

DOI: 10.12737/article\_5a001abe2036c3.69884344

<sup>1</sup>Качаев А.Е., канд. техн. наук,  
<sup>2</sup>Орехова Т.Н., канд. техн. наук, доц.,  
<sup>2</sup>Гончаров Е.И., студент

<sup>1</sup>ООО «Воскресенский завод «Машиностроитель»  
ПАО «Горнопромышленная финансовая компания»,

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

## АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ\*

doctor\_cement@mail.ru

Многообразие сухих строительных смесей и особенности их получения позволяют установить основные направления совершенствования техники и технологии для их производства. Совершенствование конструкций пневмосмесителей позволяет использовать гибкие технологические приемы для производства широкой номенклатуры сухих смесей. Однако качество получаемых в промышленности смесей остается приоритетным критерием при оценке их технологических свойств.

Поддержание качества производимой продукции возможно при условии адекватного моделирования технологических процессов в пневмосмесителях. При этом важное значение также должно уделяться возможностям энерго- и ресурсосбережения при производстве сухих смесей за счет используемого оборудования и вторичного применения техногенных материалов.

Дифференцированный подход к анализу процессов в камере смешения пневмоагрегатов позволяет установить основные закономерности движения двухфазного потока, характер его крутки и влияния траекторий движения встречных воздушных и воздушно-материальных потоков на качество готовой смеси.

В конструкциях пневмосмесителей используется комплексное вихревое перемешивание компонентов в избытке воздушной фазы (эффект псевдооживления твердой фазы в воздухе), что позволяет осуществлять совмещенный принцип гомогенизации осевого двухфазного потока с вихревым, вихревого – с псевдооживляющим его потоком. Такое комплексное осе-вихревое воздействие на твердые частицы снижает величину времени, необходимого для достижения смесью нужного коэффициента однородности (неоднородности), а, следовательно, снижает суммарный расход энергоносителя на единицу готового продукта.

**Ключевые слова:** пневмосмеситель; смесительная камера; частица; осевой двухфазный поток; вихревое перемешивание; псевдооживление; аэродинамика.

**Введение.** Современное состояние отрасли производства строительных материалов указывает на рост объемов выпуска широкой номенклатуры сухих строительных смесей (ССС). Техническое обеспечение производств по выпуску СССР совершенствуется: на смену смесителям периодического действия приходят пневмосмесители с непрерывной разгрузкой готового продукта, пневмосмесители с псевдооживлением двухфазного потока и др.

Разновидности СССР подразумевают и требуют от производственных мощностей прежде всего гибкости и технологичности (возможности быстрой переналадки переделов под той или иной тип выпускаемой смеси). Во всем многообразии СССР по-прежнему важным критерием остается качество смеси и энерго-ресурсные показатели работы производства.

Основные тренды в направлении развития техники и технологии перемешивания компонентов СССР определяются из достижений в области

строительного материаловедения. Показатели качества СССР сводятся к оптимальному для той или иной смеси коэффициенту однородности (или при другом подходе – неоднородности), к низкой слеживаемости смеси при хранении и транспортировке, к дезагрегации частиц компонентов при производстве продукта и др.

Все вышеуказанные критерии и технологические свойства смесей оказывают влияние на особенности конструкции того или иного смесителя. Так, например, для легких СССР (теплоизоляционные) необходимо специальное сочетание воздушных и воздушно-материальных потоков, что приведет к должному перемешиванию легких или волокнистых материалов с тяжелыми вяжущими компонентами; для тяжелых СССР должны быть найдены свои необходимые конструктивные особенности пневмосмесителей; для особотяжелых – свои, и др. Иными словами – необходимо проводить подбор смесителя для

конкретной смеси или проектировать конструкции комбинированного типа для расширения технологических возможностей перемешивающих агрегатов.

Для легких, тяжелых, особотяжелых ССС могут активно использоваться пневмосмесители непрерывного действия. Их аэродинамические особенности, обусловленные конструктивным исполнением, позволяют в должной мере эффективно перемешивать компоненты с различной насыпной плотностью: легкий перлит с цементом, базальтовое волокно с известью и гипсом, микрокремнезем с полимерами и др.

Главными достоинствами таких агрегатов являются непрерывность производственного цикла и высокое качество продукции.

**Основная часть.** Рассмотрим аэродинамические возможности смесительных камер следующих конструкций пневмосмесителей [1–4]. Математическая модель двухфазного потока представлена в [5] на основании [6, 7] с учетом [9]. Схема дифференцирования комплексного моделирования воздушных и воздушно-материальных потоков представлена на рисунке 1. На рис. 2 приведена расчетная модель пневмосмесителя.

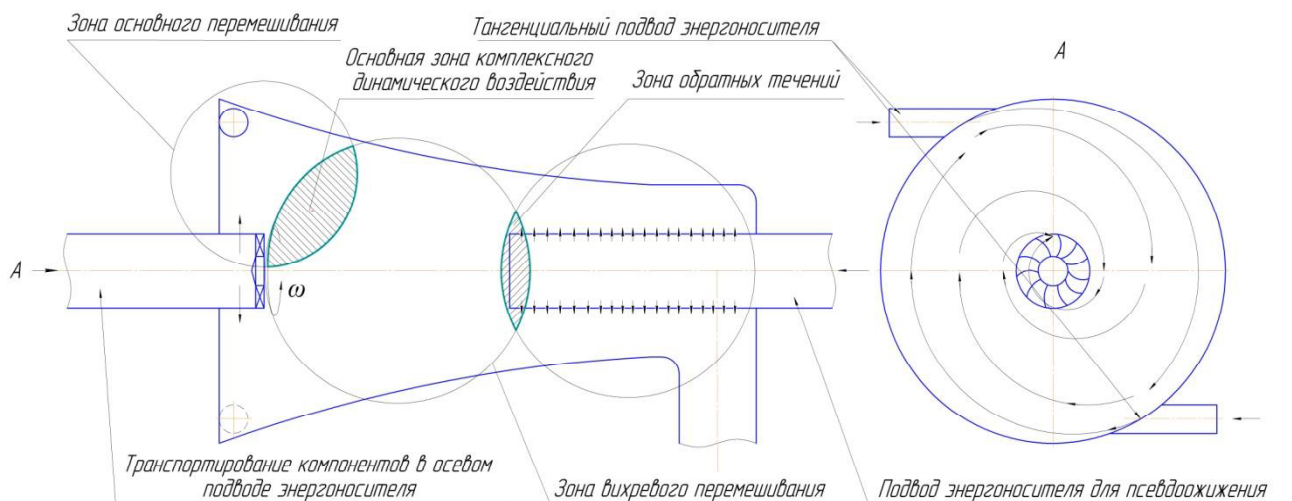


Рис. 1. Схема дифференцирования комплексного моделирования воздушных и воздушно-материальных потоков

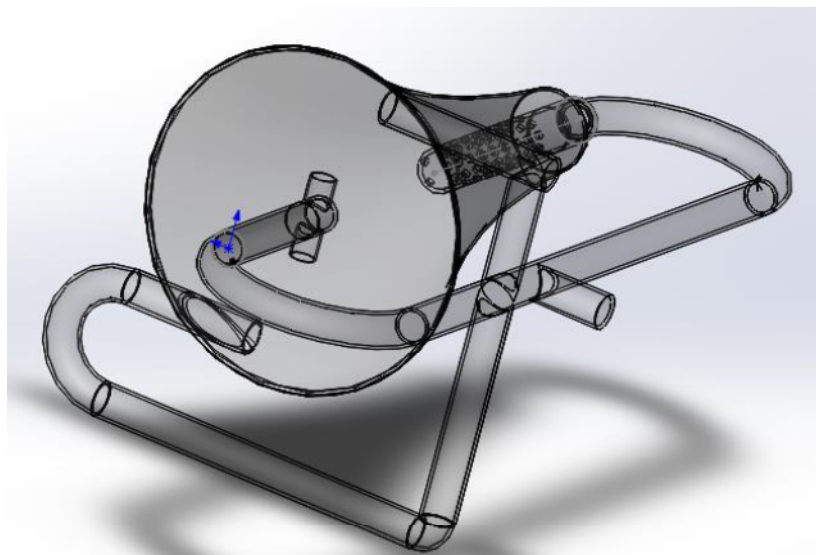


Рис. 2. Расчетная модель пневмосмесителя

Зачастую сложное математическое описание процессов перемешивания моделируется в программах, определяющих их адекватность. Аэродинамические особенности [1–4] после математического моделирования определялись с помощью пакета программ FlowSimulation SolidWorks

2016, что подтверждает результаты теоретического исследования процессов в камере перемешивания пневмосмесителей.

Аэродинамика двухфазного потока в разгонном узле пневмосмесителя может быть описана различными решениями выражений, основанных на уравнениях Навье-Стокса или Ньютона [9].

Так, например, определить скоростные параметры двухфазного потока можно численным

моделированием следующих уравнений системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ось } z: \quad \rho \frac{\partial w_z}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g + \mu \left( \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) \\ \text{ось } x: \quad \rho \frac{\partial w_x}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} - \rho g + \mu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) \\ \text{ось } y: \quad \rho \frac{\partial w_y}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial y} - \rho g + \mu \left( \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right), \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность частиц твердой фазы,  $\text{кг/м}^3$ ;  $w_z, w_x, w_y$  – составляющие абсолютной скорости частиц в потоке,  $\text{м/с}^2$ ;  $P$  – давление, создаваемое в потоке при перемещении твердой фазы, Па;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $t$  – время, с;  $x, y, z$  – декартовы координаты, принятые в расчете (геометрические параметры пневмосмесителя), м;  $\mu$  – динамическая вязкость двухфазного потока,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Характер величин, входящих в уравнение (1), определяет специфику движения частиц в объеме энергоносителя. Системный подход к дифференцированному описанию отдельных показателей уравнений (1) позволяет определить оптимальные размеры смесительной камеры.

Более подробное описание движения двухфазного потока в разгонном узле пневмосмесителя можно изучить в работе [10].

Динамика двухфазного потока в разгонном узле (рис. 3) позволяет смешать компоненты всего лишь на 10–15 % от необходимого коэффициента однородности. Следовательно, целесообразно использовать осевой турбулентный поток для преобразования его в вихревой. Так конструкция пневмосмесителя [11] располагает ротационным распределителем с конусом-рассекателем, который преобразует осевой поток в радиальный для дальнейшей его интенсификации в струях вихревого потока, полученного в результате дополнительного подвода энергоносителя с периферии смесительной камеры (рис. 1 – зона основного перемешивания). В этой зоне наблюдается следующий скоростной режим (рис. 4). Средняя скорость в разгонном узле равна 62 м/с, что достаточно для эффективного разгона смеси и мала для разрушения частиц в его цилиндрическом объеме. Средняя скорость в зоне основного перемешивания составляет 32 м/с.

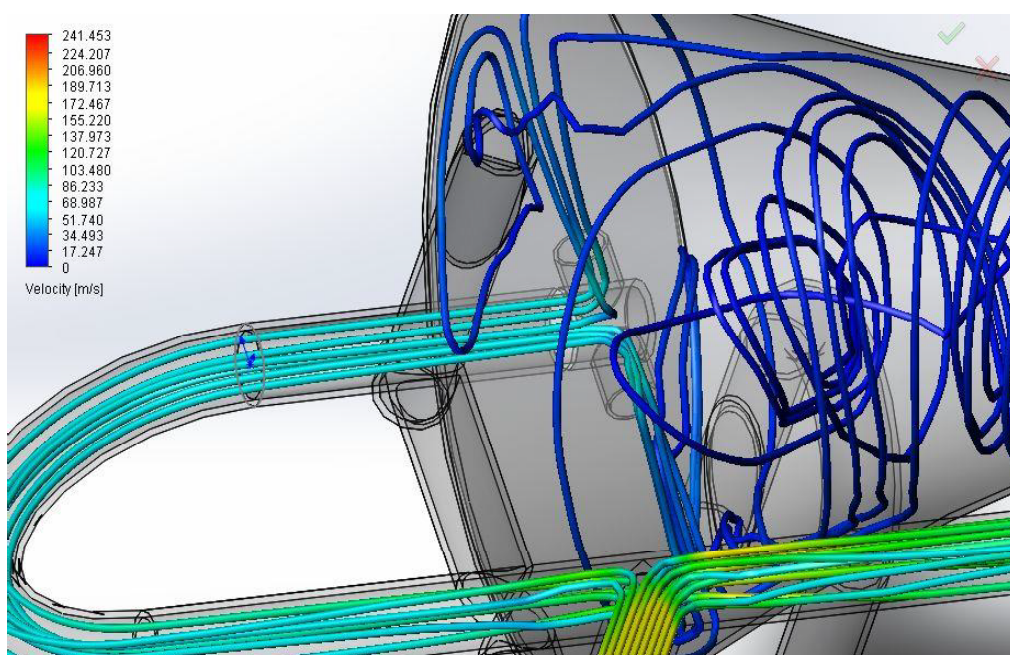


Рис. 3. Динамика двухфазного потока в разгонном узле

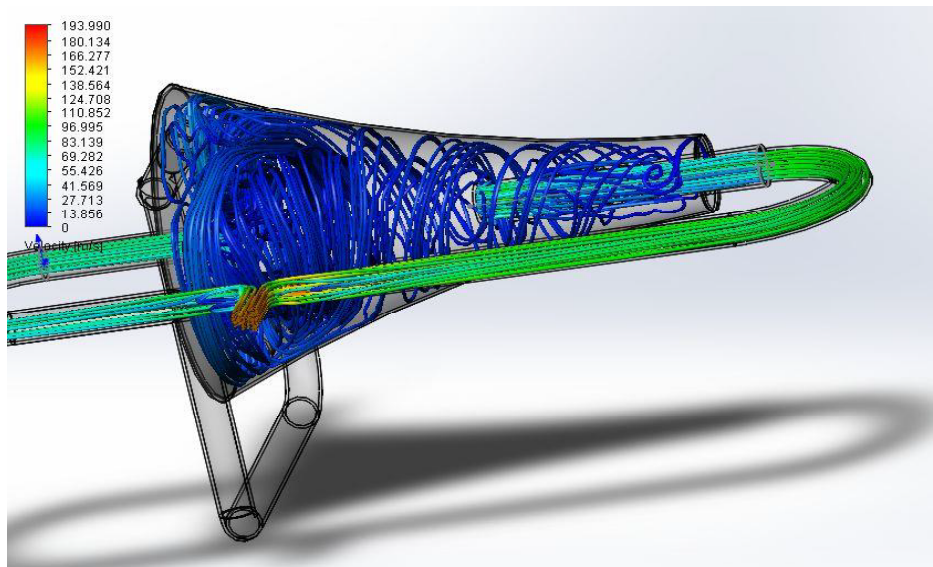


Рис. 4. Динамика движения двухфазного потока в зоне основного перемешивания

При этом поток частиц в воздушной среде из радиального трансформируется в противоточный вихревой поток (рис. 1 – зона вихревого перемешивания). Наблюдается стационарное вихревое движение частиц в потоке энергоносителя, составляющие скорости частиц при этом могут быть определены в соответствии с результатами работы [12] по уравнениям:

- радиальная:

$$\bar{v} = \frac{t[\rho_p(\bar{w}_p^2 - \bar{\lambda}\bar{v}_p\bar{r}) - p]}{\bar{r}\rho_p(1 - \bar{\lambda}t)}, \quad (2)$$

- окружная:

$$\bar{w} = \frac{\bar{w}_p t[(\bar{v}_p - \bar{\lambda}\bar{r}) - p]}{\bar{r}(1 - \bar{\lambda}t)}, \quad (3)$$

- осевая:

$$\bar{u} = \frac{t(\bar{\lambda}\bar{v}_p + \frac{p}{\rho_p z})}{(1 - \bar{\lambda}t)}, \quad (4)$$

где  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$ ,  $\bar{u}$  – осредненные значения радиальной, окружной, осевой скоростей несущей фазы в потоке при вихревом движении смеси в смесительной камере агрегата, м/с;  $\bar{\lambda}$  – безразмерная величина, равная  $\bar{\lambda} = \frac{1}{\tau}$ ;  $\tau$  – время релаксации частицы, с;  $p$  – давление в потоке, Па;  $\bar{r}$  – средний радиус смесительной камеры, м;  $\rho_p$  – плотность частиц твердой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $z$  – вертикальная координата положения частицы в вихре, м;  $\bar{v}_p$  – средняя радиальная скорость частицы в потоке энергоносителя, м/с;  $\bar{w}_p$  – средняя окружная скорость частицы в потоке энергоносителя, м/с.

Относительный объем смесительной камеры, образованный смешным существованием зон основного и вихревого перемешивания, позволяет за счет комплексного динамического воздействия энергоносителя поддерживать частицы компонентов в отдельности, тем самым равномерно распределяя частицы отдельных компонентов в этом относительном объеме (рис. 5).

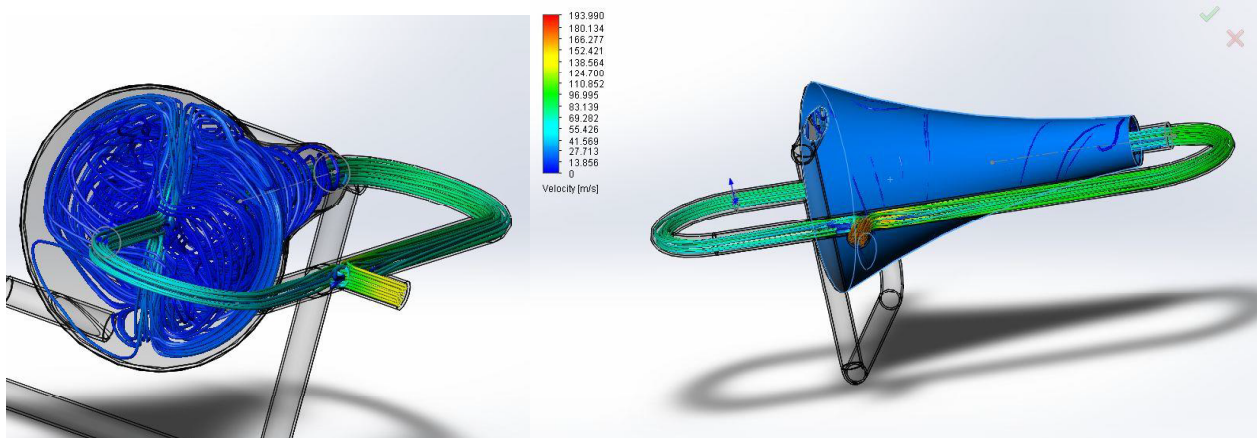


Рис. 5. Распределение двухфазного потока в объеме смесительной камеры

В виду того, что пневмосмесители имеют рядом с разгрузочным патрубком узел подвода энергоносителя для псевдооживления смеси, в смесительной камере агрегата образуются обратные течения (рис. 1 – зона обратных течений). Данное явление оказывает положительное влияние на качество смеси, так как увеличивает время

пробытия относительного ее объема в зоне вихревого перемешивания. Однако, следует отметить, что обратные течения негативно влияют на производительность агрегата, снижая в целом ее показатель на 5–8 %.

Аэродинамика узла псевдооживления представлена на рисунке 6.

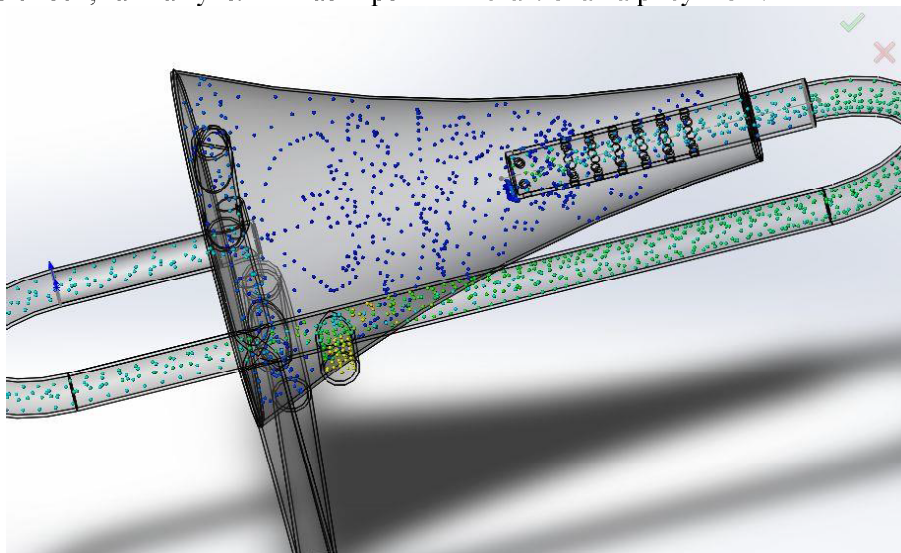


Рис. 6. Аэродинамика воздушного потока в зоне псевдооживления смеси

При определении технологических режимов работы пневмосмесителей во всех их конструкциях очень важно учитывать тот факт, что скорости движения частиц зависят от скоростей несущей фазы. Важно, чтобы внутри смесительной камеры не проходил в активной фазе процесс измельчения частиц. Для этого необходимо проводить аэродинамические расчеты и научные исследования течений в смесительных камерах агрегатов подобного типа, зачастую, прибегая к возможностям современных программных продуктов, позволяющих оценивать скоростные параметры двухфазных потоков на различных участках смесительных камер.

Условие неразрушения частиц при их гомогенизации в смесительной камере пневмосмесителей разработанных конструкций можно представить следующим образом:

$$\sigma_{\text{дин}} < 0,7[\sigma]_p, \quad (5)$$

где  $\sigma_{\text{дин}}$  – напряжения в частицах при движении и их взаимном столкновении в потоке энергоносителя, Па;  $[\sigma]_p$  – напряжения в частицах, необходимые для их разрушения, Па. Коэффициент 0,7 использован в виду того, что при больших его значениях в соответствии с теорией Гриффитса в частицах начинают образовываться трещины, предвещающие дальнейшее разрушение частиц при меньших значениях величины  $[\sigma]_p$ .

**Выводы.** С помощью математического и компьютерного моделирования аэродинамических особенностей смесительных камер пневмосмесителей установлены оптимальные скоростные режимы движения двухфазных потоков в них; определены зоны, влияющие на качество и характер движения частиц различных компонентов в избытке энергоносителя; установлен критерий, по которому можно подобрать режим движения смеси в смесительной камере из условия неразрушения отдельных частиц ее компонентов. Установлен оптимальный скоростной режим движения двухфазного потока в каждой зоне смесительной камеры.

*\*Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Uvarov V.A., Klyuev S.V., Orekhova T.N., Klyuev A.V., Sheremet E.O., Durachenko A.V. The counterflow mixer for receiving the disperse reinforced composites // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Т.9. №12. С.1211–1215.
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. Ключев, 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. Корнеев В.И., Зозуля П.В.. Сухие строительные смеси (состав, свойства). М.: РИФ «Стройматериалы», 2010. С. 320 .

6. Лоскутнев Ю.А., Максимов В.М., Веселовский В.В. Механическое оборудование предприятий по производству вяжущих строительных материалов. М.: Машиностроение, 1986. 378 с.

7. Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Севостьянов В.С. Расчёт поля скоростей двухфазного потока в дезинтеграторе // Энергосберегающие техноло-

гические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. ст./под ред. В.С. Богданова. Белгород, 2012. С. 202–205.

8. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. Ч.1. Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла. Учебник для ВТУЗов. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1976. 384 с.

9. Смутьский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск: Наука. 1992. С. 301 .

10. Уваров В.А., Орехова Т.Н. Теория и расчет пневмосмесителей непрерывного действия. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 114 с.

11. Пат. 169754 Российская Федерация, В01F 5/00. Противоточный пневмосмеситель для производства дисперсно-армированных смесей / В.А. Уваров, Т.Н. Орехова, Е.А. Шкарпеткин, С.В. Ключев, А.В. Дураченко; заявитель и патентообладатель: БГТУ им. В.Г. Шухова - №. 2016131844./05, заявл. 02.08.2016; опубл. 31.03.2017, Бюл. № 10.

12. Качаев А.Е., Орехова Т.Н. Описание вихревого движения двухфазного потока в пневмосмесителе непрерывного действия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №5. С. 121–125.

#### Информация об авторах

**Качаев Александр Евгеньевич**, кандидат технических наук.

E-mail: doctor\_cement@mail.ru

ООО Воскресенский завод «Машиностроитель».

Россия, 140200, Воскресенск, ул. Гаражная, д. 1.

**Орехова Татьяна Николаевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры подъёмно-транспортных и дорожных машин.

E-mail: nefact@mail.ru

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

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Гончаров Егор Игоревич**, студент.

E-mail: ego3654@yandex.ru

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

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

*Поступила в октябре 2017 г.*

© Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Гончаров Е.И., 2017

**Orekhova T.N., Kachaev A.E., Goncharov E.I.**

#### **AERODYNAMIC FEATURES OF PNEUMO MIXERS FOR MANUFACTURING DRY CONSTRUCTION MIXTURES**

*The variety of dry construction mixtures and the features of their production allow us to establish the main directions for improving technology and technology for their production. Improving the design of the pneumatic mixer allows the use of flexible technological methods for the production of a wide range of dry mixes. However, the quality of mixtures obtained in the industry remains a priority criterion in evaluating their technological properties.*

*Maintaining the quality of the products produced is possible provided that the technological processes in the pneumatic mixer are adequately modeled. At the same time, great importance should also be given to the*

*possibilities of energy and resource saving in the production of dry mixtures due to the equipment used and the secondary use of man-made materials.*

*A differentiated approach to the analysis of processes in the mixing chamber of pneumatic units allows us to establish the basic laws governing the motion of a two-phase flow, the nature of its twist and the influence of the trajectories of the oncoming air and air-material flows on the quality of the finished mixture.*

*In the designs of air mixers, complex vortex mixing of components in excess of the air phase (the effect of fluidization of the solid phase in air) is used, which allows the combined principle of homogenization of the axial two-phase flow with a vortex flow, and the vortex flow with a fluidizing flow. Such a complex axial-vortex action on solid particles reduces the time required to achieve the desired homogeneity coefficient (heterogeneity) by the mixture, and, consequently, reduces the total energy consumption per unit of finished product.*

**Keywords:** *a pneumatic mixer; mixing chamber; particle; axial two-phase flow; vortex mixing; fluidization; aerodynamics.*

---

*Information about the authors*

**Kachaev Alexander Evgenievich**, PhD.

E-mail: doctor\_cement@mail.ru.

LLC Voskresenskiy factory «Mashinostroitel».

Russia, 140200, Voskresensk, st. Garazhnaya, 1.

**Orekhova Tatyana Nikolaevna**, Ph.D., Assistant professor.

E-mail: nefact@mail.ru

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

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Goncharov Egor Igorevich**, Bachelor student.

E-mail: ego3654@yandex.ru

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

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received in October 2017*

© Orekhova T.N., Kachaev A.E., Goncharov E.I., 2017