E.I., Vermeire A., Vervaeke C., Remon J.P. Twin screw granulation as a simple and efficient tool for continuous wet granulation. *International Journal of Pharmaceutics*. 2004. Vol. 273. No 1-2. Pp. 183–194. doi: 10.1016/j.ijpharm.2004.01.001.
4. Makarenkov D.A., Volkov P.A., Nazarov V.I. Design of enzyme granulation processes. *Russian Journal of General Chemistry*. 2015. Vol. 85. No 10. Pp. 2465–2475. doi: 10.1134/S1070363215100424.
5. Yegorov B.V., Batiievskaya N.O., Fedoryaka V.P. Application of granulation technology in various industries. *Grain products and mixed fodders*. 2017. Vol. 17. No. 3. Pp. 33–38.
6. Bansal A.K., Balwani G., Sheokand S. Critical material attributes in wet granulation. *Handbook of Pharmaceutical Wet Granulation: Theory and Practice in a Quality by Design Paradigm*, 2018. Pp. 421–453. doi: 10.1016/B978-0-12-810460-6.00009-9.
7. Iveson S.M., Litster J.D., Hapgood K., Ennis B.J. Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: A review. *Powder Technology*. 2001. Vol. 117. No. 1-2. Pp. 3–39. doi: 10.1016/S0032-5910(01)00313-8.
8. Simons S. J. R., Rossetti D., Pagliai P. The relationship between surface properties and binder performance in granulation. *Chemical Engineering Science*. 2005. Vol. 60. No 14. Pp. 4055–4060. DOI: 10.1016/j.ces.2005.02.034.
9. Kelbaliyev G.I., Samedli V.M., Samedov M.M. Regularities of formation of granules at granulation of powdered materials in drum devices. *Azerbaijan Chemical Journal*. 2018. No 3. Pp. 57–65. doi: 10.32737/0005-2531-2018-3-57-65.
10. Dubinin N.N., Evtushenko E.I., Nemets I.I., Nosov O.A., Osokin A.V. Rotary machines for production of ceramic wall materials. *Advances in Environmental Biology*. 2014. Vol. 8. No 13. Pp. 201–206.
11. Sevostyanov M.V. Calculation and design of equipment for compaction of technogenic materials: monograph [Raschet i proektirovanie oborudovaniya dlya kompaktirovaniya tekhnogennyh materialov: monografiya]. Belgorod: Publishing house of BSTU, 2017. 205 p. (rus)

12. Sevostyanov M.V., Il'ina T.N., Sevostyanov V.S., Emel'yanov D.A. Methodological Principles of Agglomeration Processes Improvement in Technologies of Disperse Materials Processing. Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No 11. Pp. 738–744. doi: 10.3923/rjasci.2014.738.744.

13. Il'ina T.N., Sevostyanov M.V., Shkarpetkin E.A., Uralskiy V.I. Vibratory-centrifugal granulator. Patent RF, no 2412753 (2009135800/05), 2011.

14. Sevostyanov M.V., Poluektova V.A., Sevostyanov V.S. Device and method for processing technogenic fibrous materials to obtain fiber fillers (options). Patent RF, no 2692624, 2019.

15. Olkhovsky I.I. Course of theoretical mechanics for physicists. 2nd ed., revised. and additional [Kurs teoreticheskoy mekhaniki dlya fizikov. 2-e izd., pererab. i dop.] M.: Publishing House of Moscow University, 1974. 569 p. (rus)

Information about the authors

Sevostyanov, Vladimir S. DSc, Professor. E-mail: tkmm_bstu@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Shkarpetkin, Evgenij A. PhD. E-mail: jonick86@inbox.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sevostyanov, Maksim V. DSc, Assistant professor. E-mail: msev31@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Babukov, Vladimir A. Postgraduate student. E-mail: babukov-v@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 15.03.2022

Для цитирования:

Севостьянов В.С., Шкарпеткин Е.А., Севостьянов М.В., Бабуков В.А. Исследование условий движения материала в камере гранулирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 99–107. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-99-107

For citation:

Sevostyanov V.S., Shkarpetkin E.A., Sevostyanov M.V., Babukov V.A. Study of the conditions of material movement in the granule chamber. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No. 9. Pp. 99–107. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-9-99-107