

**Качаев Александр Евгеньевич<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
Орехова Татьяна Николаевна<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент,  
Бехметова Сабина Ринатовна<sup>1</sup>, студент**

<sup>1</sup> Коломенский институт Московского политехнического университета,

<sup>2</sup> Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова

## ДИНАМИКА ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ С ПОЛИДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

**Аннотация.** В статье представлена методика, описывающая динамику взвешенного слоя с полидисперсными частицами в рабочем объеме камеры смещения пневмосмесителя непрерывного действия. Данная методика получена на основании исследований, проведенных авторами статьи с учетом экспериментальных данных, полученных другими учеными. В данном материале обобщен подход к численному моделированию взвешенного слоя с частицами различной дисперсности (на примере для сухих строительных смесей) и плотности. Установлены зависимости границы слоя, его порозности и скоростных параметров от диаметров частиц, геометрических параметров камеры смешения и иных технологических величин, влияющих на взвешенный слой внутри камеры. В тексте статьи представлен алгоритм расчета механики взвешенного слоя, который зарекомендовал себя при численном моделировании слоя высокими показателями точности расчетов, что в дальнейшем подтвердилось необходимым количеством экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** камера смешения, поток, частица, параметр торможения, циркуляция, тангенциальная скорость, порозность слоя.

**Kachaev Alexander Evgenievich<sup>1</sup>, Ph.D. tech. Sciences,  
Orekhova Tatyana Nikolaevna<sup>2</sup>, Ph.D. technologist, associate professor,  
Bekmetova Sabina Rinatovna<sup>1</sup>, student**

<sup>1</sup>Kolomna Institute of Moscow Polytechnic University,

<sup>2</sup>Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

## DYNAMICS OF A SUSPENDED LAYER WITH POLYDISPERSE PARTICLES IN CONTINUOUS AIR MIXERS

**Annotation.** The article presents a technique that describes the dynamics of a suspended layer with polydisperse particles in the working volume of the displacement chamber of a continuous air mixer. This technique was obtained on the basis of studies conducted by the authors of the article, taking into account

experimental data obtained by other scientists. This material generalizes the approach to numerical modeling of a suspended layer with particles of various dispersity (for example, for dry building mixtures) and density. The dependences of the layer boundary, its porosity and velocity parameters on particle diameters, geometrical parameters of the mixing chamber and other technological quantities affecting the suspended layer inside the chamber are established. The text of the article presents an algorithm for calculating the mechanics of a suspended layer, which has proven itself in numerical modeling of the layer with high calculation accuracy, which was later confirmed by the required amount of experimental data.

**Keywords:** mixing chamber, flow, particle, parameter deceleration, circulation, tangential velocity, layer porosity

**Введение.** Вопросы эффективного перемешивания компонентов различной дисперсности исследуются в различных отраслях промышленности. Решение этих вопросов всегда неоднозначно и нетривиально. Это связано с тем, что в условиях действующих предприятий по выпуску сухих строительных смесей, порошковых красок, пигментов, извести и др. в промышленности строительных материалов широко используются различного типа смесители: лопастные, роторные, планетарные, гравитационные и другие. Однако наряду с высокой надежностью этих агрегатов они имеют и ряд недостатков: высокая металлоемкость, высокие показатели износа рабочих органов, сравнительно невысокие показатели однородности готового продукта.

Коллективом авторов разработаны конструкции пневмосмесителей непрерывного действия [1,2,3], которые отвечают современным требованиям, предъявляемым к технологическому оборудованию для гомогенизации полидисперсных компонентов: низкая металлоемкость конструкции (за счет изготовления корпуса смесительного агрегата из мягкого полиуретана); отсутствие в готовом продукте металлических включений; высокая производительность и коэффициент однородности смеси.

За последние годы, как у нас в стране [4,5] так и за рубежом [6,7], эффективно используются агрегаты с пневматическим принципом перемешивания порошкообразных масс: вертикального исполнения, горизонтального типа, с псевдоожижением слоя компонентов смеси и др. В

этом особое место занимают пневмосмесители горизонтального типа непрерывного действия с камерой смешения переменного поперечного сечения. Для использования пневмосмесителей при производстве сухих строительных смесей различной дисперсности, в конструкции которых присутствует камера в виде параболического корпуса, очень важно уделить внимание динамике полидисперсного потока. В виду сложности всех динамических моделей на различных этапах движения компонентов в пневмосмесителе необходимо поддерживать полидисперсный поток во взвешенном состоянии. Именно поэтому очень важно определить характер поведения частиц различного диаметра в рабочем объеме пневмосмесителя [9]. Для этого необходимо описать механику взвешенного слоя в камере смешения с целью управления эффективными режимами эксплуатации пневмосмесителя.

**Основная часть.** Условия механики взвешенного слоя сформулируем так: если критический диаметр частицы  $d_{кр}$  больше максимального  $d_{max}$  для имеющихся в слое частиц, то все частицы будут взвешены. В этом случае аргумент функции распределения частиц  $\tau_{кр} \gg 1$  и  $D(\tau_{кр}) \approx 1$  поэтому из [8] параметр  $S = 1$ , т.е. полностью взвешенный слой не будет тормозить поток о криволинейную поверхность камеры. С уменьшением такого торможения возрастает значение торможения потока с частицами о торцевые днища камеры. Этот вид торможения играет более существенную роль для мелких частиц, взвешенных в газообразном объеме, в камере с параболическими коническими стенками [10]. В соответствии с [11] для полностью взвешенного слоя будем учитывать торможение потока о торцевые поверхности. Рассматривается однородный взвешенный слой цилиндрической формы длиной  $L$ , наружным радиусом  $R_n$  и внутренним  $R_i$ . Если  $M$  - масса частиц в слое, то доля объема, занятая средой, т.е. порозность слоя  $\varepsilon$ , будет:

$$\varepsilon = \frac{V_c}{V} = 1 - \frac{V_p \Sigma}{V} = 1 - \frac{M}{\pi(R_n^2 - R_i^2)L\rho_p}, \quad (1)$$

где  $V$  – объем слоя;  $V_c$  – объем занимаемый средой;  $V_{p\Sigma}$  – объем всех частиц. Тогда среднюю плотность слоя можно записать так:

$$\rho_c = \frac{\rho V_c + \rho_p V_p}{V} = \rho_p(1 - \varepsilon) + \rho\varepsilon. \quad (2)$$

Рассмотрим взаимодействие кольцевого взвешенного слоя радиусом  $r$  и шириной  $dr$  с торцевыми стенками камеры смешения. Сила воздействия двухфазного потока на единицу площади торцевой поверхности определяется скоростным напором  $C_f \rho_c v_c^2$ , где  $C_f$  – коэффициент трения потока о стенку. Тогда момент сил взаимодействия кольцевого слоя на две торцевые стенки камеры равен:

$$d\Omega = 2C_f \frac{\rho_c v_c^2}{2} 2\pi r \cdot r dr = 2\pi C_f \rho_c \Gamma^2 dr, \quad (3)$$

где  $\Gamma = v_c r$  – циркуляция потока, проходящего через слой;  $v_c$  – тангенциальная скорость среды и частиц слоя.

Этот момент сил приводит к уменьшению потока момента количества движения среды  $\Omega = G \cdot \Gamma$ , проходящей через слой  $dr$ :

$$d\Omega = G \cdot d\Gamma. \quad (4)$$

Исключая  $d\Omega$  из (3) и (4), получаем уравнение

$$G d\Gamma = 2\pi C_f \Gamma^2 \rho_c dr, \quad (4^*)$$

после интегрирования которого при граничном условии  $\Gamma(R_H) = \Gamma_{ск}$  на наружном радиусе  $R_H$  слоя имеем:

$$\Gamma = \frac{\Gamma_{ск}}{1 + 2\pi C_f \rho_c (R_H - r) \Gamma_{ск} / G}. \quad (5)$$

Так как наружный радиус слоя  $R_H$  может быть меньше  $R_K$ , то в области  $R_K \leq r \leq R_H$  циркуляция будет постоянна. Поэтому можно записать:

$$\Gamma_{ск} = v_{ск} \cdot R_H, \quad (6)$$

Отсюда

$$\Gamma_{ск} = \frac{\sqrt{4\pi C_f \rho_c \Gamma_K L / G + 1} - 1}{2\pi C_f \rho_c L / G}, \quad (7)$$

где  $\Gamma_K = v_K \cdot R_K$ ;  $v_K$  – тангенциальная скорость на периферии ненагруженной камеры смешения.

Выведенные соотношения зависят от коэффициента трения  $C_f$ . В [11] результате сопоставления расчетов с экспериментом получено  $C_f = 0,003$ , а [8] для псевдооживленного слоя по аналогии с дисперсно-кольцевым потоком в трубах предлагается  $C_f = 0,005$ . Такого порядка значения для коэффициента сопротивления следуют из формулы Прандтля [8]:

$$C_f = \frac{0,077}{Re^{0,2}} \quad (8)$$

при  $5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$ , которая обобщает эксперименты по сопротивлению гладкой пластины. Для камеры смешения  $Re = v_k R_k / \nu$ .

Конструктивно-технологические параметры агрегата были выбраны из условия оптимальности и использовались при проектировании и изготовлении его экспериментального образца, показанного на рисунке 1.



а) б)  
Рисунок 1. Пневмосмеситель непрерывного действия: а) – общий вид экспериментальной установки; б) – камера смешения пневмосмесителя.

Очень важно при проектировании пневмосмесителей и установок для гомогенизации дисперсных систем научиться управлять процессом распределения одних частиц в объеме других. Моделирование таких технологических процессов позволяет получить результаты для практической работы по перемешиванию различных материалов: различной активности, плотности, гранулометрического состава и др.

Все определяемые конструктивно-технологические параметры пневмосмесителя должны быть выбраны таким образом, чтобы удовлетворялись все требования, предъявляемые к качеству смеси. При этом также должны быть учтены энергетические параметры работы агрегата, его производительность и конкурентоспособность по сравнению с существующими аналогами. Именно для этого существуют различные подходы в расчете и создании пневмосмесителей непрерывного действия не только для сухих строительных смесей, но и для повсеместного их использования в смежных отраслях промышленности.

Таблица 1

### ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Наименование параметра	Обозначение/Размерность	Величина
Массовый расход газа	$G$ / кг/с	$0.24 \cdot 10^{-1}$
Радиус камеры	$R_k$ / м	$0.8 \cdot 10^{-1}$
Радиус выходного отверстия	$R_i$ / м	$0.275 \cdot 10^{-1}$
Длина камеры	$L$ / м	$0.2 \cdot 10^{-1}$
Площадь щелей завихрителя	$F_{vx}$ / м**2/с	$0.36 \cdot 10^{-3}$
Угол наклона	$P_{sivx}$ / град	$0.6 \cdot 10^2$
Вид завихрителя	$VID$	1
Кинематическая вязкость	$\nu$ / м**2/с	$0.15 \cdot 10^{-4}$
Плотность среды	$\rho_c$ / кг/м**3	$0.126 \cdot 10^1$
Плотность частиц	$\rho_p$ / кг/м**3	$0.232 \cdot 10^4$
Медианный диаметр частиц	$d_{50}$ / м	$0.1 \cdot 10^{-4}$
Мин. диаметр частиц	$d_{min}$ / м	$0.96272 \cdot 10^{-5}$
Макс. диаметр частиц	$d_{max}$ / м	$0.10387 \cdot 10^{-4}$
Логарифм дисперсии распределения	$\sigma$	$0.1 \cdot 10^{-1}$
Коэф. Отставания частицы	$\beta$	$0.1 \cdot 10^1$
Масса слоя	$M$ / кг	0.146
Структура слоя для частиц с $d_{min}$ (1-одна ветвь, 2-две ветви)	$KOD3$	1
Относительная точность	$EPS$	$0.1 \cdot 10^{-1}$

Таблица 2

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Наименование параметра	Обозначение/Размерность	Величина
------------------------	-------------------------	----------

Скорость у стенки камеры	$v_{ск}/м/с$	$0.67976 \cdot 10^1$
Средняя порозность слоя	$\varepsilon$	$0.97354 \cdot 10^1$
Диаметр частицы на R1	$d_{R1}/м$	$0.95721 \cdot 10^{-5}$
Тангенциальная скорость	$v_1/м/с$	$0.49266 \cdot 10^1$
Минимальная танг. скорость	$v_{min}/м/с$	$0.39925 \cdot 10^1$
Радиус $v_{min}$	$R_{min}/м$	$0.48710 \cdot 10^{-1}$
Диаметр частицы на $R_{min}$	$d_{Rmin}/м$	$0.11812 \cdot 10^{-2}$
Диаметр частицы на $R_k$	$d_{Rk}/м$	$0.69374 \cdot 10^{-5}$
Параметры на внутреннем радиусе слоя		
Диаметр частицы	$d_{cmin}/м$	$0.96272 \cdot 10^{-5}$
Внутренний радиус слоя	$R_1/м$	$0.27762 \cdot 10^{-2}$
Тангенциальная скорость	$v_{cR1}/м/с$	$0.48984 \cdot 10^1$
Параметры для средней частицы D50		
Диаметр D50	$d_{50}/м$	$0.10000 \cdot 10^{-4}$
На внутренней ветви		
Радиус траектории	$R_{50}/м$	$0.29633 \cdot 10^{-1}$
Тангенциальная скорость	$v_{50}/м$	$0.47158 \cdot 10^1$
На наружной ветви		
Радиус траектории	$R_{50}/м$	$0.67786 \cdot 10^{-1}$
Тангенциальная скорость	$v_{50}/м$	$0.47158 \cdot 10^1$
Параметры на внутреннем радиусе слоя		
Диаметр	$d_{cRn}/м$	$0.10387 \cdot 10^{-4}$
Наружный радиус слоя	$R_n/м$	$0.65626 \cdot 10^{-1}$
Тангенциальная скорость	$v_{cRn}/м$	$0.45401 \cdot 10^1$

**Методика исследований.** Последовательность действий для расчёта взвешенного слоя в камере смешения пневмосмесителя:

1. Исходными данными является геометрия камеры смешения, массовый расход полидисперсной воздушной среды, её свойства, свойства частиц и масса слоя М.

2. Определяется максимальный и минимальный диаметр частиц. При известном нормально-логарифмическом распределении эти диаметры рассчитываются с 5%-ной обеспеченностью. Тогда согласно [8]:

$$\tau = \frac{\lg(d, d_{50})}{\lg\sigma}, \quad (9)$$

где  $\tau$  аргумент функции распределения ;  $\sigma$ -дисперсия;  $d$ -диаметр частицы;  $d_{50}$  – медианный диаметр частицы;

и с учётом того, что  $D(1.65) = 1 - D(-1.65) = 0.95$ , получаем

$$d_{max} = d_{50} \cdot \sigma^{1.65} \quad (9.1)$$

$$d_{min} = d_{50} \cdot \sigma^{-1.65} \quad (9.2)$$

3. По экспериментальной зависимости в [8]:

$$\frac{1}{s} \approx \bar{M}(1 - \bar{p}) \left( 1 - D(\tau_{кр}) \right) f_f + 1, \quad (10)$$

где  $s$  – параметр торможения потока зондом или слоем частиц;

$M$  – средняя масса слоя в смесительной камере;

$P$  – порозность слоя;

$D$  – функция распределения от  $\tau_{кр}(\tau)$ ;

$f_f$  – коэффициент трения частиц о поверхность камеры;

определяем параметр торможения  $S$ . Если  $S \approx 1$ , это свидетельствует, что частицы не соприкасаются с поверхностью камеры.

4. Задаются границы слоя  $R_n = R_1$  и  $R_i = R_1$  (где  $R_n$  - начальный радиус камеры,  $R_1$ -радиус выходного отверстия)

5. По (1) и (2) рассчитывается плотность слоя  $\rho_c$

6. По (8) определяется коэффициент трения потока о поверхность  $C_f$ .

7. Необходимая тангенциальная скорость частиц в слое на определённом радиусе  $R_i$  находится из условия  $K_s = R_i$  (где  $K_s$  – коэффициент сепарации), из которого из стоксовских частиц получаем:

$$v_c = \sqrt{\frac{9\nu Q \bar{p}}{\pi L (1 - \bar{p}) d^2}}, \quad (11)$$

здесь  $\nu$  – климатическая вязкость;

$L$  – длина камеры;



$D$  – диаметр частицы.

Как видно, скорость зависит от диаметра частицы и явно не зависит от радиуса  $R_i$

8. Согласно (7) определяется циркуляция  $\Gamma_{ск}$  на периферии слоя

9. Из(5) определяется радиус  $\bar{R}_i = \frac{R_i}{R_k}$  на котором частицы имеют скорость  $v_c$ :

$$\bar{R}_i = \frac{(1+A\bar{R}_H) \pm \sqrt{(1+A\bar{R}_H)^2 - 4\frac{A}{v_c}}}{2A}, \quad (12)$$

где:

$$A = \frac{2\pi C_f p_c R_H \tau_{ск}}{G}; \quad (13)$$

$$\bar{v}_c = \frac{v_c}{v_{ск}}, \quad (14)$$

Здесь  $v_{ск}$  – тангенсальная скорость слоя на поверхности камеры;

$v_c$  – среднее значение тангенсальной скорости частиц в камере;

$A$  – геометрический коэффициент потока со взвешенными частицами;

$\tau_{ск}$  – циркуляция слоя в камере.

$\bar{R}_H$  – среднее значение начального радиуса камеры.

10. Для  $d_{min}$  и  $d_{max}$  по (9.1) и (9.2) определяются радиусы орбит этих частиц  $r_{min}$  и  $r_{max}$

11. Задаются новые границы слоя  $R_H = r_{max}$  и  $R_k = r_{min}$ , и расчёт повторяется с п.4. Расчёты проводятся до совпадения результатов с необходимой точностью. В итоге данная методика расчёта взвешенного слоя в камере пневмосмесителей [1, 2 и 3] позволяет определить границы слоя, его порозность и скоростные параметры его вращения. По данной методике получены расчётные данные о механике взвешенного слоя, которые представлены в таблице 2. Исходные данные для расчёта показаны в таблице 1. Экспериментальные исследования взвешенного вращающегося слоя будет представлено далее во второй части статьи.

Численное моделирование результатов исследований были положены в основу создания расчетной математической модели пневмосмесителя в пакете

программ SolidWorks FlowSimulation. Конечный результат работы данного пакета программ представлен на рисунке 2.

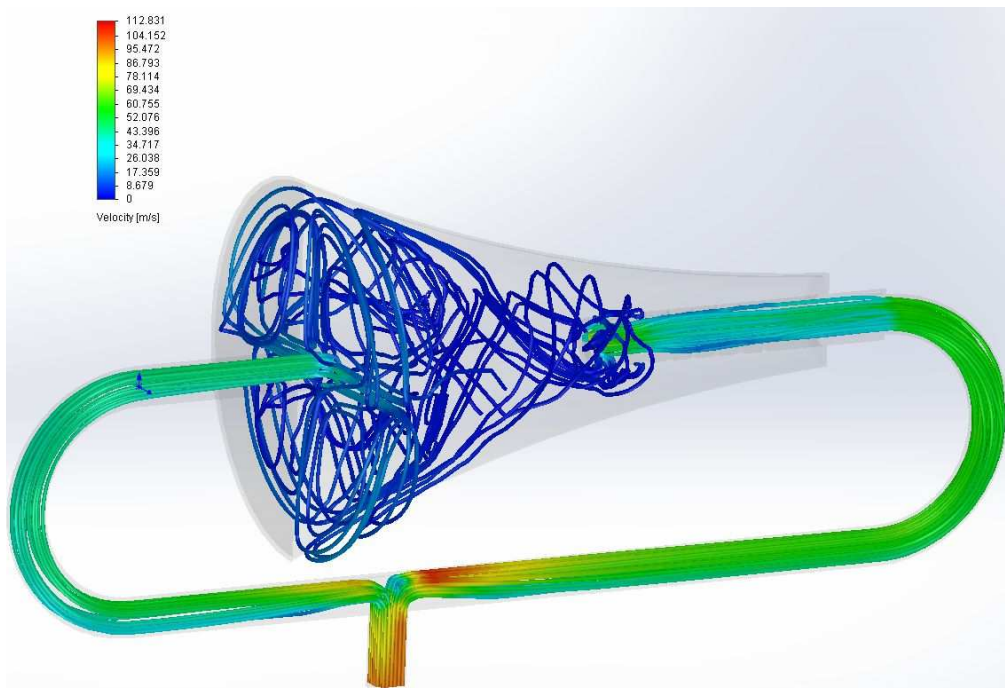


Рисунок 2. Оработка методики определения взвешенного слоя частиц в объеме камеры смешения пневмосмесителя в пакете программ SolidWorks FlowSimulation.

**Выводы.** В процессе исследований взвешенного слоя в объеме камеры смешения пневмосмесителя на основании ранее полученных результатов различных авторов была разработана методика определения оптимальных конструктивно-технологических параметров и режимов работы агрегата, которая основана на законах механики взвешенного слоя частиц в динамическом потоке воздуха. Сама методика определения параметров взвешенного слоя частиц в объеме камеры смешения пневмосмесителя достаточно точно коррелируется с результатами, полученными в пакете программ SolidWorks FlowSimulation (скоростные параметры движения взвешенного слоя частиц в любой точке попольной камеры, полученные в результате численного моделирования по представленной методике, совпадают с результатами, полученными в пакете программ SolidWorks FlowSimulation). Данные исследования помогут в дальнейшем определить характер движения вращающегося слоя частиц в объеме камеры смешения пневмосмесителя,

который, в свою очередь, также влияет на качество смесей, их активационную способность и производительность агрегата.

### **Библиографический список**

1. Пат 102533 Российская федерация, В01F 5/00. Пневмосмеситель непрерывного действия для производство сухих строительных смесей / В.А Уваров, Т.Н. Орехова, С.И.Гордиенко, А.Е Качаев; заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г Шухова- №20101140830/05, заявл. 05.10.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл.№7.
2. Пат. 141488 Российская Федерация, В01F 5/00. Противоточный пневмосмеситель для производства дисперсно-армированных смесей / В.А Уваров, Т.Н. Орехова, С.В. Ключев, А.Е Качаев; заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г Шухова- №2013159013/05, заявл. 30.12.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл.№16.
3. Пат. 115682 Российская Федерация, В01F 5/00. Пневмосмеситель многокомпонентных сухих строительных смесей / В.А Уваров, Т.Н. Орехова, С.И. Гордеев, А.Е Качаев; заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г Шухова- №2011151913/05, заявл. 19.12.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл.№13.
4. Качаев А.Е. Описание вихревого движения двухфазного потока в пневмосмесителе непрерывного действия / А.Е Качаев, Т.Н. Орехова // Вестник БГТУ им.Шухова.-Белгород, №5, 2017.-С.121-125.
5. Качаев, А.Е. Аэродинамические особенности пневмосмесителей непрерывного действия/ А.Е Качаев, Т.Н. Орехова //Вестник БГТУ им.Шухова.-Белгород, №11, 2017.-С.149-155.
6. Arratia P.E., Duong Nhat-hang, Muzzio F.J., Godbole P., Reynolds S. A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote blender via DEM simulations; Powder Technology, Vol. 164(2006), pp. 50-57.

7. Berthiaux H., Mizonov V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review. The Canadian Journal of Chemical Engineering/ V/85, No.6,2004,pp.1143-1168
8. Смульский,И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах/ И.И. Смульский.-Новосибирск:ВО "Наука". Сибирская издательская фирма ,1992-301 с.
9. Uvarov V.A., etc.THE COUNTERFLOW MIXER FOR RECEIVING THE DISPERSE REINFORCED COMPOSINES/ Uvarov V.A., Klyuev S.V., Orekhova T.N., Klyuev A.V., Sheremet E.O.,Durachenko A.V.// Research Jornal of Applied Sciencenes.2014.Т.9 №12 P.-1211-1215.
10. Воляков,Э .П., Кардаш А.П и др.Гидродинамика вихревой гиперболической камеры при наличии твёрдой фазы // Изв.СО РАН СССР. Сер. техн. наук.-1984 г. №10.вып.2.-С.90-98.
11. Anderson,L.A., Hasinger, S.H., Turman, B.N. Two-component vortex flow studiess of the colloid core nuclear rocket //J. Spacecraft and rock.-1972.- Vol.9, №5.-h.311-317

### **References:**

1. Pat 102533 Russian Federation, B01F 5/00. Continuous pneumatic mixer for the production of dry building mixtures / V.A. Uvarov, T.N. Orekhova, S.I. Gordienko, A.E. Kachaev; applicant and patent holder: BSTU im. V.G. Shukhov - No. 20101140830/05, Appl. 10/05/2010; publ. 03/10/2011, Bull. No. 7.
2. Pat. 141488 Russian Federation, B01F 5/00. Counterflow pneumatic mixer for the production of dispersed-reinforced mixtures / V.A. Uvarov, T.N. Orekhova, S.V. Klyuev, A.E. Kachaev; applicant and patent holder: BSTU im. V.G. Shukhov - No. 2013159013/05, Appl. 12/30/2013; publ. 06/10/2014, Bull. No. 16.
3. Pat. 115682 Russian Federation, B01F 5/00. Pneumatic mixer for multicomponent dry building mixtures / V.A. Uvarov, T.N. Orekhova, S.I.

- Gordeev, A.E. Kachaev; applicant and patent holder: BSTU im. V.G. Shukhov - No. 2011151913/05, Appl. 12/19/2011; publ. 05/10/2012, Bull. No. 13.
4. Kachaev A.E. Description of the vortex motion of a two-phase flow in a continuous pneumatic mixer / A.E. Kachaev, T.N. Orekhov // Bulletin of BSTU named after Shukhov.-Belgorod, No. 5, 2017.-P.121-125.
  5. Kachaev, A.E. Aerodynamic features of continuous pneumatic mixers / A.E. Kachaev, T.N. Orekhov //Bulletin of BSTU named after Shukhov.-Belgorod, No. 11,2017.-P.149-155.
  6. Arratia P.E., Duong Nhat-hang, Muzzio F.J., Godbole P., Reynolds S. A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote blender via DEM simulations; Powder Technology, Vol. 164(2006), pp. 50-57.
  7. Berthiaux H., Mizonov V. Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review. The Canadian Journal of Chemical Engineering/ V/85, No. 6, 2004, pp. 1143-1168
  8. Smulsky, I.I. Aerodynamics and processes in vortex chambers / I.I. Smulsky.- Novosibirsk: VO "Science". Siberian publishing company, 1992-301 p.
  9. Uvarov V.A., etc. THE COUNTERFLOW MIXER FOR RECEIVING THE DISPERSE REINFORCED COMPOSINES/ Uvarov V.A., Klyuev S.V., Orehova T.N., Klyuev A.V., Sheremet E.O., Durachenko A.V.// Research Journal of Applied Science.2014.T.9 No. 12 P .-1211-1215.
  10. Volyakov, E.P., Kardash A.P., et al., Hydrodynamics of a vortex hyperbolic chamber in the presence of a solid phase, Izv. SO RAN SSSR. Ser. tech. Sciences. - 1984, No. 10. Issue 2. - P. 90-98.
  11. Anderson, L.A., Hasinger, S.H., Turman, B.N. Two-component vortex flow studies of the colloid core rocket nuclear //J. Spacecraft and rock.-1972.- Vol.9, No.5.-h.311-317