

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-115-124

<sup>1,\*</sup>Качаев А.Е., <sup>2</sup>Орехова Т.Н., <sup>2</sup>Уральский А.В.<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт орошения и сельхозводоснабжения «Радуга»<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

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

## ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

**Аннотация.** В настоящем исследовании смоделировано движение двухфазного потока с различными по форме частицами численными методами в программе SolidWorks Simulation. В результате исследования определены параметры усредненных скоростей двухфазного потока в смесительной камере: использовался дифференцированный подход нахождения одиночной частицы в потоке несущей среды. Подтверждена идентичность уравнений математической модели вихревого движения двухфазного потока внутри смесительной камеры пневмосмесителя с траекториями и скоростями двухфазного потока, смоделированного в программе SolidWorks Simulation. Представлены результаты численного моделирования усредненных скоростей двухфазного потока в смесительной камере: для частицы и несущей среды. Проведена верификация математической модели вихревого движения двухфазного потока с результатами численного моделирования двухфазного потока в пневмосмесителе с помощью расчетного комплекса SolidWorks Simulation. Установлено, что расхождение между численными методами моделирования и математическими (аналитическими) не превышает для несущей среды – 8,55 %, а для частиц различной формы – 5,70 %. Полученные результаты исследования могут быть использованы в качестве основного подхода в верификации технологических процессов в оборудовании, которые могут быть рассчитаны как аналитическими (математическими), так и численными методами.

**Ключевые слова:** пневмосмеситель, частица, несущая среда, смешение, двухфазный поток, смесительная камера, верификация.

**Введение.** В современных условиях развития строительного материаловедения возникают вопросы разработки эффективного технологического оборудования [1]. В промышленности строительных материалов существуют различные переделы, на которых используются дробилки и мельницы, смесители и гомогенизаторы, транспортирующее оборудование и пылеуловители. Гибкие технологические комплексы, включающие в себя различное оборудование (перечисленное выше), являются объектом эффективной конкуренции в строительной отрасли [2].

Конкурентоспособность отечественного оборудования для производства смесей различного назначения повышается в виду работы, проводимой в рамках импортозамещения. Совершенствуются технологии перемешивания дисперсных компонентов [3]: разрабатываются новые составы сухих строительных смесей, исследуются свойства дисперсно-армирующих составов на прочность элементов строительных конструкций и др. В развитии технологии смешения полидисперсных компонентов при моделировании процессов в оборудовании используются современные информационные технологии [4].

Численное моделирование технологических процессов в аппаратах с высокой динамикой не-

сущей среды (воздуха) позволяет не только верифицировать математическую модель описания движения частиц в таком потоке внутри замкнутого пространства, но и наглядно увидеть возможные технологические особенности таких аппаратов. Актуальность исследований в вопросах численного моделирования технологического оборудования и процессов, протекающих в них, для строительной отрасли обосновывается эффективностью работы такого оборудования, его экономической эффективностью (низкими энергозатратами на единицу производительности) и конкурентоспособностью. Поэтому численный расчет основного технологического оборудования – смесителя – для различных типов смесей является необходимым с точки зрения выяснения всех вопросов, связанных с его эффективной эксплуатацией и экономической целесообразностью применения [5].

**Целью** настоящего исследования является верификация численного расчета осредненных скоростных параметров двухфазного потока (определение скоростей несущей среды и частиц) для пневмосмесителя непрерывного действия с разработанными ранее математическими моделями.

**Методы и объект исследования.** Исследование пневмосмесителя [6] проводилось с помощью численного моделирования динамики двухфазного потока, которое позволяет определить основные кинематические параметры несущей среды и твердой фазы (частиц) в смесительной камере агрегата. Выбранный метод исследования в дальнейшем поможет верифицировать математическую модель вихревого движения двухфазного потока в геометрическом объеме пневмосмесителя, описанную в работе [7].

С помощью пакета программ SolidWorks Simulation моделировались скоростные условия работы [8] пневмосмесителя: дифференцированный подход к определению параметров скорости несущей среды проводился для различных участков пневмосмесителя (вход смесительной камеры рассматривается как место падения скорости двухфазного потока, выход из смесительной камеры – как место разгрузки готовой смеси), после чего результаты объединялись и накладывались друг на друга. При таком подходе можно численно определить скоростные параметры движения воздуха с твердыми частицами поли-

дисперсных и волокнистых компонентов в любом геометрическом пространстве пневмосмесителя рассматриваемой конструкции.

Объектом исследования является пневмосмеситель [6], устройство которого показано на рис. 1. Предназначен пневмосмеситель для интенсивного перемешивания дисперсно-армированных смесей с различным размером частиц исходных компонентов (например, анизотропных материалов – армирующих волокон, изотропных материалов – вяжущих и технологических добавок). Конструкция пневмосмесителя спроектирована таким образом, чтобы в объеме смесительной камеры агрегата не было застойных зон, где мог бы накапливаться плохо перемешанный продукт. Криволинейная смесительная камера позволяет по всей своей длине изменять скорость двухфазного потока, что необходимо в момент интенсивного перемешивания материала в начале камеры до момента эффективной выгрузки готового продукта из нее. Для исследуемого агрегата представим расчетную схему, относительно которой разрабатывалась математическая модель с учетом ранее выполненных исследований в работах [7, 9].

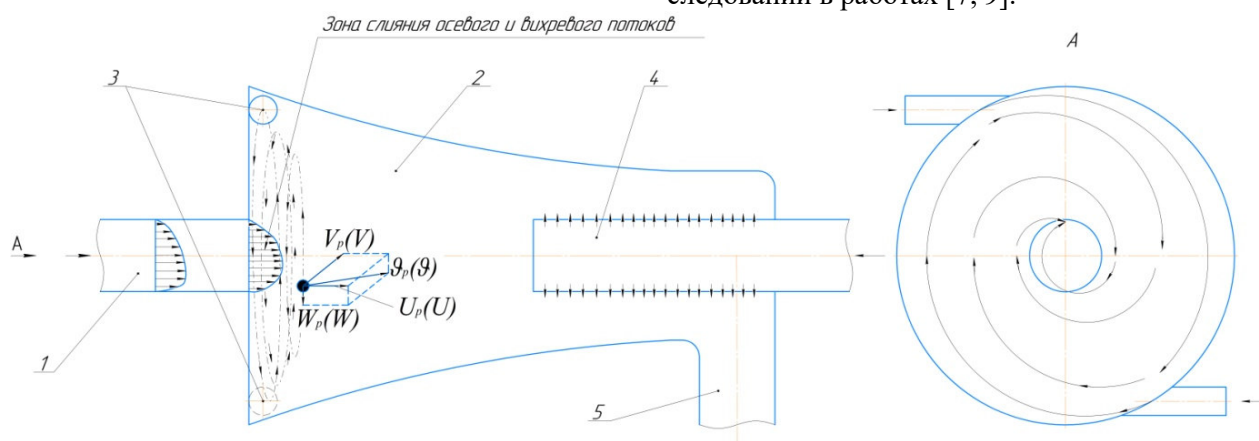


Рис. 1 Расчетная схема для математического моделирования динамики двухфазного потока внутри смесительной камеры пневмосмесителя:

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

Отработка результатов численного моделирования процесса смешения различных компонентов с армирующими волокнами и натурных исследований проводилась на опытно-экспериментальном образце пневмосмесителя, показанном на рис. 2. В соответствии с целью настоящего исследования необходимо численно определить параметры скоростных характеристик двухфазного потока в рабочем объеме пневмосмесителя и верифицировать их относительно математических моделей динамики двухфазного потока, изложенных в работах [7, 9].

Верификация результатов математических моделей технологических процессов необходима для выявления возможных факторов, которые не были учтены при их разработке [10–11]

При математическом моделировании смешения и динамики двухфазного потока внутри смесительной камеры агрегата используются уравнения газовой динамики с дисперсными частицами [12–14]. Такое моделирование процессов в оборудовании позволяет рассматривать поведение отдельно взятой частицы в несущей среде с учетом геометрии смесительной камеры.



Рис. 2. Экспериментальная установка пневмосмесителя

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

$$g(g_p) = \sqrt{[V(V_p)]^2 + [W(W_p)]^2 + [U(U_p)]^2}, \quad (1)$$

где  $V_p$ ,  $W_p$ ,  $U_p$  – радиальная, тангенциальная и осевая скорости частицы в смесительной камере пневмосмесителя, м/с;  $V$ ,  $W$ ,  $U$  – радиальная, тангенциальная и осевая скорости несущей среды (воздуха), м/с.

В исследовании рассматривается пространственная вихревая модель динамики воздуха с твердыми частицами в объеме смесительной камеры агрегата. В настоящих расчетах скоростей частиц пренебрегаем величиной силы, учитывающей ее вращение на различных участках тракта двухфазного потока, ввиду её незначительного влияния [15].

В настоящем исследовании, как и в работах [7, 9], радиальную, тангенциальную и осевую скорости движения воздуха и частицы перемещаемых материалов определяем расстоянием от оси их горизонтального вращения и временными интервалами без соударений со стенками смесительной камеры. Математически динамику частицы произвольной формы в вихревом потоке центробежного поля смесительной камеры пневмосмесителя запишем в виде следующей системы уравнений [7]:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{(V - V_p)}{\tau} - \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial p}{\partial R} + \frac{W_p^2}{R}, \\ \frac{dW}{dt} = \frac{(W - W_p)}{\tau} + \frac{V_p \cdot W_p}{R}, \\ \frac{dU}{dt} = \frac{(U - U_p)}{\tau} - \frac{1}{\rho_p} \frac{\partial p}{\partial z} + g, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\rho_p$  – плотность отдельных частиц смешиваемых компонентов, кг/м<sup>3</sup>;  $R$  – начальный радиус

смесительной камеры, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $p$  – давление несущей среды (воздуха) на частицу материала в двухфазном потоке, Па;  $z$  – вертикальная координата положения частицы в двухфазном потоке, м.

Начальные условия для решения системы (2):

$$\{t = 0; \quad R = 1; \quad z = 0; \quad V_p = 0; \quad W_p = 0; \quad U_p = 0. \quad (3)$$

Радиальная, тангенциальная и осевая составляющие абсолютной скорости несущей среды (воздуха) в вихревом потоке рассчитывались по выражениям средних показателей, соответственно [7]:

$$\bar{V} = \frac{t \left[ \rho_p \left( \bar{W}_p^2 - \bar{\lambda} \bar{V}_p \bar{R} \right) - p \right]}{\bar{R} \cdot \rho_p (1 - \bar{\lambda} t)}, \quad (4)$$

$$\bar{W} = \frac{\bar{W}_p \cdot t \cdot \left[ \left( \bar{V}_p - \bar{\lambda} \bar{R} \right) \right]}{\bar{R} (1 - \bar{\lambda} t)}, \quad (5)$$

$$\bar{U} = \frac{t \left( \bar{\lambda} \bar{V}_p + \frac{p}{\rho_p \cdot z} \right)}{(1 - \bar{\lambda} t)}, \quad (6)$$

где  $\bar{\lambda}$  – безразмерная величина ( $\bar{\lambda} = \frac{1}{\tau}$ ) для осреднения показателей скоростей в выражениях (4 – 6) на основании результатов работы [11].

Вычисление величин составляющих скоростей несущей среды производится также, как и в математической модели [7] по выражениям (4–6) с учетом только заданных характеристик воздуха (плотности воздуха).

**Основная часть.** Рассмотрим результаты численного моделирования двухфазного потока при различных режимах работы пневмосмесителя. Используем кинематические осредненные показатели несущей среды (воздуха) и отдельных

частиц в объеме смесительной камеры пневмосмесителя, представленные в выражениях (4 – 6). С помощью математической модели динамики вихревого потока в смесительной камере пневмосмесителя, представленной в работе [7], проведем верификацию полученных результатов численного расчета с помощью программного комплекса SolidWorks Simulation.

На рис. 3 смоделированы две ситуации: а) – когда давление подачи основных компонентов больше давления в азраторе  $P_1 > P_2$  (0,253 МПа в трубопроводе подачи компонентов против 0,2026 МПа в азраторе); б) – когда давление подачи основных компонентов меньше чем в азраторе  $P_1 < P_2$  (0,2026 МПа в трубопроводе подачи компонентов против 0,253 МПа в азраторе). Эти два режима работы пневмосмесителя рассматриваются на основании образования в смесительной камере агрегата возможных обратных течений (это

было установлено в результате моделирования в SolidWorks Simulation). Такой подход позволит минимизировать негативные последствия от образования обратных течений и определенным образом интенсифицировать процесс смешения компонентов.

Рис. 3, а показывает результаты моделирования средней абсолютной скорости несущей среды в пневмосмесителе. На входе в пневмосмеситель ее величина составляет 47 м/с, в конце смесительной камеры (на выгрузке) – 8,2 м/с. При этом наблюдается вихревое движение несущей среды, что необходимо для эффективного перемешивания компонентов внутри смесительной камеры. Здесь условием такой динамики несущей среды (двухфазного потока) будет являться разница давления  $P_1 > P_2$  и конструктивная геометрическая особенность камеры – форма криволинейного конфузора.

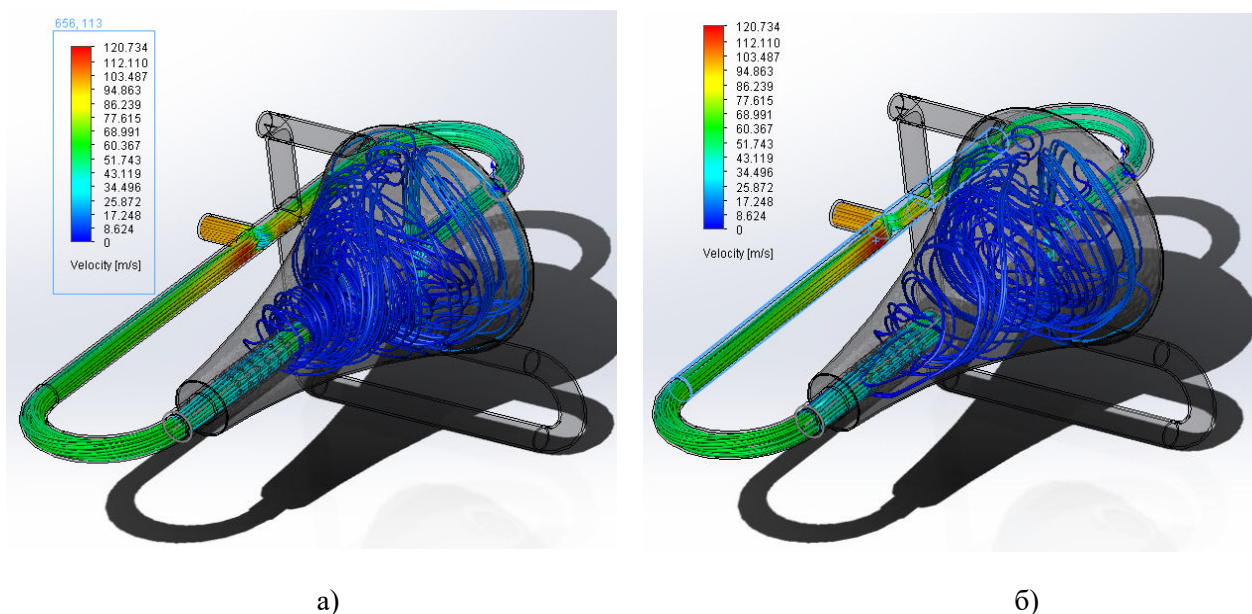


Рис. 3. Распределение скоростей несущей фазы в объеме пневмосмесителя: а) – при  $P_1 > P_2$ ; б) – при  $P_1 < P_2$

Случай на рис. 3, б имитирует разницу давления  $P_1 < P_2$  и показывает, что при таких условиях работы пневмосмесителя пониженного давления  $P_1$  (относительно давления в азраторе  $P_2$ ) не достаточно для формирования эффективного вихревого потока: наблюдается снижение его интенсивности и скоростных показателей несущей среды с 27,4 м/с на входе в смесительную камеру до 4,9 м/с на выходе из нее. Поэтому этот режим не рассматриваем в исследовании, так как он наименее эффективный, чем представленный условием  $P_1 > P_2$ .

По аналогии с рассматриваемыми случаями на рис. 3 смоделируем кинематику частиц сферической формы с  $d_{cp} = 40$  мкм и анизотропной формы с  $d_{cp} = 40$  мкм и  $l = 1$  мм (где  $l$  – длина

частицы). На рис. 4, а показана средняя скоростная характеристика потока частицы с  $d_{cp} = 40$  мкм. На входе в смесительную камеру абсолютная скорость частицы при таком размере равна 46,1 м/с, на выходе из смесительной камеры – 7,8 м/с.

Рис. 4, б устанавливает средний скоростной режим анизотропной частицы: на входе в смесительную камеру средняя скорость частицы составляет 44,7 м/с, а на выходе из нее – 6,1 м/с. Разница в скоростном режиме движения между сферической и анизотропной частицами при условии  $P_1 > P_2$  обусловлена парусностью анизотропных частиц и более высоким их сопротивлением в потоке несущей среды относительно аналогичного показателя сферической частицы.

Из численных результатов, представленных выше и полученных путем моделирования динамики анизотропной частицы в несущем потоке энергоносителя (воздуха), видим, что скоростные параметры анизотропной частицы на входе и на выходе из смесительной камеры по сравнению со сферической частицей на 9,5% и 21% меньше, соответственно. Поэтому делаем вывод, что при пе-

ремешивании смесей с анизотропными частицами, например, базальтовыми волокнами, необходимо интенсифицировать процесс смешения на входе двухфазного потока в смесительную камеру для подобной конструкции пневмосмесителя. Этого можно добиться с помощью повышения скоростного режима движения двухфазного потока на входе в смесительную камеру.

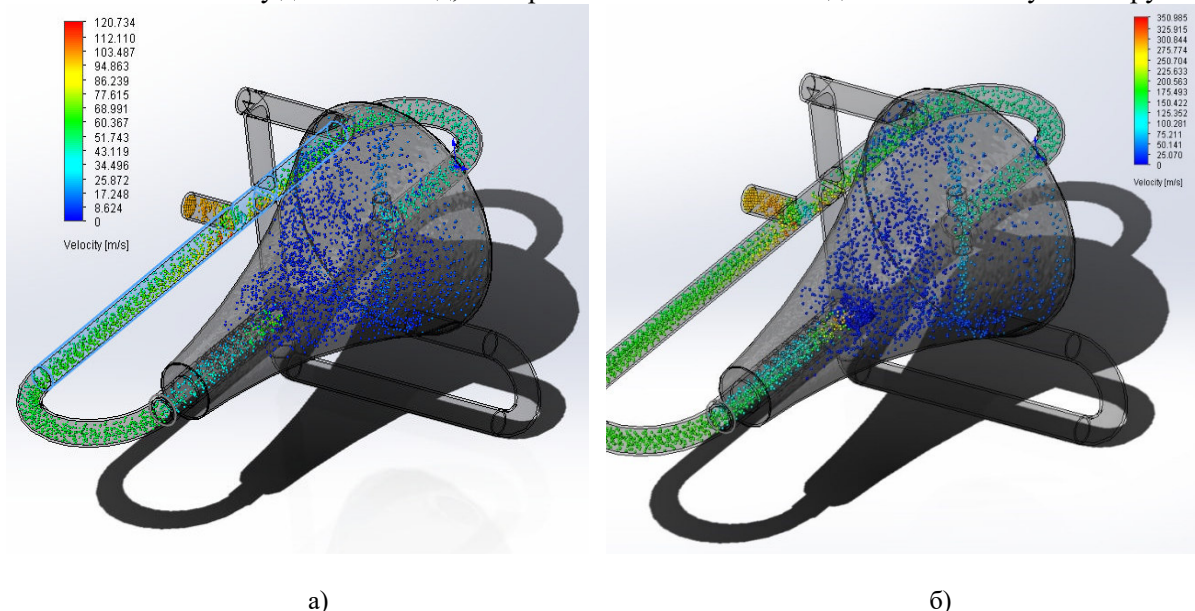


Рис. 4. Распределение средней скорости частицы в объеме смесительной камеры пневмосмесителя:  
а) – для сферической частицы при  $d_{cp} = 40$  мкм; б) – для анизотропной частицы при  $d_{cp} = 40$  мкм и  $l = 1$  мм

На рис. 5 показаны траектории и средние скорости несущей среды и твердых анизотропных частиц. Усредненная скорость несущей среды на входе в смесительную камеру при увеличении давления  $P_1$  с 0,258 МПа до 0,405 МПа составит 68,1 м/с, на выходе 13,2 м/с. При этом скорость несущей среды на выходе из аэратора  $P_2$  будет по-прежнему меньше  $P_1$  и составит 49,2 м/с

(рис. 5, а). Показатели скоростных режимов подачи энергоносителя в смесительную камеру влияют на качество получаемых смесей. Этому вопросу будет посвящены дальнейшие исследования пневмосмесителя непрерывного действия. Численные результаты моделирования несущей среды в пневмосмесителе требуют верификации с математической моделью двухфазного потока, полученной в работе [7].

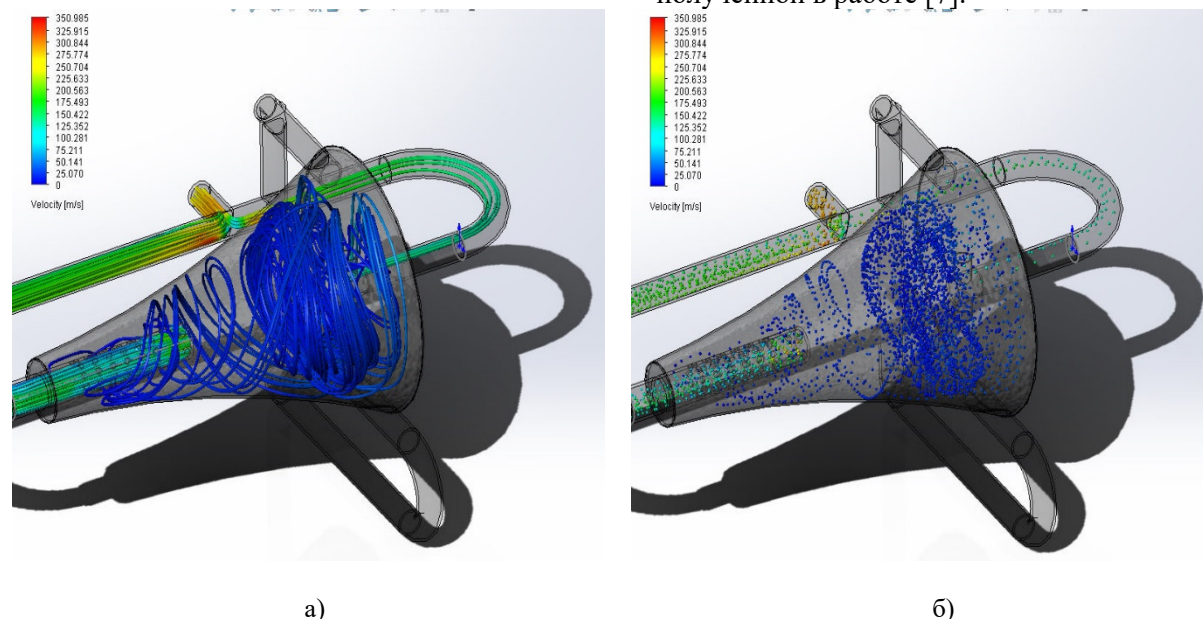


Рис. 5. Распределение средней скорости двухфазного потока в объеме смесительной камеры пневмосмесителя:  
а) несущая среда; б) анизотропная частицы при  $d_{cp} = 40$  мкм и  $l = 1$  мм

Рис. 5, 6 устанавливает траектории и средние скорости частиц анизотропной формы. Визуализация численных расчетов скоростей несущей среды и частиц показывает идентичность траекторий, по которым движется двухфазный поток. На входе в смесительную камеру средняя скорость частицы равна 63,8 м/с, на выходе из камеры – 11,4 м/с. Скорости частицы на выходе их смесительной камеры высокая и требует установки в технологической линии после пневмосмесителя дополнительного вспомогательного обеспыливающего оборудования. Эту проблему можно решить с помощью установки циклонного аппарата, под реальную производительность пневмосмесителя разработанной конструкции [16-17].

Для интенсификации процесса смешения компонентов в особенности смесей, в составе которых присутствуют частицы анизотропных материалов, в конструкции пневмосмесителя предусмотрен тангенциальный периферийный поддув дополнительного энергоносителя (воздуха). Это связано с тем, что на входе и несущая среда, и частицы резко начинают терять свою скорость, двигаясь в направлении разгрузки - к аэратору (поз. 3, рис. 1) [18–19]. На рис. 6 показано численное моделирование динамики анизотропной частицы в потоке энергоносителя. Средняя скорость двухфазного потока в зоне ввода дополнительного энергоносителя составляет 73,4 м/с. Этот параметр для дальнейших исследова-

ний тоже будет требовать оптимизации в зависимости от состава и средневзвешенного размера частиц в смеси.

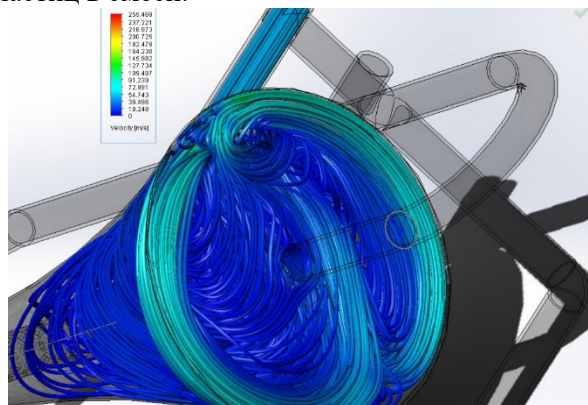


Рис. 6. Распределение средней скорости анизотропной частицы ( $d_{cp} = 30$  мкм при  $l = 1$  мм) в объеме пневмосмесителя при тангенциальном поддуве энергоносителя

В соответствии с полученными результатами численного моделирования в программном комплексе SolidWorks Simulation проведем верификацию с математической моделью, разработанной в работе [7]. Результаты верификации средних показателей скоростей несущей среды и частиц различной формы представлены в табл. 1. Условные обозначения: SWS – результаты численного моделирования двухфазного потока в SolidWorks Simulation; MM - результаты численного расчета динамики двухфазного потока по математической модели, изложенной в работе [7];  $\Delta$  – расхождение между результатами, %.

Таблица 1

**Результаты верификации численных расчетов средних скоростных параметров двухфазного потока на входе в пневмосмеситель по работе [7] с результатами моделирования в SolidWorks Simulation**

| Параметр                                                      | P <sub>1</sub> = 0,258 МПа |      |      | P <sub>1</sub> = 0,405 МПа |      |      |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------|------|------|----------------------------|------|------|
|                                                               | SWS                        | ММ   | Δ, % | SWS                        | ММ   | Δ, % |
|                                                               | Средняя скорость, м/с      |      |      | Средняя скорость, м/с      |      |      |
| Несущая среда (воздух)                                        | 47                         | 51,4 | 8,55 | 68,1                       | 73,1 | 6,85 |
| Сферическая частица<br>(d <sub>ср</sub> = 40 мкм)             | 46,1                       | 48,2 | 4,35 | –                          | –    | –    |
| Анизотропная частица<br>(d <sub>ср</sub> = 40 мкм и l = 1 мм) | 44,7                       | 47,4 | 5,70 | 63,8                       | 66,3 | 3,77 |

Таким образом, верификация расчета средней скорости двухфазного потока в пневмосмесителе в специализированной программе SolidWorks Simulation с результатами расчета по математической модели, представленной в работе [7], подтверждается достаточно высокой сходимостью (по несущей среде – воздуху – наблюдается наибольшее расхождение результатов). Возможно это связано с кинематическими параметрами воздуха, используемыми решателем в программном комплексе SolidWorks Simulation.

**Выводы.** Смоделировано движение двухфазного потока с различными по форме частицами численными методами в программе SolidWorks Simulation. Установлены параметры средних скоростей несущей среды и частиц в потоке на входе в смесительную камеру и на выходе из нее. Подтверждена идентичность уравнений математической модели с идентичностью траекторий и скоростей двухфазного потока, смоделированного в программе SolidWorks Simulation. Проведена верификация математической модели вихревого движения двухфазного потока с ре-

зультатами численного моделирования двухфазного потока в пневмосмесителе с помощью расчетного комплекса SolidWorks Simulation. Установлено, что расхождение между численными методами моделирования и математическими не превышает для несущей фазы – 8,55 %, а для твердой фазы – 5,70 %.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Севостьянов В.С., Ключев С.В., Севостьянов М.В., Бабуков В.А., Проценко А.М. Технологический комплекс для производства композиционных смесей с техногенными материалами // СТИН. 2022. № 12. С. 11–14.
2. Севостьянов М.В., Агеева М. С., Севостьянов В. С., Фомина Е.В., Проценко А.М., Бабуков В.А., Шамгулов Р.Ю. Высокотехнологичное оборудование и технологии для производства композиционных смесей с техногенными компонентами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 7. С. 98–110. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-7-98-110.
3. Коробчук М.В., Веригин А.Н. Обзор современных вибрационных смесителей сыпучих материалов и тенденции их развития // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 4(32). С. 32–45.
4. Царев М.В., Андреев Ю.С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 7. С. 517–531. DOI:10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531.
5. Fadin Yu.M., Shemetova O.M., Voronov V.P., Bogdanov V.S. Research Study of Mixing Processes in the Pneumatic Mixer for Dry Construction Mixes // Innovations and Technologies in Construction, Белгород, 09–10 марта 2022 года. Vol. 307. – RUS: Springer Nature Switzerland AG, 2023. Pp. 243–252. DOI:10.1007/978-3-031-20459-3\_31.
6. Пат. № 141488, МПК B01F 5/00. Противоточный пневмосмеситель для производства дисперсно-армированных смесей: / Т. Н. Орехова, В. А. Уваров, С. В. Ключев, А. Е. Качаев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова". № 2013159013/05: заявл. 30.12.2013: опубл. 10.06.2014.
7. 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. DOI 10.12737/article\_590878fb7932c3.02818288.
8. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 448 с.
9. Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Окушко В.В., Шестаков Ю.Г. Механика взвешенного слоя с полидисперсными частицами в пневмосмесителях непрерывного действия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 3. С. 121–127. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127.
10. Железнякова А.Л. Технологии верификации и валидации в численном газодинамическом моделировании // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т. 19, № 2. С. 8.
11. Сальников А.В., Французов М.С., Виноградов К.А., Пятунин К.Р., Никулин А.С. Верификация и валидация компьютерных моделей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 9. С. 100–115. DOI:10.18698/0536-1044-2022-9-100-115
12. Вараксин А.Ю. Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58, № 4. С. 646–669. DOI:10.31857/S004036442004016X.
13. Смутьский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск: Наука. 1992. 301 с.
14. Hong-Quan Zhang, Cem Sarica. A Model of Wetted-Wall Fraction and Gravity Center of Liquid Film in Gas/Liquid Pipe Flow. SPE Journal, 2011, Vol. 16, No 3. Pp. 692–697.
15. Вараксин А.Ю. Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58, № 4. С. 646–669. DOI:10.31857/S004036442004016X
16. Красовицкий Ю.В., Лобачева Н.Н., Романюк Е.В., Пигловский Н.В., Галиахметов Р.Ф. Особенности эксплуатации пылеуловителей при производстве строительных материалов // Строительные материалы. 2011. № 2. С. 63–65.
17. Агарков А.М. Направления совершенствования конструкций циклонных аппаратов // Эпоха науки. 2015. № 4. С. 89.
18. Кашапов Ф.Р., Ромашкин И.К., Симонов Л.А. Плоские, прямоугольные и осесимметричные конфузоры // Ученые записки ЦАГИ. 1983. Т. 14, № 3. С. 51–58.
19. Gidaspow D. Multiphase Flow and Fluidization. Boston: Academic Press, 1994. 467 p.

## Информация об авторах

**Качаев Александр Евгеньевич**, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела сельхозводоснабжения. E-mail: doctor\_cement@mail.ru. Всероссийский научно-исследовательский институт орошения и сельхозводоснабжения «Радуга». Россия, 140483, Московская область, Коломна, пос. Радужный, д. 38.

**Орехова Татьяна Николаевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин. E-mail: nefact@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Уральский Алексей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: alexx\_1984.10@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.04.2025 г.

© Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Уральский А.В., 2025

<sup>1</sup>\*Kachaev A.E., <sup>2</sup>Orehova T.N., <sup>2</sup>Uralsky A.V.

<sup>1</sup>All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply "Raduga"

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

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

## VERIFICATION OF THE RESULTS OF NUMERICAL AND MATHEMATICAL MODELING OF TWO-PHASE FLOW IN A CONTINUOUS-ACTION PNEUMATIC MIXER

**Abstract.** In this study, the motion of a two-phase flow with particles of different shapes is simulated using numerical methods in the SolidWorks Simulation program. In the course of the study, the parameters of the average velocities of the carrier medium and particles in the flow at the inlet and outlet of the mixing chamber were established. The identity of the equations of the mathematical model of the vortex motion of a two-phase flow inside the mixing chamber of a pneumatic mixer with the trajectories and velocities of a two-phase flow simulated in the SolidWorks Simulation program is confirmed. The results of numerical modeling of the average absolute velocities of a two-phase flow in a mixing chamber are presented, which reflect the kinematic parameters for the carrier medium and particles at the inlet and outlet of the mixing chamber. The verification of the mathematical model of the vortex motion of a two-phase flow with the results of numerical modeling of a two-phase flow in a pneumatic mixer using the SolidWorks Simulation calculation complex is carried out. It has been established that the discrepancy between numerical and mathematical (analytical) modeling methods does not exceed 8.55% for the carrier medium and 5.70% for particles of different shapes. The obtained research results can be used as the main approach to verifying technological processes in equipment that can be calculated using both analytical (mathematical) and numerical methods.

**Keywords:** pneumatic mixer, particle, carrier medium, mixing, two-phase flow, mixing chamber, verification.

### REFERENCES

1. Sevostyanov V.S., Klyuev S.V., Sevostyanov M.V., Babukov V.A., Protsenko A.M. Technological complex for the production of composite mixtures with technogenic materials [Tekhnologicheskii kompleks dlya proizvodstva kompozitsionnykh smesey s tekhnogennymi materialami]. STIN. 2022. No. 12. Pp. 11–14. (rus)
2. Sevostyanov M.V., Ageeva M.S., Sevostyanov V.S., Fomina E.V., Protsenko A.M., Babukov V.A., Shamgulov R.Yu. High-tech equipment and technologies for the production of composite mixtures with technogenic components [Vysokotekhnologichnoye oborudovaniye i tekhnologii dlya proizvodstva kompozitsionnykh smesey s tekhnogennymi komponentami]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov.. 2024. No. 7. Pp. 98–110. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-7-98-110. (rus)
3. Korobchuk M.V., Verigin A.N. Review of modern vibration mixers for bulk materials and their development trends [Obzor sovremennykh vibratsionnykh smesiteley sypuchikh materialov i tendentsii ikh razvitiya]. South Siberian Scientific Bulletin. 2020. No. 4(32). Pp. 32–45. (rus)
4. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. Digital twins in industry: history of development, classification, technologies, use scenarios [Tsifrovyye dvoyniki v promyshlennosti: istoriya razvitiya, klassifikatsiya, tekhnologii, stsennarii ispol'zovaniya]. News of higher educational institutions. Instrument engineering. 2021. Vol. 64. No. 7. Pp. 517–531. DOI:10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531. (rus)

5. Fadin Yu.M., Shemetova O.M., Voronov V.P., Bogdanov V.S. Research Study of Mixing Processes in the Pneumatic Mixer for Dry Construction Mixes. *Innovations and Technologies in Construction*, Belgorod, March 09–10, 2022. Vol. 307. RUS: Springer Nature Switzerland AG, 2023. Pp. 243–252. DOI 10.1007/978-3-031-20459-3\_31.

6. Patent No. 141488, IPC B01F 5/00. Counter-current pneumatic mixer for the production of dispersed-reinforced mixtures: / T. N. Orekhova, V. A. Uvarov, S. V. Klyuev, A. E. Kachaev; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov". No. 2013159013/05: declared. 30.12.2013: published. 10.06.2014.

7. Kachaev A.E., Orekhova T.N. Description of the vortex motion of a two-phase flow in a continuous pneumatic mixer [Opisaniye vikhrevogo dvizheniya dvukhfaznogo potoka v pnevmosmesitele nepreryvnogo deystviya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 5. Pp. 121–125. DOI:10.12737/article\_590878fb7932c3.02818288. (rus)

8. Alyamovsky A.A. SolidWorks Simulation. How to solve practical problems [SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskiye zadachi]. SPb.: BHV-Petersburg,. 2012. 448 p. (rus)

9. Kachaev A.E., Orekhova T.N., Okushko V.V., Shestakov Yu.G. Mechanics of a suspended layer with polydisperse particles in continuous pneumatic mixers [Mekhanika vzveshennogo sloya s polidispersnymi chastitsami v pnevmosmesiteleyakh nepreryvnogo deystviya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 3. Pp. 121–127. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127. (rus)

10. Zheleznyakova A.L. Verification and validation technologies in numerical gas-dynamic modeling [Tekhnologii verifikatsii i validatsii v chislenom gazodinamicheskom modelirovanii]. *Physico-chemical kinetics in gas dynamics*. 2018. Vol. 19, No. 2. Pp. 8–12. (rus)

11. Salnikov A.V., Frantsuzov M.S., Vinogradov K.A., Pyatunin K.R., Nikulin A.S. Verification and validation of computer models [Verifikatsiya i validatsiya komp'yuternykh modeley]. *News of*

higher educational institutions. *Mechanical Engineering*. 2022. No. 9. Pp. 100–115. DOI:10.18698/0536-1044-2022-9-100-115 (rus)

12. Varaksin A.Yu. Two-phase flows with solid particles, droplets and bubbles: problems and research results (review) [Dvukhfaznyye potoki s tverdymi chastitsami, kaplyami i puzyryami: problemy i rezul'taty issledovaniy (obzor)]. *High Temperature Thermophysics*. 2020. Vol. 58. No. 4. Pp. 646–669. DOI:10.31857/S004036442004016X. (rus)

13. Smulsky I.I. Aerodynamics and processes in vortex chambers [Aerodinamika i protsessy v vikhrevykh kamerakh]. Novosibirsk: Nauka. 1992. 301 p. (rus)

14. Hong-Quan Zhang, Cem Sarica. A Model of Wetted-Wall Fraction and Gravity Center of Liquid Film in Gas/Liquid Pipe Flow. *SPE Journal*, 2011, Vol. 16, No. 3. Pp. 692–697.

15. Varaksin A. Yu. Two-phase flows with solid particles, droplets and bubbles: problems and research results (review) [Dvukhfaznyye potoki s tverdymi chastitsami, kaplyami i puzyryami: problemy i rezul'taty issledovaniy (obzor)]. *High Temperature Thermophysics*. 2020. Vol. 58, No. 4. Pp. 646–669. DOI 10.31857/S004036442004016X

16. Krasovitsky Yu.V., Lobacheva N.N., Romanyuk E.V., Piglovskiy N.V., Galiakhmetov R. F. Features of operation of dust collectors in the production of building materials [Osobennosti ekspluatatsii pyleuloviteley pri proizvodstve stroitel'nykh materialov]. *Building materials*. 2011. No. 2. Pp. 63–65. (rus)

17. Agarkov A.M. Directions for improving the designs of cyclone devices [Napravleniya sovershenstvovaniya konstruktivnykh tsiklonnykh apparatov]. *Epoch of science*. 2015. No. 4. Pp. 89–91. (rus)

18. Kashapov F.R., Romashkin I.K., Simonov L. A. Flat, rectangular and axisymmetric confusers [Ploskiye, pryamougol'nyye i osesimmetrichnyye konfuzory]. *Scientific notes of TsAGI*. 1983. Vol. 14. No. 3. Pp. 51–58. (rus)

19. Gidaspow D. *Multiphase Flow and Fluidization*. Boston: Academic Press, 1994. 467 p.

#### Information about the author

**Kachaev, Aleksandr E.** PhD in Engineering, research associate of the agricultural water supply department. E-mail: doctor\_cement@mail.ru. All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply "Raduga". Russia, 140483, Moscow region, Kolomna, Raduzhny settlement, 38.

**Orekhova, Tatyana N.** PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Lifting and Transport and Road Machines. E-mail: nefact@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

**Uralskiy, Aleksey V.** PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms. E-mail: alexx\_1984.10@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

---

*Received 11.04.2025*

**Для цитирования:**

Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Уральский А.В. Верификация результатов численного и математического моделирования двухфазного потока в пневмосмесителе непрерывного действия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 9. С. 115–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-115-124

**For citation:**

Kachaev A.E., Orekhova T.N., Uralsky A.V. Verification of the results of numerical and mathematical modeling of two-phase flow in a continuous-action pneumatic mixer. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 9. Pp. 115–124. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-9-115-124