

DOI: 10.12737/article\_590878fb7932c3.02818288

Качаев А.Е., канд. техн. наук  
ООО «Воскресенский завод «Машиностроитель»  
ПАО «Горнопромышленная финансовая компания»  
Орехова Т.Н., канд. техн. наук  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ОПИСАНИЕ ВИХРЕВОГО ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

doctor\_cement@mail.ru

Совершенствование технологий производства сухих строительных смесей связано не только с улучшениями их составов, но и с использованием высокотехнологичного эффективного оборудования, которое обеспечивало бы необходимое качество готового продукта. Применение современных пневмосмесителей простой конструкции позволяет получать смеси необходимого качества за счет использования внутри камеры гомогенизации не только осевого двухфазного потока, но и интенсифицирующего его движение вихревого подвода воздуха.

Анализ сложного движения частиц в потоке воздуха, создаваемом в камере гомогенизации, позволяет сделать вывод о необходимых режимах работы пневмосмесителя относительно конкретного состава сухой смеси. Существующие конструкции пневмосмесителей мало изучены и практически не используются при массовом производстве, так как сдерживающим фактором из применения по-прежнему остается повышенный расход энергоносителя. Если в конструкции пневмосмесителя применить совмещенный принцип гомогенизации осевого двухфазного потока с вихревым, то в виду снижения временного промежутка на его перемешивание, можно сделать вывод о том, что суммарный расход энергоносителя на единицу готового продукта снижается, а однородность, следовательно, и качество смеси повышается.

**Ключевые слова:** пневмосмеситель; камера гомогенизации; частица; двухфазный поток; осевая, радиальная и окружная скорости.

**Введение.** На современном этапе развития технологий сухих строительных смесей в нашей стране важную роль при их производстве играет возможность использования эффективных технологических агрегатов. Специфика производства сухих смесей предусматривает гибкость технологических операций в виду обеспечения их широкой номенклатуры, а также качество выпускаемой продукции в сравнении с существующим многообразием аналогов.

Достижения в области строительного материаловедения, касающиеся составов сухих строительных смесей, обуславливают основные направления совершенствования техники и технологии гомогенизации их дисперсных компонентов. При этом, однородность продукта является основной характеристикой требуемого качества современных строительных смесей [1].

В зависимости от типа строительных смесей, например, таких как легкие (теплоизоляционные), тяжелые (отделочные штукатурки), особо тяжелые (смеси для заливки стяжек полов) и др., необходимо осуществлять подбор смесительного оборудования, которое бы удовлетворяло той или иной технологии производства. Так, например, для легких теплоизоляционных смесей целесообразно использовать пневмосмесители [2, 3, 4] непрерывного действия. Глав-

ными достоинствами пневмосмесителей разработанной конструкции можно назвать получение гомогенного продукта с высокой степенью однородности, а также возможность производства смесей в непрерывном цикле.

Совершенствование конструкции пневмосмесителей направлено на возможность получения гомогенных дисперсных систем, при этом не мало важную роль играют и вопросы ресурсо- и энергосбережения в условиях предприятий, которые используют в своей технологической цепочке оборудование подобного типа.

В конструкциях пневмосмесителей [2, 3] основное перемешивание дисперсных компонентов смеси происходит за счет движущегося в камере гомогенизации осевого двухфазного потока, который под действием подведенного с периферии камеры воздуха начинает закручиваться в вихрь (рис. 1). Теоретические исследования движения вихревого потока двухфазной среды в пневмосмесителе позволяют адекватно оценить характер процесса гомогенизации, определить конструктивные параметры агрегата и его эффективные режимы работы на примерах различных составов строительных смесей [5]. Именно поэтому такие исследования являются весьма актуальными и показательными.

**Основная часть.** Рассмотрим математическую модель вихревого потока двухфазной среды «воздух-частица» с камере гомогенизации пневмосмесителя [3], разработанной конструкции.

При попадании компонентов смеси из разгонного узла в камеру гомогенизации происходит торможение двухфазного потока (рис. 1). Именно здесь особо крупные частицы (250 мкм и более) могут выпасть из потока и осесть в так называемых «застойных» зонах пневмосмесителей горизонтального исполнения [2]. Для ликвидации «застойных» зон [2] камеры гомогенизации в конструкции пневмосмесителя предусмотрен периферийный тангенциальный поддув воздуха, который начинает влекать в вихревой поток частицы, попавшие в камеру после разгонного узла. Безусловно, определенный процесс смешения происходит уже на стадии транспортирования смеси в разгонном узле, однако, вихревое перемешивание представляет собой основной процесс более эффективного перемешивания, а его математическое описание более актуальную задачу.

Во вращающемся воздушном потоке на частицу измельчаемого материала действуют силы тяжести  $F_g$ ; аэродинамического сопротивления среды (воздуха)  $F_a$ ; сила, обусловленная изменением давления среды по поверхности частицы  $F_p$ ; бокового несимметричного обтекания вращающейся частицы  $F_\omega$ .

Сила аэродинамического сопротивления вихря воздушной среды движению частицы в камере гомогенизации может быть определена из условий автомоделной области  $10^3 < Re < 3 \cdot 10^5$  по квадратичному закону [8–10]:

$$F_a = -\frac{\pi \cdot \rho \cdot d_p}{20} \cdot v_r'^2 \cdot \frac{\vec{v}_r'}{|\vec{v}_r'|}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность несущей фазы (воздуха),  $кг/м^3$ ;  $d_p$  – эффективный аэродинамический диаметр частицы,  $м$ ;  $\vec{v}_r'$  – относительная скорость частицы,  $м/с$ ,  $\vec{v}_r' = \vec{v} - \vec{v}_p$ ;  $\vec{v}$  – вектор скорости потока несущей фазы (воздуха),  $м/с$ ;  $\vec{v}_p$  – вектор скорости частицы в потоке несущей фазы,  $м/с$ ;  $Re$  – критерий Рейнольдса, определяем по формуле:

$$Re = \frac{(v - v_p)}{\nu}, \quad (2)$$

здесь  $\nu$  – кинематическая вязкость двухфазного потока,  $м^2/с$ .

Эффективный аэродинамический диаметр частицы, объем которой равен объему рассматриваемой сферической частицы  $V_p$ , рассчитывается по формуле [7]:

$$d_p = \sqrt[3]{\frac{6V_p}{\pi}}. \quad (3)$$

В общем случае определить силу аэродинамического сопротивления частицы неправильной формы невозможно, так как она зависит не только от ее геометрии, свойств поверхности, величины скорости, но и от ориентации частицы по отношению к вектору скорости. Поэтому, основываясь на результатах разных авторов [1, 6], расчет будем производить для сферической частицы перемешиваемых материалов.

Сила  $F_p$ , обусловленная изменением давления несущей фазы (воздуха) по поверхности частицы, при малых размерах частицы определяется изменением градиента давления по объему частицы и с учетом теоремы «о среднем значении» запишется в виде [8]:

$$F_p = -V_p \cdot grad p, \quad (4)$$

где  $grad p$  – градиент давления среды, взятый в точке, совпадающей с центром объема частицы.

В процессе движения частицы в пространстве камеры гомогенизации, помимо вышеуказанных сил, на частицы в вихре действует сила  $F_\omega$ , вызванная несимметричностью обтекания вращающейся частицы. С учетом формулы Жуковского получаем [7]:

$$F_\omega = -2\rho_p V_p v_{r\omega} \omega_p, \quad (5)$$

где  $v_{r\omega}$  – перпендикулярная  $\omega$  проекция относительной скорости частицы  $v_r$ ;  $\rho_p$  – плотность отдельных частиц смешиваемых компонентов,  $кг/м^3$ ;  $\omega_p$  – угловая скорость вращения частицы,  $рад/с^{-1}$ .

В реальном вихревом потоке с реальными частицами их взаимодействие определяется многими факторами: микроструктурой течения вокруг частицы, собственным ее движением, свойствами поверхности, физическими свойствами потока и частицы, взаимодействием частиц, изменением потока частицами и др. Поэтому в математическом описании вихревого движения частицы неправильной формы в камере гомогенизации пневмосмесителя необходимо учитывать только те силы, которые следуют из ясных физических представлений, когда другие силы не действуют.

Уравнение равновесия сил (1), (4–5), действующих на частицу в вихревом потоке камеры гомогенизации, представим в виде [8–10]:

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{(U - U_p)}{\tau} - grad p + g + 2U \frac{dU_p}{dr_1}, \quad (6)$$

где  $U, U_p$  – абсолютная скорость несущей фазы и частицы в вихревом потоке, соответственно,  $м/с$ ,  $r_1$  – начальный радиус камеры гомогенизации,  $м$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $м/с^2$ ;

$p$  – давление несущей среды (воздуха) на частицу материала,  $Pa$ , с учетом геометрических параметров камеры гомогенизации рассчитываем по формуле:

$$p = p_{p,y} + \frac{\rho U}{2} \left[ 1 + \left( \frac{L_1 \cdot l_1}{2\pi r_1^2} + \dots + \frac{L_k \cdot l_k}{2\pi r_k^2} \right) \right], \quad (7)$$

здесь  $p_{p,y}$  – давление, создаваемое в разгонном узле пневмосмесителя,  $Pa$ ;  $L_1$  – начальная длина камеры гомогенизации,  $L_1 = 0$ ,  $m$ ;  $L_k$  – конечное значение длины камеры гомогенизации,  $m$ ;  $l_1$  и  $l_k$  – начальная и конечная длины за-

крутки вихря,  $m$ ;  $r_1$  – начальный радиус камеры гомогенизации, убывающий до  $r_k$ ,  $m$ .

Абсолютная скорость несущей фазы и частицы определяется из выражения [7]:

$$U(U_p) = \sqrt{[v(v_p)]^2 + [w(w_p)]^2 + [u(u_p)]^2}, \quad (8)$$

На основании вышесказанного рассмотрим пространственную вихревую модель движения двухфазного потока (воздух, частица материала) в камере гомогенизации пневмосмесителя (рис. 1).

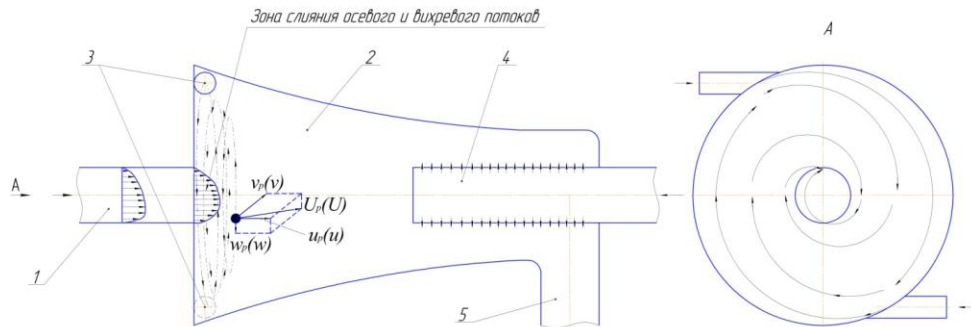


Рис. 1. Схема вихревого движения двухфазного потока в камере гомогенизации:

1 – транспортирование компонентов смеси по разгонному узлу; 2 – камера гомогенизации; 3 – тангенциальный поддув воздуха; 4 – узел аэрации и дезагрегации смеси; 5 – разгрузочный патрубок

При определении поля скоростей движения частицы силой, учитывающей её вращение, пренебрежем из-за малости её величины.

Предположим, что радиальная, тангенциальная и осевая скорости движения воздуха и частицы измельчаемого материала определяются расстоянием от оси вращения и временными интервалами без соударений со стенками камеры гомогенизации и иными интенсифицирующими устройствами, которые могут быть расположены в ней, как, например, в [3,4].

Теоретически движение частицы в вихревом потоке центробежного поля камеры гомогенизации можно представить системой уравнений:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(v-v_p)}{\tau} - \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial p}{\partial r_1} + \frac{w_p^2}{r_1}, \quad (9)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{(w-w_p)}{\tau} + \frac{v_p \cdot w_p}{r_1}, \quad (9)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{(u-u_p)}{\tau} - \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial p}{\partial z} + g, \quad (9)$$

где  $v_p, w_p, u_p$  – радиальная, окружная и осевая скорости движения частицы в вихревом потоке камеры гомогенизации,  $m/c$ ;  $v, w, u$  – то же для несущей фазы (воздуха),  $m/c$ ;  $z$  – вертикальная координата положения частицы в вихре,  $m$ .

Для осреднения скоростей движения частиц и несущей фазы используем систему безразмерных величин ( $\bar{\lambda} = \frac{1}{\tau}$ ):

$$\frac{d\bar{v}}{d\bar{t}} = \bar{\lambda}(\bar{v} - \bar{v}_p) - \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial p}{\partial r_1} + \frac{\bar{w}_p^2}{\bar{r}}, \quad (10)$$

$$\frac{d\bar{w}}{d\bar{t}} = \bar{\lambda}(\bar{w} - \bar{w}_p) + \frac{\bar{v}_p \cdot \bar{w}_p}{\bar{r}}, \quad (10)$$

$$\frac{d\bar{u}}{d\bar{t}} = \bar{\lambda}(\bar{u} - \bar{u}_p) - \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial p}{\partial z} + Fr, \quad (10)$$

$$\frac{d\bar{r}}{d\bar{t}} = \bar{v}_p, \quad \bar{w}_p = \frac{\bar{r} d\varphi}{dt}, \quad \bar{u}_p = \frac{dz}{dt}. \quad (10)$$

Начальные условия для решения системы (9):

$$\{t = 0; r = 1; \varphi = 0; z = 0; v_p = 1; w_p = 1; u_p = 0\}.$$

Составляющие поля скоростей несущей фазы (воздуха) в вихревом потоке будут определяться по формулам:

- радиальная:

$$\bar{v} = \frac{t[\rho_p(\bar{w}_p^2 - \bar{\lambda}\bar{v}_p\bar{r}) - p]}{\bar{r}\rho_p(1 - \bar{\lambda}t)}, \quad (11)$$

- окружная:

$$\bar{w} = \frac{\bar{w}_p t [(\bar{v}_p - \bar{\lambda}\bar{r}) - p]}{\bar{r}(1 - \bar{\lambda}t)}, \quad (12)$$

- осевая:

$$\bar{u} = \frac{t(\bar{\lambda}\bar{v}_p + \frac{p}{\rho_p z})}{(1 - \bar{\lambda}t)}. \quad (13)$$

Согласно выражениям (10 – 12) также могут вычисляться значения скоростей частиц в пото-

ке вихря при использовании заданных характеристик несущей фазы.

**Выводы.** Анализ полученных выражений позволяет сделать вывод о том, что окружная и радиальная скорости частиц материала в вихревом потоке при перемещении от периферии к центру (разгрузке) камеры гомогенизации, имеют максимальные значения: при  $r = 0,3 - 0,15$  м соответствующие скорости движения частиц материала находятся в диапазоне от 90 до 113 м/с. Очевидно, что использование уравнений для оценки относительных скоростей движения частицы в ламинарном потоке, нежели в вихревом потоке, которые традиционно используются в расчетах, приводит к существенным погрешностям.

### 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 P. 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. 320 с.
6. Лоскутьев 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., В.С. Севостьянов. Расчёт поля скоростей двухфазного потока в дезинтеграторе // Энергосберегающие технологические 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., ил.
9. Орехова Т.Н. Определение производительности сухих строительных смесей с учётом анализа устройств смесительных агрегатов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. №3. С. 65–68.
10. Романович А.А., Орехова Т.Н., Мещеряков С.А., Прокопенко В.С. Технология получения минеральных добавок // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 5. С. 188–192.

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

### DESCRIPTION OF THE VORTEX MOTION OF F TWO-PHASE FLOW IN A CONTINUOUS MIXER

*The improvement of technologies for the production of dry construction mixtures is associated not only with improvements in their composition, but also with the use of high-tech efficient equipment that would ensure the required quality of the finished product. The use of modern pneumatic mixers of simple design makes it possible to obtain mixtures of the required quality by using not only an axial two-phase flow inside the chamber, but also an intensifying movement of the vortex air supply.*

*Analysis of the complex motion of particles in the air flow created in the homogenization chamber allows us to conclude that the operating modes of the air mixer are necessary with respect to the specific composition of the dry mix. The existing designs of pneumatic mixers have been little studied and are practically not used in mass production, since a high energy consumption still remains a deterrent to the application. If the combined principle of homogenization of an axial two-phase flow with a vortex flow is used in the design of a pneumatic mixer, then in view of reducing the time interval for its mixing, it can be concluded that the total energy consumption per unit of finished product decreases, and the uniformity, and consequently the quality of the mixture, also increases.*

**Key words:** pneumatic mixer; homogenization chamber; particle; two-phase flow; axial, radial and circumferential speeds.

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

ООО «Воскресенский завод «Машиностроитель» ПАО «Горнопромышленная финансовая компания».

Адрес: Россия, 140200, Московская область, г. Воскресенск, ул. Гаражная, 1.

E-mail: doctor\_cement@mail.ru

**Орехова Татьяна Николаевна**, кандидат технических наук.

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

Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.