

## ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ДЛЯ МИКРОГРАНУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**М. В. Севостьянов<sup>1</sup>, Т. Н. Ильина<sup>2</sup>, И. П. Бойчук<sup>3</sup>,  
Д. Н. Перелыгин<sup>1</sup>, А. В. Кощук<sup>1</sup>, Д. А. Емельянов<sup>2</sup>**

*Кафедры: «Технологические комплексы, машины и механизмы» (1);  
«Теплогаснабжение и вентиляция» (2); «Программное обеспечение  
вычислительной техники и автоматизированных систем» (3);  
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет  
им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия; [atlaх@mail.ru](mailto:atlaх@mail.ru)*

**Ключевые слова:** гранулирование; двухфазный поток; дисперсная фаза; полидисперсные частицы; торообразная камера.

**Аннотация:** Представлен анализ аппаратов для пневмомеханического гранулирования техногенных материалов. Исследовано движение частиц техногенных порошкообразных материалов в воздушном потоке под действием центробежных сил. Рассмотрена совокупность сил, действующих на частицу в процессе движения материально-воздушного потока в торообразной камере. Представлено математическое описание и траектории движения частиц в газодисперсном потоке.

---

Одним из перспективных направлений комплексной переработки техногенных порошкообразных материалов различных отраслей промышленности (химической, строительной, топливной, пищевой, агропромышленного комплекса и др.) является гранулирование полидисперсных смесей [1]. В настоящее время известно большое разнообразие аппаратов для гранулирования полидисперсных материалов: тарельчатые; барабанные; псевдоожиженного и фонтанирующего слоя; вибрационные, центробежные, грануляторы – сушилки – классификаторы и др. [2].

В связи с интенсивным развитием эффективных технологий замкнутого цикла переработки материалов (рециклинга), а также созданием в сфере научно-технического предпринимательства малотоннажных технологических комплексов [3 – 5] особое значение приобретают вихревые аппараты для микрогранулирования полидисперсных смесей.

Важное значение имеет реализация данными аппаратами следующих технологических возможностей:

– способности к агломерации полидисперсных смесей с различными физико-механическими характеристиками (гранулометрией, плотностью, адгезионной способностью, сыпучестью и др.) входящих компонентов;

– максимальной степени свободы турбулентного движения гранулируемых частиц и повышенной подвижности полидисперсных смесей в поле действия центробежных сил;

– совмещению в одном аппарате различных технологических операций (смешения, увлажнения, изменения величины динамического воздействия и др.);

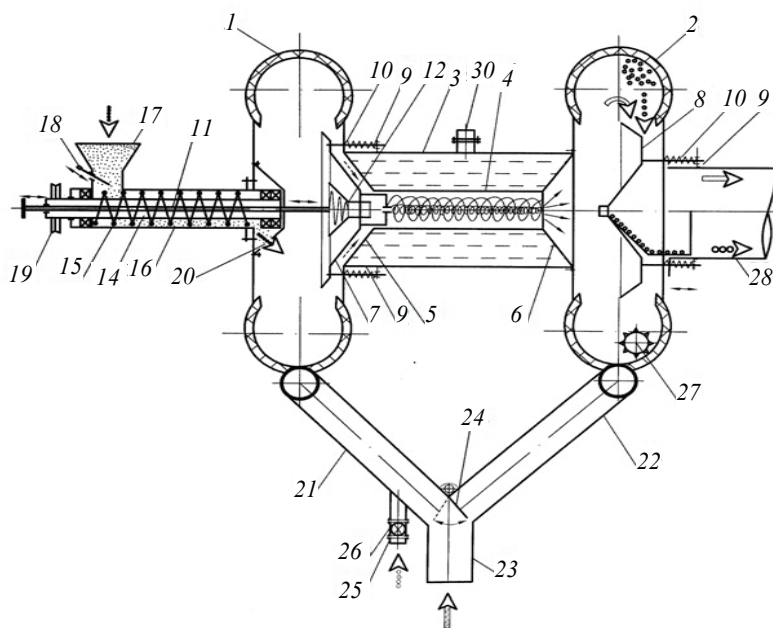
- возможности реализации внутренней классификации гранулируемых частиц и получении однородной продукции;
- возможности осуществления внутреннего и внешнего рециклингов технологических потоков и др.

С учетом реализации вышеуказанных технологических возможностей разработаны специальные аппараты для микрогранулирования техногенных композиционных смесей и материалов [3 – 6] (рис. 1 – 3), которые прошли опытно-промышленные испытания в разработанных технологических комплексах для переработки техногенных материалов [6, 7]. Используя конструктивно-технологические особенности патентозащищенных пневмомеханических аппаратов, проведены теоретические исследования процесса гранулообразования частиц в торообразных камерах.

Данный процесс является сложным аэродинамическим и физико-механическим процессом, который трудно подчиняется математическому описанию, сложность которого обусловлена следующими факторами:

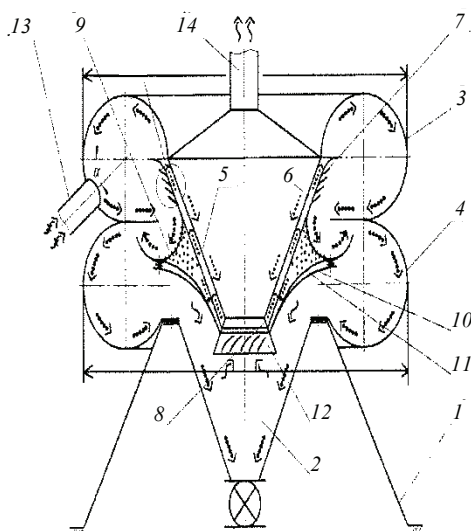
1) наличием полидисперсного состава гранулируемой смеси, требующим индивидуального описания процессов турбулентного движения мелкодисперсных частиц – «аэрозольной жидкости» методами механики сплошной среды и упорядоченного движения крупных частиц в усредненном аэродинамическом поле – методами классической механики;

2) существенным влиянием размера частиц  $d_{\text{ср.взв}}$  и концентрации твердой фазы  $\mu \geq 20$  кг/кг в аэродинамическом потоке на эффективность образования микрогранул;



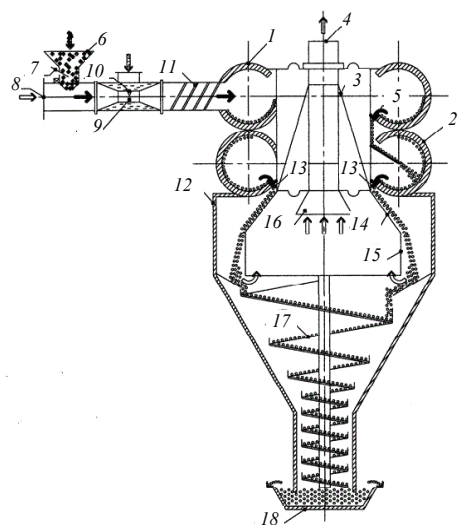
**Рис. 1. Эжекционная машина для смешивания и микрогранулирования техногенных материалов:**

1, 2 – левая и правая торообразные камеры соответственно; 3, 16 – цилиндрические корпуса; 4 – разгонная трубка; 5 – конфузор; 6 – диффузор; 7, 8 – конические вставки; 9, 11 – штоки; 10 – пружины; 12 – пустотелый конус; 14 – трубка; 15 – спиральный элемент; 17 – бункер; 18 – шибер; 19 – шкив; 20 – конический фланец; 21, 22, 25, 28, 30 – подводящие, врезной, выгрузочный и входной патрубки соответственно; 23 – подводящий трубопровод; 24 – поворотный шибер; 26 – вентиль; 27 – упругие шарообразные тела



**Рис. 2. Пневмомеханический аппарат для микрогранулирования дисперсных материалов:**

1 – вертикальный корпус; 2 – разгрузочный бункер; 3, 4 – верхняя и нижняя торообразные камеры соответственно; 5 – усеченный конус с двойными стенками; 6 – внутренняя кольцевая полость; 7 – жалюзеобразные щелевидные отверстия; 8 – входное отверстие; 9 – спиралевидные пластины; 10 – пластины; 11 – подпружиненные пластины; 12 – усеченный конус-пароприемник; 13 – входной патрубков; 14 – выхлопная труба



**Рис. 3. Аппарат для пневмомеханического гранулирования техногенных материалов:**

1, 2 – верхняя и нижняя торообразные камеры соответственно; 3 – корпус; 4, 8 – выхлопная и входная трубы соответственно; 5 – пересыпное окно; 6 – бункер; 7 – шибер; 9 – разгонная трубка; 10 – форсунки; 11 – спиральный элемент; 12 – цилиндрическая часть бункера; 13 – перегрузочные отверстия; 14 – коническая вставка; 15 – цилиндрический выступ; 16 – зонд; 17 – винтообразная спираль; 18 – конический лоток

3) описанием двухфазных течений «газ – твердые частицы», которые производят либо с точки зрения эйлера, либо с точки зрения лагранжева подхода [8]. Часто применяют смешанный эйлерово-лагранжев подход: уравнения движения газовой фазы задаются в эйлеровом подходе, дисперсной фазы – интегрированием уравнений движения лагранжева подхода вдоль траекторий газовой фазы. Такой подход дает возможность получения детальной информации о движении изолированной частицы в известном поле несущего газа.

Движение вязкой несжимаемой жидкости описывается системой уравнений неразрывности, импульса и энергии:

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta \vec{V}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \operatorname{grad} T = a \Delta T, \quad (3)$$

где  $\vec{V}$  – вектор скорости;  $\vec{f}$  – плотность распределения объемных сил;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $T$  – температура;  $a$  – коэффициент теплопроводности.

Движение частицы в газовой среде описывается уравнениями движения твердого тела:

$$m \frac{d\vec{U}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i; \quad (4)$$

$$\frac{d\vec{L}_O}{dt} = \sum_i \vec{M}_O(\vec{F}_i), \quad (5)$$

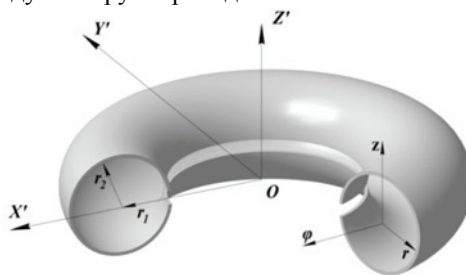
где  $\vec{U}$  – скорость движения частицы;  $\sum_i \vec{F}_i$  – главный вектор действующих на частицу в газовом потоке сил;  $\vec{L}_O, \sum_i \vec{M}_O(\vec{F}_i)$  – главные моменты количества движения тела и действующих на частицу сил соответственно относительно центра  $O$ .

Система уравнений (1) – (5) замыкается уравнением состояния газа, начальными и граничными условиями для газовой и дисперсной фаз. При рассмотрении двухфазных течений «газ – твердые частицы» особое внимание уделяется влиянию газа на взвешенные в потоке частицы и обратное влияние частиц на саму газовую фазу. В общем случае на частицу оказывают влияние различные силовые факторы. Механизм их возникновения разнообразный. Наличие либо отсутствие влияния той или иной силы и степень данного влияния определяются в каждом конкретном случае условиями самой задачи. Выражения для сил, приведенные в литературе, описывают усредненные значения действующих на частицу сил. При решении системы уравнений (4), (5) желательно знать мгновенные значения сил.

Кроме того, частицы оказывают на поток обратное влияние, описание которого возможно получить либо из эксперимента, либо вводя дополнительные гипотезы или упрощения. Таким образом, получение аналитического решения уравнений в трехмерном случае в геометрических областях сложной формы не представляется возможным. Альтернативой этого может служить численное решение. Рассмотрим процесс движения полидисперсных частиц в воздушном потоке торообразной камеры (рис. 4).

*Расчет газовой фазы.* Численное решение системы уравнений (1) – (3) в геометрических областях сложной формы можно получить при помощи метода, изложенного в [9, 10]. Одним из способов интенсификации процессов агломерации, протекающих в газодисперсных потоках, является их закрутка вокруг оси канала. При этом повышение эффективности окатывания частиц достигается за счет действия центробежных сил, увеличения относительной скорости движения фаз, возникновения вторичных течений. Наиболее общим и универсальным случаем движения воздуха в трубопроводах является винтовое движение.

В зоне движения торообразного гранулятора возникает сплошной пространственный поток, в котором линии тока воздуха «навиваются» на концентрические торовые поверхности. При определенных допущениях возможно получить аналитическое решение задачи определения движения воздуха в торообразной камере [10]:



**Рис. 4. Торообразная камера пневмомеханического гранулятора**

$$V_{\varphi} = \omega_1 r; \quad V_r = -\omega_2 z; \quad V_z = \omega_2 (r - r_1), \quad (6)$$

где  $V_r, V_{\varphi}, V_z$  – компоненты вектора скорости потока  $\vec{V}$  в цилиндрической системе координат, м/с;  $\omega_1$  – угловая скорость воздушного потока,  $\text{с}^{-1}$ ;  $r$  – текущий радиус произвольной точки неподвижной системы координат, м;  $\omega_2$  – меридиональная угловая скорость,  $\text{с}^{-1}$ .

При движении вязкой жидкости по трубе происходит прилипание к стенкам. Поэтому профиль скорости представляет собой параболоид. Поскольку торообразную камеру в первом приближении рассматриваем как трубу бесконечно большой длины, то эпюра скоростей тоже должна представлять собой параболоид. Вид параболоида сильно зависит от геометрических размеров камеры  $r_1, r_2$  и параметров самого течения  $\omega_1, \omega_2$ . На рисунке 5 представлена эпюра векторов скорости движения газовой фазы для следующих параметров:  $\omega_1 = 10 \text{ с}^{-1}$ ;  $\omega_2 = 20 \text{ с}^{-1}$ ;  $r_1 = 0,08 \text{ м}$ ;  $r_2 = 0,05 \text{ м}$ ;  $d = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $\mu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . Как видно из рис. 6, по оси  $z$  профиль скорости представляет собой параболу, а профиль скорости в плоскости  $(r, V)$  – усеченную параболу.

*Расчет дисперсной фазы.* Рассмотрим движение твердого тела, мгновенно погружаемого в поток. В процессе обтекания на контуре тела возникает газодинамическая нагрузка – давление на контуре. Изменение давления на контуре зависит от параметров невозмущенного течения и взаимной ориентации потока и тела. Направление действия силы совпадает с внешней нормалью к профилю в соответствующей точке приложения силы. Значения давления на контуре определяются решением автомодельной задачи о взаимодействии однородного потока газа с преградой. В результате получается силовая нагрузка, входящая в правые части уравнений (4), (5), представляющих собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, которая может быть решена при помощи метода Рунге–Кутты. Под действием заданной нагрузки тело получает ускорение.

Рассмотрим движение сферической частицы в торообразном грануляторе. Предположим, что температура частицы остается постоянной. Для моделирования движения частиц дисперсной фазы в аппарате пневмомеханического гранулирования используем программное обеспечение компании Dassault Systemes (Франция). Семейство модулей Solid Works Flow Simulation предназначено для проведения газо- и гидродинамического анализа в среде Solid Works.

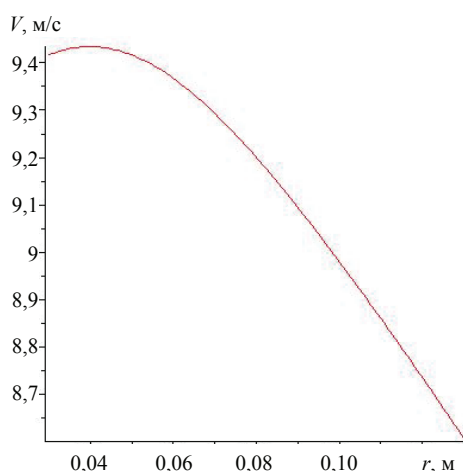


Рис. 5. Профиль скорости в радиальной плоскости

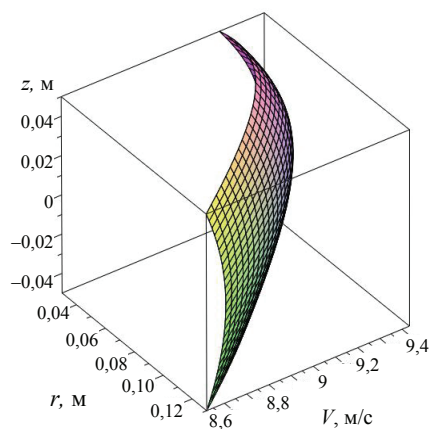
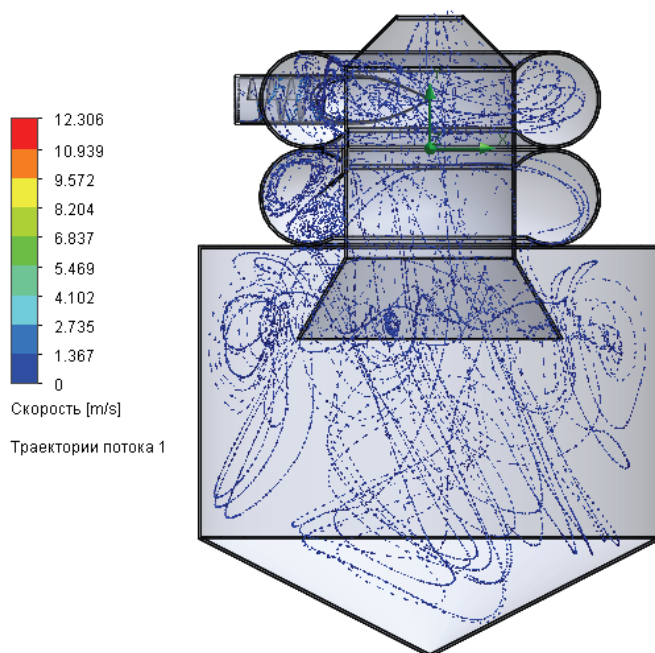


Рис. 6. Эпюра скоростей



**Рис. 7. Траектории движения частиц дисперсной фазы**

В качестве граничных условий при моделировании примем: скорость на входе 10 м/с, давление на выходе 0,12 МПа, характер движения – ламинарный. Траектории движения частиц, полученные в результате численного моделирования, представлены на рис. 7. Анализ рассчитанных компонент скорости  $U_r(z,t)$ ,  $U_\phi(r,t)$ ,  $U_z(r,t)$  показывает, что происходит скольжение дисперсной фазы относительно газовой, при этом частица движется по спирали большого радиуса.

Движение потока воздуха по заданной круговой траектории торов и одновременно спиральное движение способствуют многократному столкновению частиц. В силу адгезионного взаимодействия частиц, особенно при наличии микрородышей, реализуется процесс пневмомеханического гранулирования полидисперсного материала. Введение связующего в парообразном или распыленном состоянии ускоряет процесс гранулообразования.

Проведенные проектно-конструкторские разработки, теоретические, экспериментальные исследования и опытно-промышленные испытания подтвердили возможность использования разработанных пневмомеханических аппаратов для микрогранулирования полидисперсных техногенных материалов с различными физико-механическими характеристиками.

#### *Список литературы*

1. Классен, П. В. Гранулирование / П. В. Классен, И. Г. Гришаев, И. П. Шомин. – М. : Химия, 1991. – 240 с.
2. Технические основы переработки и утилизации материалов : учеб. пособие / В. С. Севостьянов [и др.] // – Белгород : Изд-во БГТУ, 2011. – 267 с.
3. Пат. 2538579 Российская Федерация, В01F 13/10. Устройство для пневмомеханического гранулирования техногенных материалов / В. С. Севостьянов

нов, Т. Н. Ильина, М. В. Севостьянов, Д. А. Емельянов, А. В. Кошчуков. – № 2013137715/05 ; заявл. 12.08.13 ; опубл. 10.01.2015. Бюл. № 1.

4. Пат. 162472 Российская Федерация, В01J 2/10, В01F 13/00. Пневмомеханическое устройство для микрогранулирования дисперсных материалов / С. Н. Глаголев, В. С. Севостьянов, Т. Н. Ильина, М. В. Севостьянов, А. В. Осокин, И. П. Бойчук, Д. А. Емельянов. – № 2015154259/05 ; заявл. 16.12.2015 ; опубл. 10.06.2016. Бюл. № 16.

5. Пат. 120374 Российская Федерация, В01F. Эжекционная машина для смешивания и микрогранулирования техногенных материалов / С. Н. Глаголев, В. С. Севостьянов, А. М. Гридчин, М. В. Севостьянов, В. В. Ядыкина, Ф. Е. Катаев. – № 2012120494/05 ; заявл. 17.05.2012 ; опубл. 20.09.2012. Бюл. № 2.

6. Техника и технологии для экструдирования и сушки техногенных материалов / С. Н. Глаголев [и др.] // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2014. – № 5. – С. 118 – 123.

7. Гридчин, А. М. Технологические комплексы и агрегаты для производства композиционных материалов и изделий / А. М. Гридчин, В. С. Севостьянов, В. С. Лесовик // Строит. материалы. – 2005. – № 6. – С. 6 – 9.

8. Уравнение движения взвешенной в потоке воздуха частицы в концентрате / Р. Р. Шаратов [и др.] // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2015. – № 5. – С. 175 – 178.

9. Ильина, Т. Н. О взаимодействии частиц техногенных волокнистых материалов в воздушном потоке / Т. Н. Ильина, И. П. Бойчук, Д. А. Емельянов // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 6. – С. 116 – 121.

10. Малоресурсный метод численного моделирования течений в геометрических областях сложной формы / А. В. Амброжев [и др.] // – Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 6. – 77 с.

---

## Pneumatic Mechanical Equipment for Microgranulation of Manmade Materials

M. V. Sevostyanov<sup>1</sup>, T. N. Ilyina<sup>2</sup>, I. P. Boichuk<sup>3</sup>,  
D. N. Perelygin<sup>1</sup>, A. V. Koshchukov<sup>1</sup>, D. A. Emelyanov<sup>2</sup>

*Departments of Technological Complexes, Machines and Mechanisms (1);  
Heat and Gas Supply and Ventilation (2); Software for computer Facilities  
and Automated Systems (3); V.G. Shukhov Belgorod State Technological University,  
Belgorod, Russia; atlax@mail.ru*

**Keywords:** granulation; toroidal chamber; polydisperse particles; dispersed phase; two-phase flow.

**Abstract:** The analysis of apparatus for pneumatic mechanical granulation of manmade materials is presented. The movement of particles of manmade powder-like materials in the air flow under the action of centrifugal forces is investigated. The set of forces acting on a particle in the process of material-air flow in a torus-shaped chamber is considered. A mathematic description and trajectories of motion of particles in a gas-dispersed flow are presented.

### *References*

1. Klassen P. V., Grishaev I. G., Shomin I. P. *Granulirovanie* [Granulation], Moscow: Khimiya, 1991, 240 p. (In Russ.)

2. Sevost'yanov V. S., Shinkarev L. I., Sevost'yanov M. V., Makridin A. A., Solopov N. V. *Tekhnicheskie osnovy pererabotki i utilizatsii materialov* [Technical fundamentals of recycling and disposal of materials], Belgorod: Izdatel'stvo BG TU, 2011, 267 p. (In Russ.)

3. Sevost'yanov V. S., Il'ina T. N., Sevost'yanov M. V., Emel'yanov D. A., Koshchukov A. V. *Ustroistvo dlya pnevmomekhanicheskogo granulirovaniya tekhnogennykh materialov* [Device for pneumomechanical granulation of man-made materials], Russian Federation, 2015, Pat. 2538579. (In Russ.)

4. Glagolev S. N., Sevost'yanov V. S., Il'ina T. N., Sevost'yanov M. V., Osokin A. V., Boichuk I. P., Emel'yanov D. A. *Pnevmomekhanicheskoe ustroistvo dlya mikrogranulirovaniya dispersnykh materialov* [Pneumomechanical device for micro granulation of dispersed materials], Russian Federation, 2016, Pat. 162472. (In Russ.)

5. Glagolev S. N., Sevost'yanov V. S., Gridchin A. M., Sevost'yanov M. V., Yadykina V. V., Kataev F. E. *Ezheksionnaya mashina dlya smeshivaniya i mikrogranulirovaniya tekhnogennykh materialov* [Ejection machine for mixing and microgranulation of man-made materials], Russian Federation, 2012, Pat. 120374. (In Russ.)

6. Glagolev S. N., Sevost'yanov V. S., Gridchin A. M., Trubaev P. A., Sevost'yanov M. V., Koshchukov A. V. [Techniques and technologies for extrusion and drying of man-made materials], *Transactions of the Belgorod State Technical University*, 2014, no. 5, pp. 118 – 123. (In Russ.)

7. Gridchin A. M., Sevost'yanov V. S., Lesovik V. S. [Technological complexes and aggregates for production of composite materials and products], *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2005, no. 6, pp. 6 – 9. (In Russ.)

8. Sharapov R. R., Boichuk I. P., Agarkov A. M., Prokopenko V. S. [The equation of motion of a particle suspended in the air stream in a concentrator], *Transactions of the Belgorod State Technical University*, 2015, no. 5, pp. 175 – 178. (In Russ.)

9. Il'ina T. N., Boichuk I. P., Emel'yanov D. A. [On the interaction of particles of technogenic fibrous materials in the air stream], *Transactions of the Belgorod State Technical University*, 2016, no. 6, pp. 116 – 121. (In Russ.)

10. Ambrozhev A. V., Boichuk I. P., Lar'kov S. N., Sereda V. A. [A low-resource method for numerical simulation of flows in geometric regions of complex shape], *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace Engineering and Technology], 2008, no. 6, pp. 5 – 10. (In Russ.)

---

## Pneumatische Geräte für Mikrogranulierung von technogenen Stoffen

**Zusammenfassung:** Es ist die Analyse der Apparatur für die pneumatische mechanische Granulation vorgestellt. Die Bewegung von Teilchen von künstlichen pulverförmigen Stoffen im Luftstrom unter der Einwirkung von Zentrifugalkräften ist untersucht worden. Es wird die Gesamtheit von Kräften, die auf ein Teilchen in dem Prozess der Stoffluftströmung in einer torusförmigen Kammer wirken, betrachtet. Eine mathematische Beschreibung und Trajektorien der Bewegung von Teilchen in einer gasdispertierten Strömung sind dargestellt.

---

## Appareils pneumomécaniques pour la microgranulation des matériaux technologiques

**Résumé:** Est présentée une analyse des appareils pour la granulation pneumomécanique des matériaux technologiques. Est étudié le mouvement des particules technologiques des matériaux pulvérulents dans le flux d'air sous l'action des



forces centrifuges. Est examiné l'ensemble des forces agissant sur la particule dans le processus du mouvement du flux d'air dans une chambre de la forme de tore. Est présentée une description mathématique et les trajectoires du mouvement des particules dans un flux dispersé à gaz.

---

**Авторы:** *Севостьянов Максим Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов; *Ильина Татьяна Николаевна* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; *Бойчук Игорь Петрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; *Перелыгин Дмитрий Николаевич* – старший преподаватель кафедры технологических комплексов, машин и механизмов; *Кошурков Андрей Викторович* – инженер кафедры технологических комплексов, машин и механизмов; *Емельянов Дмитрий Александрович* – аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.

**Рецензент:** *Минко Всеволод Афанасьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.

---