

Научное программное обеспечение в образовании и науке

УДК 66.099

Артюхов А.Е.

Сумский государственный университет, г. Сумы, Украина

РАСЧЁТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ВИХРЕВЫХ ГРАНУЛЯТОРОВ: ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Аннотация

Статья посвящена программной реализации авторской математической модели расчёта траектории движения гранул в свободном и стеснённом режиме, времени пребывания гранул в рабочем пространстве гранулятора, процесса классификации полидисперсных систем. В статье представлены расчеты гидродинамических характеристик движения гранул с применением программного продукта ANSYS CFX на основе авторской математической модели. Программный продукт позволяет автоматизировать расчёт одновременно по нескольким критериям оптимизации и визуализировать результаты расчёта в виде трёхмерных изображений. Результаты расчёта являются основой для оптимального выбора размеров рабочей камеры гранулятора.

Ключевые слова

Вихревой гранулятор; программное обеспечение; гидродинамика; траектория движения; время пребывания; свободное и стесненное движение.

Artyukhov A.E.

Sumy State University, Sumy, Ukraine

CALCULATION OF HYDRODYNAMIC INDICATORS OF VORTEX GRANULATORS WORKING: PROGRAM IMPLEMENTATION OF THE MATHEMATICAL MODEL

Abstract

The article deals with the software implementation of the author's mathematical model for calculating the trajectory of granule motion in a free and straitened mode, the residence time of granules in the working space of a granulator, the process of polydisperse systems classifying. Calculations of the hydrodynamic characteristics of granules movement using the software ANSYS CFX based on the author's mathematical model are presented. The software ANSYS CFX product allows to automatize the calculation simultaneously on multiple criteria optimization and visualization of calculation results in the form of three-dimensional images. Calculation results are the base for the optimal choice of optimal sizes of the vortex granulator working chamber.

Keywords

Vortex granulator; software; hydrodynamics; trajectory; residence time; free and straitened movement.

Введение

Определение закономерностей течения закрученных потоков в осесимметричных каналах при применении их в технологии гранулирования является актуальной научной и практической задачами [1]. Пути решения поставленной задачи - разработка новых математических моделей, описывающих гидродинамические

характеристики движения потоков, создание программных комплексов компьютерного моделирования гидродинамики движения потоков, а также применение оригинальных математических моделей при моделировании гидродинамических процессов в современных программных продуктах.

В настоящее время учёными Сумского

государственного университета продолжается работа по теоретическому описанию и экспериментальному исследованию гидродинамики движения вихревых потоков и кинетики процесса гранулирования в аппаратах с закруткой дисперсной фазы [2-6]. При этом основное внимание в дальнейших исследованиях уделяется созданию автоматизированных комплексов оптимизационного расчёта вихревых грануляторов на основе разработанной ранее теоретической базы [7-9].

Цель работы. Создание математического аппарата, описывающего гидродинамику двухфазного потока в рабочем пространстве вихревого гранулятора, программная реализация созданной математической модели.

Методика. Представленные результаты получены путем компьютерного моделирования на модели, построенной в соответствии с опытно-промышленным образцом вихревого гранулятора на основе аналитической модели гидродинамики движения двухфазных потоков.

Результаты. Получены гидродинамические характеристики движения двухфазных потоков на базе программной реализации аналитической модели гидродинамики. Реализация модели осуществлена в программном продукте ANSYS путем использования авторской математической модели для проведения расчетов.

Научная новизна. Показано, что применение аналитических моделей для расчёта гидродинамики двухфазных потоков в программных продуктах дает возможность проведения оптимизационного конструктивного расчета вихревого гранулятора с переменной по высоте площадью поперечного сечения.

Практическая значимость. Представленные результаты компьютерного моделирования совместно проведенным ранее теоретическими исследованиями в области гидродинамики движения потоков и экспериментальными данными положены в основу разработки методики инженерного расчета вихревого гранулятора.

Теоретические основы моделирования

Для моделирования двухфазных течений, в которых гранулы являются дисперсной фазой, используется подход Лагранжа. На основе этого подхода рассматривается движение дисперсной фазы под действием сплошной фазы. В отличие от моделей описания движения газового потока (в этом случае действием массовых сил можно пренебречь вследствие малой плотности фазы), обязательным при описании движения гранул является анализ действующих на дисперсную фазу сил [3]. Кроме того, в условиях стеснённого движения гранул необходимо учитывать изменение траектории дисперсной фазы и времени ее пребывания в рабочем пространстве вихревого гранулятора в зависимости от

относительного содержания гранул в объёме аппарата [6].

Поток сплошной фазы, течение которого моделируется системой уравнений Навье-Стокса и уравнением неразрывности потока (как показано в [2]), отдает часть момента количества движения дисперсному потоку. В случае появления дисперсной фазы в рабочем объеме устройства она втягивается во вращательное движение за счет энергии газового потока. При этом ввод дисперсной фазы в поток сплошной повлечет значительное изменение в значении окружной составляющей скорости движения газового потока V_φ .

Таким образом, автором предлагается следующий алгоритм расчёта, блок-схема которого приведена на рисунке 1.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчёта гидродинамических характеристик вихревого гранулятора

Блок 1.

Система уравнений движения гранулы:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dW_r}{d\tau} &= \frac{W_\varphi^2}{r} + \psi \cdot \frac{\pi \cdot \mu_z \cdot d_{zp}}{8 \cdot m} (V_r - W_r), \\ \frac{dW_\varphi}{d\tau} &= -\frac{W_r W_\varphi}{r} + \psi \cdot \frac{\pi \cdot \mu_z \cdot d_{zp}}{8 \cdot m} (V_\varphi - W_\varphi), \\ \frac{dW_z}{d\tau} &= -g + \psi \cdot \frac{\pi \cdot \mu_z \cdot d_{zp}}{8 \cdot m} (V_z - W_z), \end{aligned} \right\} (1)$$

где W_r, W_φ, W_z – радиальная, окружная и осевая (вертикальная, расходящая) составляющие движения гранулы соответственно; m – масса гранулы; τ – время; r – текущий радиус рабочего пространства вихревого гранулятора; g – ускорение свободного падения; ψ – линейный коэффициент сопротивления гранулы газовому потоку; μ_z – вязкость газового потока; d_{zp} – диаметр гранулы.

Блок 2.

Для определения траектории движения гранулы запишем систему уравнений (1) с учётом того, что гранула за время τ проходит некоторый путь в радиальном S_r , окружном S_φ и вертикальном S_z направлениях

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 S_r}{d\tau^2} &= \frac{W_\varphi^2}{r} + \psi \cdot \frac{\pi \cdot \mu_z \cdot d_{zp}}{8 \cdot m} (V_r - W_r), \\ m \frac{d^2 S_\varphi}{d\tau^2} &= -\frac{W_r W_\varphi}{r} + \psi \cdot \frac{\pi \cdot \mu_z \cdot d_{zp}}{8 \cdot m} (V_\varphi - W_\varphi), \\ m \frac{d^2 S_z}{d\tau^2} &= -g + \psi \cdot \frac{\pi \cdot \mu_z \cdot d_{zp}}{8 \cdot m} (V_z - W_z), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Решение системы уравнений (2) относительно переменной S в каждом из направлений происходит для определенного времени движения гранулы внутри корпуса гранулятора.

Блок 3.

Момент количества движения газовой фазы при отсутствии в рабочем объеме дисперсной фазы

$$M_\partial = 2 \cdot \pi \cdot \rho_2 \cdot V_\varphi \cdot r_{zp}^2 drdz, \quad (3)$$

где ρ_2 – плотность газового потока, r_{zp} – радиус гранулы.

Момент количества движения газовой фазы после взаимодействия с дисперсной фазой в рабочем объеме

$$M'_\partial = 2 \cdot \pi \cdot \rho_2 \cdot V'_\varphi \cdot r_{zp}^2 drdz, \quad (4)$$

где V'_φ – окружная скорость газового потока после взаимодействия с дисперсной фазой.

Момент количества движения дисперсной фазы, который приобретен после взаимодействия с газовым потоком

$$M_\partial = m \cdot W_\varphi \cdot r_{zp} \quad (5)$$

С учетом соотношения расходов потоков дисперсной фазы и газа $\frac{Q_{zp}}{Q_2}$ уравнение (5)

будет иметь вид

$$M_\partial = 2 \cdot \pi \cdot \rho_2 p \cdot \left(\frac{Q_{zp}}{Q_2} \right) W_\varphi \cdot r_{zp}^2 drdz, \quad (6)$$

где $\rho_2 p$ – плотность гранулы.

Согласно [3] записываем равенство

$$M_z = M'_M + \partial, \quad (7)$$

или

$$\rho_2 \cdot V_\varphi = \rho_2 \cdot V'_\varphi + \rho_2 p \cdot \left(\frac{Q_{zp}}{Q_2} \right) W_\varphi. \quad (8)$$

В этом случае окружная скорость газового потока после взаимодействия с дисперсной фазой

$$V'_\varphi = V_\varphi - \frac{\rho_2 p}{\rho_2} \cdot \left(\frac{Q_{zp}}{Q_2} \right) W_\varphi. \quad (9)$$

Блоки 4, 5.

При свободном движении гранулы время ее пребывания в рабочем пространстве гранулятора определяется решением третьего дифференциального уравнения системы (1) движения гранулы в вертикальном направлении.

Свободное движение гранулы наблюдается только при малом объемном содержании дисперсной фазы в двухфазной системе ($\phi < 0,1$). В таком случае расстояние между гранулами позволяет избежать столкновений и взаимного влияния их друг на друга. При $\phi > 0,1$ расстояния между поверхностями гранул (размеры проходов) становятся меньше их диаметра, гранула не может свободно проскакивать между двумя другими. В таком случае необходимо учитывать эффект столкновений гранул между собой. Столкновение гранул в двухфазной системе может происходить также в случае, когда дисперсная фаза состоит из полидисперсных гранул (что относится к рассматриваемому процессу). Кроме того, движение гранулы в окружающей газовой среде создает поля скорости и давления. Другие гранулы, которые составляют так называемый ансамбль, и стенки гранулятора, в свою очередь, оказывают гидродинамическое влияние на гранулу.

Учет такой гидродинамической ситуации и вычисление скорости движения гранулы (или времени ее пребывания в аппарате) в режиме стесненного движения является важным фактором при описании гидродинамики двухфазных вихревых потоков.

В данной работе предлагается учитывать условия стесненного движения при расчете времени пребывания гранул в рабочем пространстве устройства следующим образом

$$\tau_{cm} = \tau f_{et}(\phi), \quad (10)$$

где τ_{cm} – время пребывания гранулы в рабочем

пространстве устройства в условиях стеснённого движения гранулы, τ - время пребывания одиночной гранулы в рабочем пространстве устройства; $f_{e\tau}(\phi)$ - эмпирическая функция влияния стеснённости на время пребывания гранулы в рабочем пространстве устройства.

Функция $f_{e\tau}(\phi)$ имеет вид:

$$f_{e\tau}(\phi) = (1 - \phi)^{-m}, \quad (11)$$

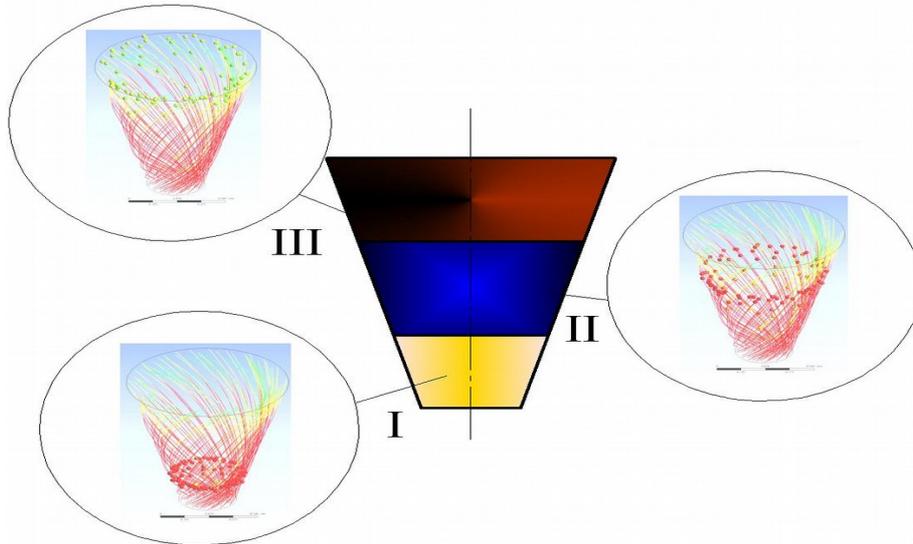


Рис. 2. Основные зоны движения гранул в вихревом грануляторе [7]: I - зона преимущественного вихревого движения гранул; II - зона комбинированного вихревого и восходящего движения гранул; III - зона преимущественного восходящего движения гранул

В условиях стеснённого движения гранулы коэффициент стесненности и время пребывания гранулы определяется отдельно для зон I, II, III.

Результаты исследований [8] позволили определить диапазон значений показателя m в каждой зоне гранулятора по формуле (11):

- зона I - $m=1,7-1,74$;
- зона II - $m=1,46-1,49$;
- зона III - $m=1,1-1,13$.

Таким образом, общее время пребывания гранул в режиме стеснённого движения определяется по формуле

$$\sum \tau_{cm} = \tau_{cm}^I + \tau_{cm}^{II} + \tau_{cm}^{III} = \tau^I (1 - \phi^I)^{-m^I} + \tau^{II} (1 - \phi^{II})^{-m^{II}} + \tau^{III} (1 - \phi^{III})^{-m^{III}} \quad (12)$$

где среднее значение ϕ в каждой зоне зависит от средней порозности взвешенного слоя ε [9] и определяется по формуле

$$\phi_i = 1 - \varepsilon_i. \quad (13)$$

По данным экспериментальных исследований по определению оптимальной конструкции газораспределительного устройства и его влияния на стабильность вихревого взвешенного слоя [10] предложены следующие диапазоны средних значений ϕ в каждой зоне вихревого гранулятора, которые будут применены в компьютерном моделировании и дальнейшем инженерном

где m - эмпирический показатель степени (коэффициент стеснённости для расчёта времени).

Результаты исследований [7] показали, что в рабочем пространстве вихревого гранулятора следует выделить три зоны движения газового потока и гранул по высоте устройства (рис. 2). В каждой из зон интенсивность движения газового потока и гранул определяется составляющими скорости и преимущественным направлением суммарной скорости.

расчете аппарата средней мощности:

- зона I - $\phi = 0,48-0,53$;
- зона II - $\phi = 0,35-0,4$;
- зона III - $\phi = 0,2-0,24$.

Блок 6.

На основе силового анализа (fig.3) получены расчётные формулы [6] для определения условий классификации гранул в рабочем пространстве гранулятора с переменной по высоте площадью сечения рабочего пространства:

1. Скорость газового потока, соответствующая условию равновесия гранулы размером r_{cp}

$$V_{op} = 1,63 \cdot \sqrt{\frac{\rho_{cp} \cdot g \cdot r_{cp}}{\psi \cdot \rho_z}}. \quad (14)$$

2. Высота текущего расположения гранулы размером r_{cp}

$$Z = 1,584 \sqrt{\frac{Q_z}{\sqrt{\text{tg} \phi^2 \cdot \frac{\rho_z \cdot g \cdot r_{cp}}{\psi \cdot \rho_z}}}}, \quad (15)$$

3. Радиус нижнего сечения гранулятора при условии расположения на нём гранул с максимальным размером r_{max} в полидисперсной системе

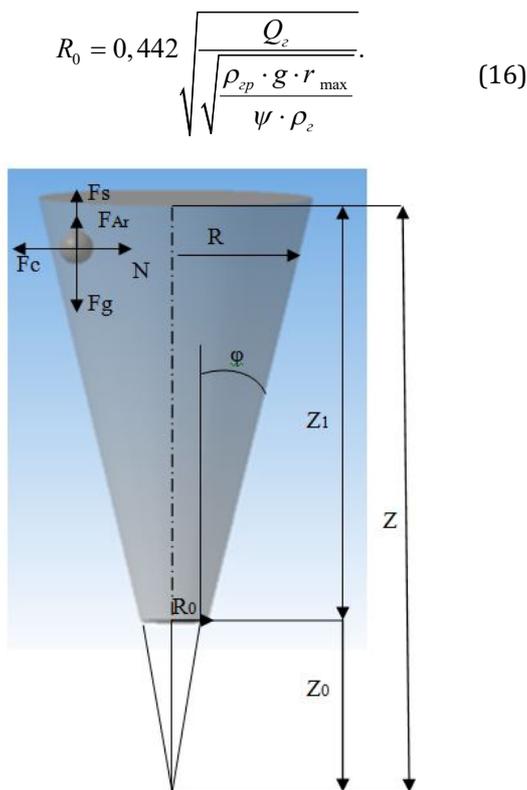


Рис.3. Расчётная схема рабочего пространства вихревого гранулятора [6]: Z – общая высота конуса; Z_0 – высота установки газораспределительного устройства; Z_1 – высота рабочего пространства гранулятора; φ – половина угла раскрытия конуса; R_0 – радиус газораспределительного устройства; R – текущий радиус рабочего пространства; F_g – сила тяжести; F_S – сила аэродинамического сопротивления; F_{Ar} – сила Архимеда; F_C – центробежная сила; N – реакция стенки

4. Высоты в соответствии в рис.3

$$Z_1 = Z - Z_0, \quad (17)$$

$$Z_0 = R_0 / \operatorname{tg} \alpha. \quad (18)$$

Результаты исследований, анализ и сопоставление теоретических и экспериментальных данных

На рис. 4 представлена визуализация траекторий движения полидисперсного состава гранул в вихревом грануляторе с различной конфигурацией рабочего пространства. Из приведенных результатов компьютерного моделирования можно отчетливо наблюдать разделение гранул на отдельные зоны по фракциям - крупные (или тяжелые) гранулы сосредоточены в нижнем сечении, в то время как мелкая нетоварная фракция поступает в сепарационную зону. Также при неизменных параметрах теплоносителя высота каждой из фракционных зон меняется обратно

пропорционально углу раскрытия конуса.

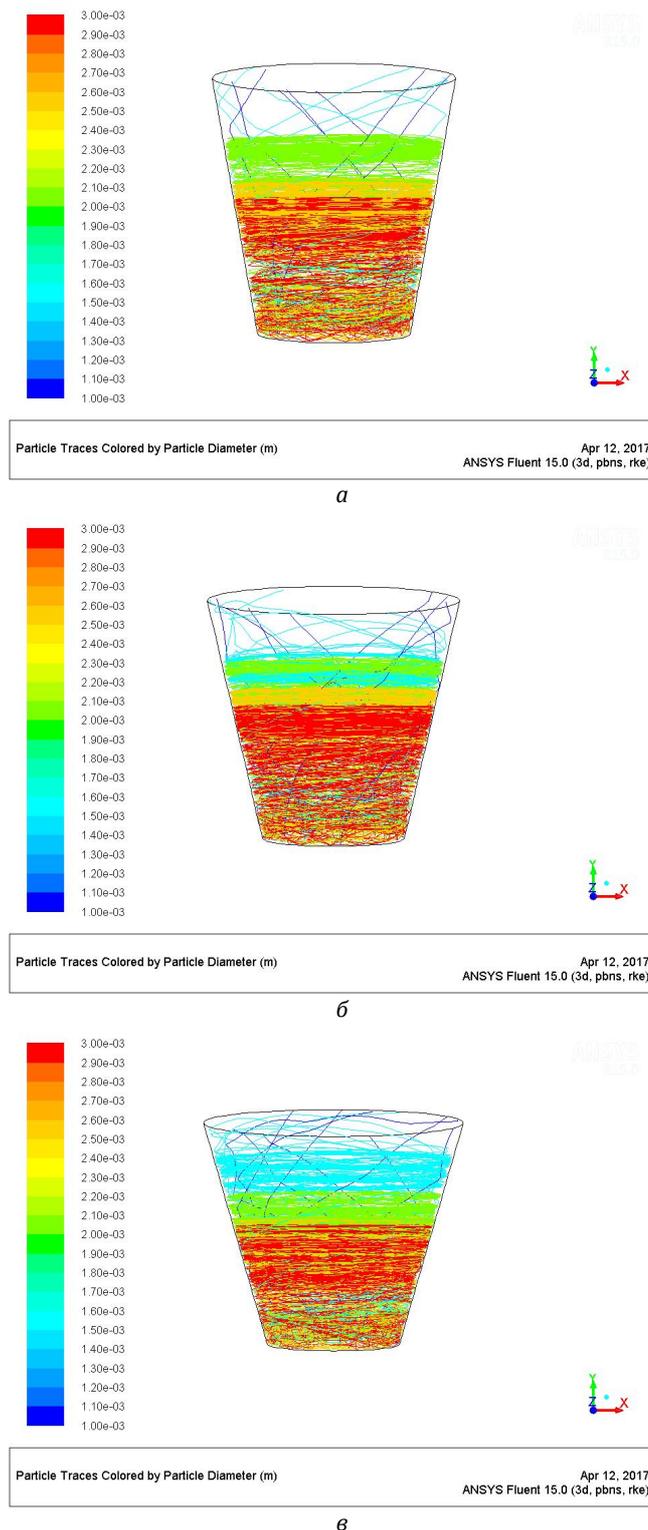


Рис. 4. Траектории движения полидисперсной фракции гранул (1-3 мм) в рабочем пространстве вихревого гранулятора различной конфигурации (визуализация данных расчёта по теоретической модели): а – $\varphi=10^\circ$; б – $\varphi=13^\circ$; в – $\varphi=16^\circ$

Процесс выхода гранулятора на рабочий режим наглядно продемонстрирован на рис. 5. Четко выражены процессы классификации и сепарации гранул — мельчайшие частицы почти сразу

выносятся в сепарационной зоны вихревого гранулятора, а крупная фракция классифицируется по размерам, отбрасывается к стенкам и движется по спиралевидной траектории.

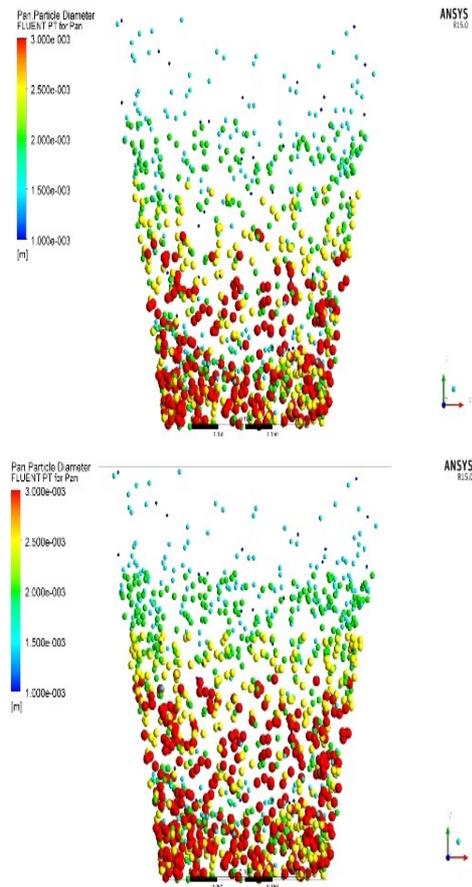
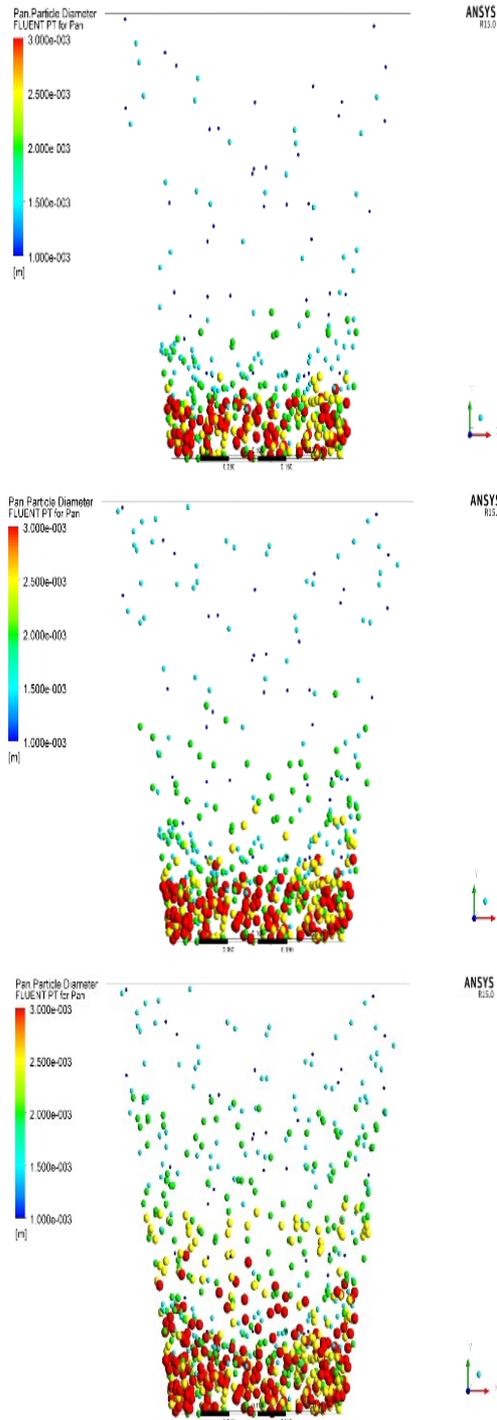


Рис. 5. Процесс выхода гранулятора на рабочий режим (визуализация данных расчёта по теоретической модели)

Анализ таких траекторий показал, что:

- увеличение расхода газового потока и угла раскрытия конуса рабочего пространства вихревого гранулятора приводит к уменьшению количества витков спирали, увеличению их шага и уменьшению времени пребывания гранулы в рабочем пространстве вихревого гранулятора;
- увеличение степени начальной закрутки газового потока (определяется углом наклона лопастей завихрителя и их количеством) и диаметра гранулы меняет траекторию ее движения за счет увеличения количества витков спирали, уменьшения их шага, увеличения диаметра верхнего витка спирали и увеличения времени пребывания гранулы в рабочем пространстве вихревого гранулятора.

Гранулы движутся вдоль стенки вихревого гранулятора и фактически не задерживаются в центральной его зоне. Это объясняется направлением действия вектора полной скорости их движения от центра к периферии за счет преобладания радиальной составляющей движения гранулы до двух третей радиуса устройства. Ближе к стенкам гранулятора действие радиальной составляющей уменьшается, гранулы начинают втягиваться во вращательное движение с вертикальным перемещением.

В целом спиралеобразные траектории движения гранулы в зависимости от ее свойств и конструкции вихревого гранулятора отличаются количеством витков и шагом между ними, а также диаметром нижнего и верхнего витка спирали. Это приводит к тому, что гранула проходит разный по длине путь в рабочем пространстве вихревого гранулятора, что сказывается на времени его контакта с газовым потоком.

Анализ результатов расчета показал, что по мере перемещения гранулы от центра к стенке вектор полной скорости меняется в направлении в зависимости от преобладания той или иной составляющей. В начальный момент времени гранула движется от оси аппарата перпендикулярно ей за счет преобладания радиальной составляющей ее скорости. По мере приближения к половине радиуса вихревого гранулятора гранулы начинают втягиваться в вихревое движение за счет преобладания окружной составляющей ее скорости.



Рис 6. Траектория движения гранул в рабочем пространстве вихревого гранулятора

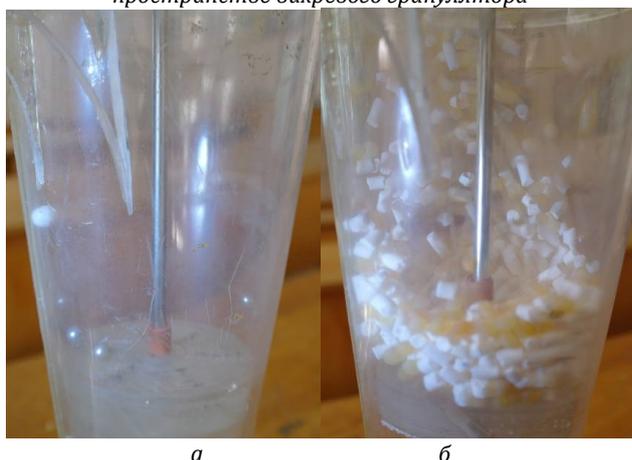


Рис.7. Распределение гранул в рабочем пространстве вихревого гранулятора [6]: а – широкий фракционный состав полидисперсной системы; б – узкий фракционный состав полидисперсной системы

У стенки гранулятора гранулы движутся по

спиралевидным траекториям с постепенным перемещением по вертикали за счет увеличения влияния расходной составляющей ее скорости; траектория движения не изменяется до достижения верхнего сечения вихревого гранулятора.

В качестве подтверждения полученных результатов теоретического описания и физической картины движения гранул на рис. 6 и 7 представлены данные экспериментальных исследований. Ярко выраженная спиралеобразная траектория движения гранул (рис. 6) и четкое разделение полидисперсной системы на фракции (рис. 7) дают основания утверждать об адекватности результатов моделирования.

Выводы и рекомендации

Предложенный в статье алгоритм расчёта гидродинамических характеристик двухфазного потока в рабочем пространстве вихревого гранулятора позволяет осуществить оптимизационное проектирование по критерию минимально необходимого времени контакта гранул с высокотемпературным теплоносителем. Полученные на основе предложенного алгоритма результаты компьютерного моделирования позволяют спрогнозировать поведение гранулы с различными физико-химическими свойствами в рабочем объёме аппарата. При этом важным является соблюдение условия, при котором «гидродинамическое» время пребывания гранулы в рабочем пространстве аппарата должно быть не менее «термодинамического» времени (этот параметр определяется кинетикой процесса удаления влаги из гранулы) [11-15]. Регулированием гидродинамических характеристик движения потоков и достигается оптимальная конструкция вихревого гранулятора, которая удовлетворяет требованиям критерия оптимизации.

Цель дальнейших исследований – моделирование работы вихревого гранулятора в условиях различной степени стеснённости потока и создание «гибридной» модели расчёта, которая будет включать как авторские программные продукты, так и существующие инструменты расчёта гидродинамики и теплообмена в аппаратах с активными гидродинамическими режимами.

Информация о финансовой поддержке

Работа выполнена в рамках проекта «Повышение эффективности грануляторов и сушилок с активными гидродинамическими режимами для получения, модификации и капсулирования удобрений», номер государственной регистрации 0116U006812.

Литература

1. Artyukhova N.A., Shandyba A.B., Artyukhov A.E. Energy efficiency assessment of multi-stage convective drying of concentrates and mineral raw materials // *Nauk. Visnyk Nats. Hirnychoho Univ.* 2014. Vol. 1. P. 92-98.
2. Artyukhov A.E., Sklabinskyi V.I. Theoretical analysis of granules movement hydrodynamics in the vortex granulators of ammonium nitrate and carbamide production // *Chem. Chem. Techn.* Vol. 9. No 2. P. 175-180.
3. Artyukhov A.E., Sklabinskyi V.I. Hydrodynamics of gas flow in small-sized vortex granulators in the production of nitrogen fertilizers // *Chem. Chem. Techn.* 2015. Vol. 9. No 3. P. 337-342.
4. Artyukhov A.E. Optimization of mass transfer separation elements of columnar equipment for natural gas preparation // *Chem. Petrol. Eng.* 2014. Vol. 49. Nos 11-12. P. 736-740.
5. Prokopov M.G., Levchenko D.A., Artyukhov A.E. Investigation of liquid-steam stream compressor // *Appl. Mechan. Mater.* 2014. Vol. 630. P. 109-116.
6. Artyukhov A.E., Fursa A.S., Moskalenko K.V. Classification and separation of granules in vortex granulators // *Chem. Petrol. Eng.* 2015. Vol. 51. Nos 5-6. P. 311-318.
7. Artyukhov A. Application software products for calculation trajectories of granules movement in vortex granulator // *CEUR Workshop Proceedings.-2016.-1761.- P. 363-373.*
8. Artyukhov A., Sklabinskyi V., Ivaniia A., Moskalenko K. Software for calculation of vortex type granulation devices // *CEUR Workshop Proceedings.-2016.-1761.- P. 374-385.*
9. Artyukhov A.E., Obodiak V.K., Boiko P.G., Rossi P.C. computer modeling of hydrodynamic and heat-mass transfer processes in the vortex type granulation devices // *CEUR Workshop Proceedings.-2017.-1844.- P. 33-47.*
10. Sklabinskyi V.I., Artyukhov A.E., Kononenko N.P. Environmental aspects implementation of high-granulation equipment for the production of nitrogen fertilizers // *Int. J. Sust. Devel.* 2013. Vol. 13. - P. 10-16.
11. A.E. Artyukhov, A.A. Voznyi, Thermodynamics of the vortex granulator's workspace: the impact on the structure of porous ammonium nitrate // *6th International Crimean Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2016).* 2016. Vol. 5 No 2. 02NEA01.
12. A.E. Artyukhov, Kinetics of heating and drying of porous ammonium nitrate granules in the vortex granulator // *6th International Crimean Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2016).* 2016. Vol. 5 No 2. 02NEA02.
13. Artyukhov A.E., Sklabinskyi V.I. Experimental and industrial implementation of porous ammonium nitrate producing process in vortex granulators // *Nauk. Visnyk Nats. Hirnychoho Univ.* 2013. Vol. 6. P. 42-48.
14. Artyukhov A.E., Sklabinskyi V.I. Investigation of the temperature field of coolant in the installations for obtaining 3d nanostructured porous surface layer on the granules of ammonium nitrate // *Journal of Nano- and Electronic Physics.- 2017.- 9, No. 1.-P. 01015-1 - 01015-4.*
15. Artyukhov A.E., Sklabinskyi V.I. 3D nanostructured porous layer of ammonium nitrate: influence of the moisturizing method on the layer's structure // *Journal of Nano- and Electronic Physics.- 2016.- 8, No. 4.- P. 04051-1 — 04051-5.*

Поступила: 15.07.2017

Об авторе:

Артюхов Артем Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры процессов и оборудования химических и нефтеперерабатывающих производств, Сумский государственный университет, artemijar@yandex.ru.

Note on the author:

Artyukhov Artem E., PhD, Associate professor, Processes and Equipment of Chemical and Petroleum Refinery Department, Sumy State University, artemijar@yandex.ru.