

УДК 621.662

**Качаев Александр Евгеньевич¹, канд. техн. наук,
Орехова Татьяна Николаевна², канд. техн. наук, доцент,
Бехметова Сабина Ринатовна¹, студент**

¹ Коломенский институт Московского политехнического университета,

² Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗВЕШЕННОГО И ВРАЩАЮЩЕГОСЯ СЛОЯ ЧАСТИЦ В ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЯХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований динамики вращающегося слоя в камере смешения пневмосмесителей непрерывного действия. В процессе исследований вращающегося слоя в камерах смешения агрегатов было установлено, что распределение плотности слоев с частицами для камер с разной длиной представляет собой сложную математическую зависимость от нескольких факторов: времени t , скорости входа основного потока в камеру смешения $v_{вх.}$ и концентрации частиц в объеме камеры смешения. На основании парного влияния парных факторов друг на друга представлены результаты расчетов скоростей в камере смешения при $M_0=146$ г и $Q=168$ м³/ч. В связи с этим исследованием в статье приводится аргументированный подход к дифференцированному рассмотрению механики вращающегося и взвешенного слоев в объеме камеры смешения пневмосмесителя.

Ключевые слова: вращающийся слой, скорость взвешенного слоя, параметр торможения слоя, частица, пневмосмеситель, камера смешения.

**Kachaev Alexander Evgenievich¹, Ph.D. tech. Sciences,
Orekhova Tatyana Nikolaevna², Ph.D. technologist, associate professor,
Bekmetova Sabina Rinatovna¹, student**

¹Kolomna Institute of Moscow Polytechnic University,

²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

RESEARCH OF THE SUSPENDED AND ROTATED LAYER OF PARTICLES IN CONTINUOUS AIR MIXERS

Annotation. The article presents the results of experimental studies of the dynamics of the rotating layer in the mixing chamber of continuous pneumatic mixers. In the process of studying the rotating layer in the mixing chambers of aggregates, it was found that the distribution of the density of layers with particles for chambers with different lengths is a complex mathematical dependence on several factors: time t , the entry speed of the main flow into the mixing chamber $v_{(in.)}$ and particle concentration in the volume of the mixing chamber. Based on the pairwise influence of pair factors on each other, the results of calculating the velocities in the mixing chamber at $M_0=146$ g and $Q=168$ m³/h are presented. In connection with this study, the article provides a reasoned approach to a differentiated consideration of the mechanics of the rotating and suspended layers in the volume of the mixing chamber of an air mixer.

Keywords: rotating layer, velocity of the suspended layer, layer deceleration parameter, particle, pneumatic mixer, mixing chamber.

Введение. Перед современными производствами по выпуску сухих строительных смесей стоят задачи расширения номенклатуры выпускаемой продукции, повышения эффективности смесительных агрегатов и её качества. Известные конструкции смесителей, таких как лопастные, роторные, лотковые и др., зачастую не удовлетворяют должному технологическому процессу производства сухих смесей. Готовая продукция после гомогенизации в таких агрегатах имеет низкий коэффициент однородности смеси ($k = 0,5 - 0,65$), а энергозатраты при этом могут достигать 10 кВт*ч/т [1].

Достижения строительного материаловедения в области сухих строительных смесей диктуют условия, в которых необходимо совершенствовать технику и технологию гомогенизации дисперсных компонентов смесей. Наиболее перспективными агрегатами для гомогенизации

дисперсных компонентов смесей являются пневмосмесители непрерывного действия [2, 3 и 4].

Для указанных выше названий смесительных агрегатов, не используемых энергоноситель - сжатый воздух, преимущественно используется циклический тип работы: загрузка компонентов смеси, смешивание в объеме рабочей камеры смесителя и разгрузка готового продукта. Пневмосмесители позволяют производить сухие смеси в непрерывном цикле, т.е. одновременно осуществляется загрузка компонентов, их гомогенизация и разгрузка. При этом, как показали исследования, достигается высокое качество готового продукта, энергозатраты на подачу сжатого воздуха на тонну смеси не превышает 7 кВт*ч.

Коллективом ученых были разработаны различные конструкции пневмосмесителей [2, 3, 4], которые удовлетворяют широким требованиям при производстве сухих строительных смесей. Причем, была разработана конструкция пневмосмесителей для производства дисперсно-армированных смесей, которые в своем составе содержат фиброволокна синтетического и неорганического происхождения (базальт, металлическая стружка, стекловолокна и др.).

В зависимости от насыпной плотности армируемых волокон необходимо осуществлять подбор того или иного пневмосмесителя [2, 3, 4]. Так, например, для производства смесей с волокнами из базальта целесообразнее использовать конструкцию пневмосмесителя, показанную на рис. 1 [4]. Насыпная плотность базальтового волокна составляет 75-100 кг/м³. Оно относительно легкое в сравнении с стекловолокном, у которого данный показатель равен 150-400 кг/м³.

Для производства смесей с тяжелыми армирующими волокнами, такими как стекловолокно, волокна амальгамы, металлическая стружка и др., целесообразнее использовать конструкцию пневмосмесителя, которая показаны на рис. 2 [3]. Ее конструктивные особенности по сравнению с предыдущим пневмосмесителем заключаются в дополнительном подводе энергоносителя на

стадии разгона компонентов. Это необходимо, чтобы поддерживать тяжелые волокнистые материалы во взвешенном состоянии уже на стадии предварительного смешения в разгонном патрубке. В камере гомогенизации имеются дополнительные регулируемые наклонные сопла, которые позволяют перенастраивать агрегат при смешении различных типов тяжелых армируемых волокон. Эти сопла создают вращение взвешенному слою частиц, который поступает с энергоносителем в камеру смешения. Очень важно управлять процессом вращения слоя с частицами в камере смешения при его взвешивании и потере скорости транспортирования. Для выполнения этой задачи были проведены экспериментальные и аналитические исследования вращающегося слоя с частицами для камеры смешения специальной геометрии, представленных в конструкциях пневмосмесителей на рисунке и 1 и 2.

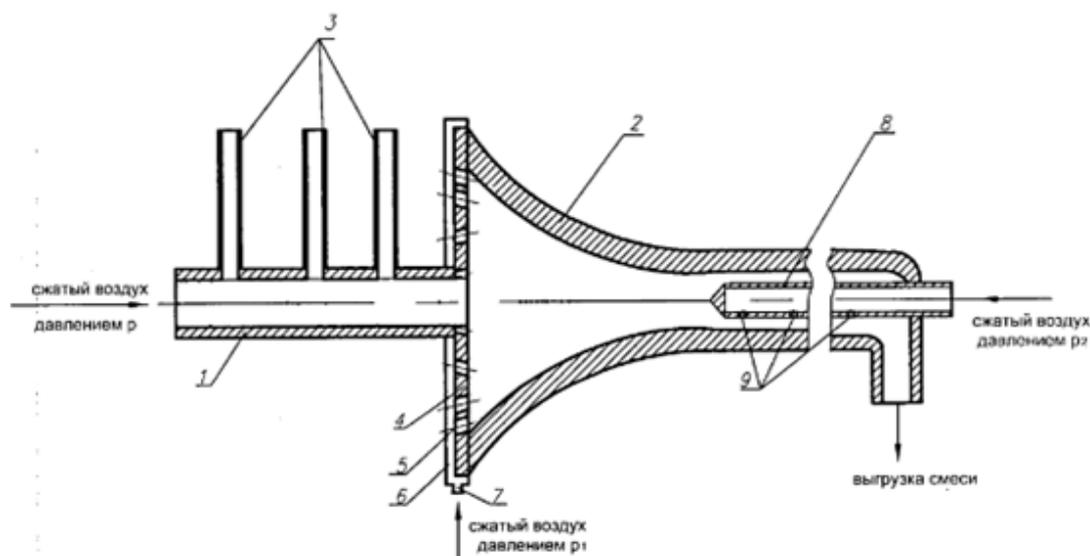


Рис. 1. Пневмосмеситель непрерывного действия для производства сухих смесей с легкими дисперсно-армирующими волокнами: 1 - разгонный патрубок; 2 - камера гомогенизации; 3 - подача компонентов смеси; 4 - наклонные аэрирующие отверстия; 5 - отверстия поддува для ликвидации зон застоя; 6 - камера поддува воздуха; 7 - подвод воздуха поддува; 8 - аэрирующее устройство; 9 - отверстия аэрирующего устройства.

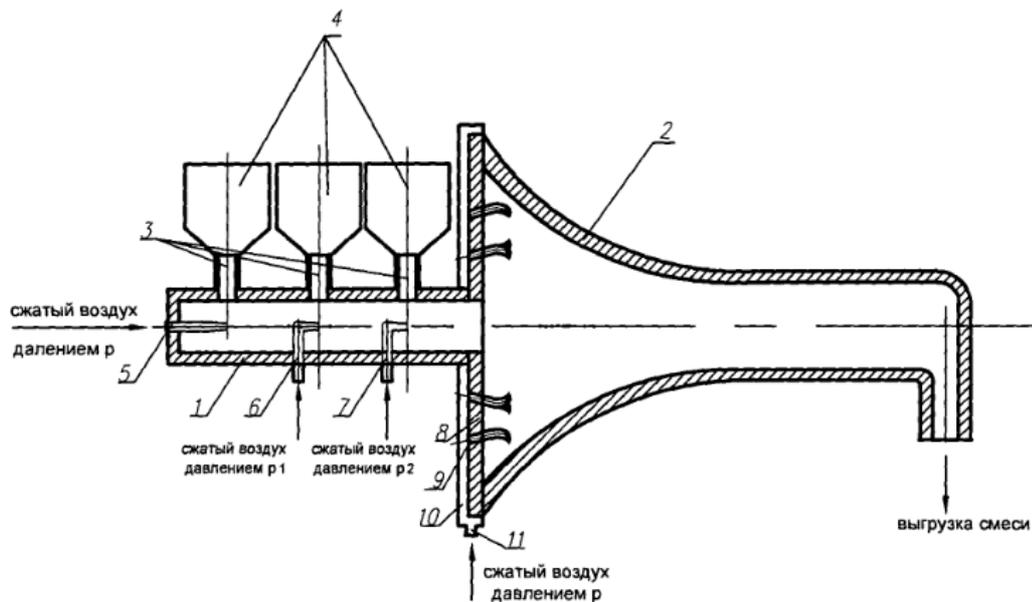


Рис. 2. Пневмосмеситель непрерывного действия для производства сухих смесей с тяжелыми дисперсно-армирующими волокнами: 1 - разгонный патрубок; 2 - камера гомогенизации; 3 - дозаторы компонентов смеси; 4 - бункеры компонентов смеси; наклонные аэрирующие отверстия; 5 - эжектор; 6,7 - дополнительные эжекторы; 8 - подвод воздуха поддува через отверстия; 9 - регулируемые сопла; 10 - камера поддува энергоносителя; 11 - подвод энергоносителя.

Основная часть. Известно, что скорость взвешивания U_B слоя с частицами, созданного в поле сил тяжести с ускорением $a = g$, должна быть меньше скорости уноса

$$U_y = \frac{(\rho_p - \rho) a d^2}{18\mu}, \quad (1)$$

где ρ_p , d — плотность и диаметр частиц соответственно; ρ , μ — плотность и вязкость среды. Здесь рассмотрен стоксовский режим обтекания [8].

Если ускорение g заменить большим по величине центробежным ускорением $a = v_p^2/r$, то за счет увеличения скорости взвешивания можно значительно повысить производительность аппарата. Центробежное ускорение может создаваться вращением с помощью дополнительного тангенциального поддува внутри конструкции камеры или в неподвижной камере смешения за счет предварительного вращения энергоносителя. Последний вариант

привлекает простотой и более высокой надежностью. Однако в торцевых областях камеры смешения за счет увеличенных радиальных скоростей частицы выносятся из вращающегося слоя и при этом могут возникать «зоны застоя». Чтобы препятствовать этому, торцевые крышки камер смешения спрофилировали по гиперболе или тангенциально осуществляется поддув в торцевую область дополнительным энергоносителем [4]. Вследствие большого начального диаметра этих камер приторцевые области занимают большую часть объема и поэтому оказывают существенное влияние на процесс посредством большего сопротивления вращению слоя. Малый диаметр снижает и технологические параметры процесса. С увеличением диаметра камеры смешения $D_k = 530$ мм; 620; 790 мм при $L_k = 400$ мм масса взвешенного слоя пропорционально растет. В [6] рассматривается создание взвешенного слоя в камере смешения $D_k=530$ мм с отношением длины к диаметру $L/D_k = 1,325$. Конструкция и параметры завихрителя (см. рис. 2, поз. 9) определены в результате предварительных экспериментов со взвешенным слоем в плоской вихревой камере $D_k = 100$ мм и $L = 20$ мм.

Радиус выходного отверстия вихревой камеры (см. рис. 2) в экспериментах изменялся и принимал значения $R_1 = 15$ мм; 27,5 мм; 60 мм. Подача компонентов смеси осуществлялась через разгонный патрубок 1, через три бункера с отверстиями диаметром 12,5 мм (см. рис. 4).

Расход воздуха на подачу компонентов не превышал 5—6 % от общего расхода. В экспериментах использовались частицы активированного цемента с $d < 40$ мкм, три фракции кварцевого песка: 0—71, 71—100, 100—160 мкм.

После подачи основного расхода воздуха через разгонный патрубок и завихрителя в камеру подавались вышеупомянутые компоненты, которые образовывали горизонтальный кольцевой вращающийся взвешенный слой в объеме камеры. В дальнейшем слой распространялся на всю длину камеры с увеличением концентрации частиц. В начальный момент он хорошо наблюдался через торцевые смотровые отверстия в крышке и камере смешения установки. По мере накопления компонентов смеси видимость в камере

ухудшилась, и наблюдение за слоем осуществлялось путем отбора проб радиальными трубками из трех точек на разных высотах камеры ($z/L=0,1; 0,5; 0,9$). По окончании работы резко прекращалась подача воздуха. Удерживавшаяся в камере смесь оседала в виде кольца на нижней торцевой крышке; массу его взвешивали. Масса подаваемого в камеру порошка определялась непрерывным взвешиванием транспортирующего тракта.

В процессе работы со взвешенным слоем наблюдается ряд интересных явлений. Смесь в камере смешения электризовалась и при отсутствии заземления на ее конструкции наводился значительный заряд. У разгрузки образовывались четко разделенные кольца вращающихся слоев порошка со свободной от него центральной областью. По внутренней поверхности корпуса камеры смешения наблюдался вынос частиц из периферийных слоев в центральные. Однако на расстоянии 1—2 мм от торца происходило их возвращение в периферийную область. После длительного нахождения частиц в слое они становились сферообразными, а серый порошок цемента приобретал темный оттенок.

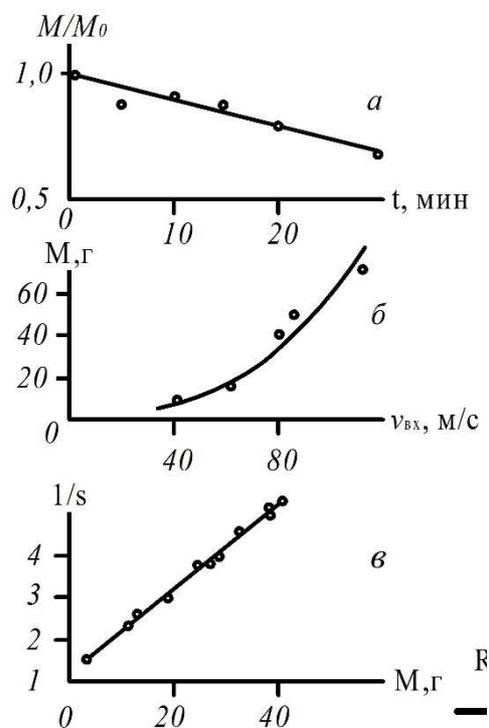


Рис. 3 результаты исследования взвешенного слоя частиц (фракции $d = 71-100 \text{ мкм}$)

в вихревой камере с $2R_1 = 55$ мм при расходе воздуха $Q = 168$ м³/ч.

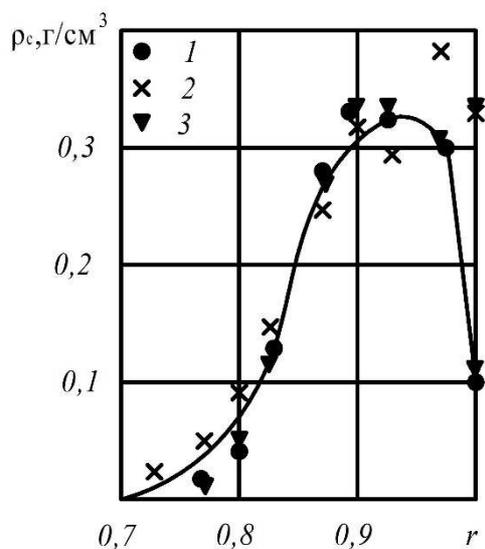


Рис. 4 Распределение плотности слоя частиц для камер с разной длиной $R_B = 60$ мм:

1 – $L = 350$ мм; 2 – $L = 400$ мм; 3 – $L = 450$ мм; $M/L = 80$ г/см.

Было установлено, что из камеры выносятся только мелкие частицы ($d < 5$ мкм) как во время подачи компонентов, так и после прекращения подачи. На рис. 3 а) показано изменение массы слоя M по отношению к начальной M_0 с течением времени, начиная с момента прекращения подачи компонентов. За 30 мин работы масса слоя уменьшилась на 29 %. Это происходит за счет мелких частиц, имевшихся в исходной смеси и образовавшихся при разрушении крупных. Следует отметить, что масса слоя из более мелкой фракции $d = 0 \div 71$ мкм за 43 мин работы уменьшалась только на 19,5 %. Последнее объясняется меньшим износом более мелких частиц.

С увеличением массы слоя скорость его вращения замедляется, и дальнейшая подача компонентов приводит к внезапному выбросу из камеры смешения до 70—90 % его массы с низким коэффициентом однородности. Если подачу компонентов прекратить, скорость вращения слоя возрастает и затем возможна дополнительная его подпитка компонента. Таким образом, выяснено, что масса слоя зависит от расхода компонентов, скорости входа

частиц в камеру смешения и равномерности распределения их по диаметру и длине камеры. В экспериментах скорость входа частиц в камеру изменялась за счёт изменения расхода воздуха на подачу компонентов. Для достижения наибольшей массы слоя необходимо, чтобы скорость входа компонентов соответствовала тангенциальной скорости слоя, а массовый расход частиц был таким, чтобы не происходило локальной перезагрузки слоя.

Исследовалось влияние расхода воздуха Q , размера частиц и радиуса выходного отверстия R_1 на массу слоя. Наибольшее влияние оказывает расход воздуха. На рис. 3 б показано, что с увеличением входной тангенциальной скорости $v_{\text{вх.}}$ масса взвешенного слоя возрастает. В исследованных диапазонах изменения расходов воздуха наблюдается рост массы слоя с увеличением $v_{\text{вх.}}$. Уменьшение диаметра частиц также приводит к такому результату. При одном и том же расходе воздуха масса слоя частиц активированного цемента ($\rho_p = 2.32 \text{ г/см}^3$) фракции $d = 0 \div 40 \text{ мкм}$ больше в 2,5 раза массы слоя частиц песка с близкой плотностью ($\rho_p = 2.59 \text{ г/см}^3$), но большими размерами ($d = 100\text{—}160 \text{ мкм}$). Увеличение массы слоя с уменьшением размера частиц происходит также для всех трех исследованных фракций песка за счет увеличения радиальной ширины слоя и уменьшения трения частиц о стенку камеры. Увеличение радиуса выходного отверстия с $R_1 = 0.344$ до $0,75$ приводит к уменьшению массы слоя в 1,5 раза. Это объясняется сокращением радиальной ширины слоя и отсевом мелких фракций компонентов смеси. В этих экспериментах наибольшая масса слоя достигала $M_0 = 146 \text{ г}$ при фракции $d = 0 \div 71 \text{ мкм}$ и параметрах: $v_{\text{вх.}} = 115 \text{ м/с}$; $\bar{R}_1 = 0.344$.

Методика исследований. Профиль тангенциальной скорости v в камере без частиц можно определить с помощью показателя n в соответствии с [5]. Однако тангенциальная скорость частиц v_p в камере со слоем значительно меньше скорости газа v в незагруженной камере смешения. Оценить

тангенциальную скорость v_p в слое по известной скорости v в соответствии с [5] можно так:

$$v_p = v \cdot \sqrt{s}, \quad (2)$$

где $s = p_k^*/p_k$ — параметр торможения потока слоем, определенный как отношение статического давления на периферии камеры при наличии слоя к тому же давлению в камере без слоя. Величина, обратная параметру s , изменяется пропорционально массе слоя

$$1/s = 0.09M + 1.25, \quad (3)$$

где M — масса слоя в граммах.

Представляется интересным распределение массы частиц по радиусу камеры. Наибольшая плотность частиц наблюдается вблизи стенки камеры. В наших экспериментах после резкого прекращения подачи воздуха слой оседал кольцом, высота его изменялась аналогично изменению ρ_c в [5]. Авторы [5, 8] отмечают, что по высоте слоя плотность в камере была однородная. Это позволяет увеличивать массу слоя за счёт диаметра камеры смешения.

Таблица 1. Результаты расчёта скоростей в камере при $M_0=146$ г и $Q=168$ м³/ч

$r, \text{мм}$	$d, \text{мкм}$	v	v_p	u_y	u_B	$a, \text{м/с}^2$	u_y/u_B
		м/с					
80	71	115	30,4	442	0,458	11500	967
27,5	5	176	46,4	15	1,32	78300	11,4

Если учесть сто скорость взвешивания слоя U_B для камеры смешения является радиальной скоростью

$$u_B = Q/2\pi rL, \quad (4)$$

то представленные соотношения (1) — (4) позволяют определить кинематические параметры слоя. Результаты расчетов представлены в табл. 1 при крайних значениях его радиуса. При расчетах принято, что самые крупные частицы, имеющиеся в слое $5 < d < 71$ мкм, располагаются у стенки камеры смешения, а самые мелкие — на радиусе выходного отверстия. Видно, что скорость частиц v_p , в 4 раза меньше скорости потока в незагруженной вихревой

камере. В [8] скорость вращения слоя частиц речного песка размером $d = (0,5 \div 4)$ мм измерялась с помощью вращающегося флажка. Она была в 15—20 раз меньше скорости невозмущенного потока.

Выводы. В результате исследований были получены следующие результаты. Во взвешенных слоях частиц разного диаметра происходит их движение по высоте слоя. При этом более тяжелые частицы могут опускаться и касаться ограждающей поверхности камеры смешения. Аналогичное явление наблюдается и во вращающемся слое. Тогда тяжелые частицы взаимодействуют со стенкой камеры смешения и снижают тангенциальную скорость. Таким образом, мы рассмотрели два случая — вращающийся слой и полностью взвешенный. В последнем наиболее тяжелые частицы с цилиндрической стенкой не соприкасаются.

Библиографический список

1. Корнеев, В.И. Сухие строительные смеси (состав, свойства): учебное пособие / В.И. Корнеев, П.В. Зозуля. – М.: РИФ «Стройматериалы», 2010. – 320 с.
2. Пат. 102533 Российская Федерация, В01F 5/00. Пневмосмеситель непрерывного действия для производства сухих строительных смесей / В.А. Уваров, Т.Н. Орехова, С.И. Гордиенко, А.Е. Качаев; заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова - №.2010140830/05, заявл. 05.10.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7.
3. Пат. 141488 Российская Федерация, В01F 5/00. Противоточный пневмосмеситель для производства дисперсно-армированных смесей / В.А. Уваров, Т.Н. Орехова, С.В. Клюев, А.Е. Качаев; заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова - №.2013159013/05, заявл. 30.12.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.
4. Пат. 115682 Российская Федерация, В01F5/00 Пневмосмеситель многокомпонентных сухих строительных смесей / Т.Н. Орехова, В.А. Уваров, 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.

5. Смутьский, И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах/ И.И. Смутьский.- Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1992-301 с.
6. 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 Journal of Applied Sciences. 2014. Т.9 №12 P.-1211-1215.
7. 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.
8. Anderson, L.A., Hasinger, S.H., Turman, B.N. Two-component vortex flow studies of the colloid core nuclear rocket // J. Spacecraft and rock.-1972.-Vol.9, №5.-h.311-317

References

1. Korneev, V.I. Dry building mixes (composition, properties): study guide / V.I. Korneev, P.V. Zozulya. - M.: RIF "Building Materials", 2010. - 320 p.
2. 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. 2010140830/05, application. 05.10.2010; publ. 03/10/2011, Bull. No. 7.
3. 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, application. 12/30/2013; publ. 06/10/2014, Bull. No. 16.

4. Pat. 115682 Russian Federation, B01F5/00 Pneumatic mixer for multicomponent dry building mixes / T.N. Orekhova, V.A. Uvarov, S.I. Gordeev, A.E. Kachaev; applicant and patent holder: BSTU im. V.G. Shukhov - No. 2011151913/05, application. 12/19/2011; publ. May 10, 2012, Bull. No. 13.
5. Smulsky, I.I. Aerodynamics and processes in vortex chambers / I.I. Smulsky. - Novosibirsk: VO "Science". Siberian publishing company, 1992-301 p.
6. 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.V.9 No. 12 P.-1211-1215.
7. 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.
8. Anderson, L.A., Hasinger, S.H., Turman, B.N. Two-component vortex flow studiess of the colloid core rocket nuclear //J. Spacecraftit and rock.- 1972.-Vol.9, No.5.-h.311-317