

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В ПНЕВМОСМЕСИТЕЛЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Качаев А.Е.¹, Орехова Т.Н.², Строкова В.В.², Уральский А.В.²

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», Коломна;*

²*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород*

Ключевые слова: пневмосмеситель, частица, несущая среда, смешение, двухфазный поток, смесительная камера, цифровой двойник.

Аннотация. В настоящем исследовании смоделировано движение двухфазного потока с различными по форме частицами численными методами в программе SolidWorks Simulation. В процессе исследования 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 вихревого движения двухфазного потока внутри смесительной камеры пневмосмесителя с идентичностью траекторий и скоростей двухфазного потока, смоделированного в программе SolidWorks Simulation. 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%.

NUMERICAL MODELING OF TWO-PHASE FLOW IN A CONTINUOUS PNEUMATIC MIXER

Kachaev A.E.¹, Orekhova T.N.², Strokova V.V.², Uralsky A.V.²

¹*All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply "Raduga", Kolomna;*

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

Keywords: pneumatic mixer, particle, carrier phase, mixing, two-phase flow, mixing chamber, digital twin.

Abstract. In this study, the motion of a two-phase flow with particles of various shapes was 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 determined. 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 identity of the trajectories and velocities of the two-phase flow simulated in the SolidWorks Simulation program was confirmed. The verification of the mathematical model of the vortex motion of a two-phase flow with the results of numerical simulation of a two-phase flow in a pneumatic mixer was carried out using the SolidWorks Simulation calculation complex. It was found that the discrepancy between the numerical and mathematical (analytical) modeling methods does not exceed 8.55% for the carrier medium and 5.70% for particles of various shapes.

Введение

В современных условиях развития строительного материаловедения возникают вопросы разработки эффективного технологического оборудования. 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 [1].

Конкурентоспособность отечественного оборудования для производства смесей различного назначения повышается в виду работы, проводимой в рамках импортозамещения. Совершенствуются технологии перемешивания дисперсных компонентов [2]: разрабатываются новые составы сухих строительных смесей, исследуются свойства дисперсно-армирующих составов на прочность элементов строительных конструкций и др.

В развитии техники и технологии смешения полидисперсных компонентов активным образом при моделировании технологических процессов используются современные информационные технологии и цифровые двойники технологического оборудования [3].

Численное моделирование технологических процессов в аппаратах с высокой динамикой несущей 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.

Целью настоящего **исследования** является численное определение скоростных параметров двухфазного потока (определение скоростей несущей среды и частиц) в пневмосмесителе непрерывного действия для установления оптимальных режимов его работы.

Материалы и методы исследования. Исследование пневмосмесителя 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 необходимо проводить для дальнейшей его верификации [4] с математическими методами моделирования двухфазного потока в геометрическом объеме пневмосмесителя.

С помощью пакета программ SolidWorks Simulation моделировались скоростные условия работы пневмосмесителя: дифференцированный подход к определению параметров скорости несущей среды проводился для различных участков пневмосмесителя, после чего результаты объединялись и накладывались друг на друга. При таком подходе можно численно определить скоростные параметры движения воздуха с твердыми частицами полидисперсных и волокнистых компонентов в любом геометрическом пространстве пневмосмесителя.

Объектом исследования является пневмосмеситель [5] разработанной конструкции, устройство которого показано на рисунке 1.

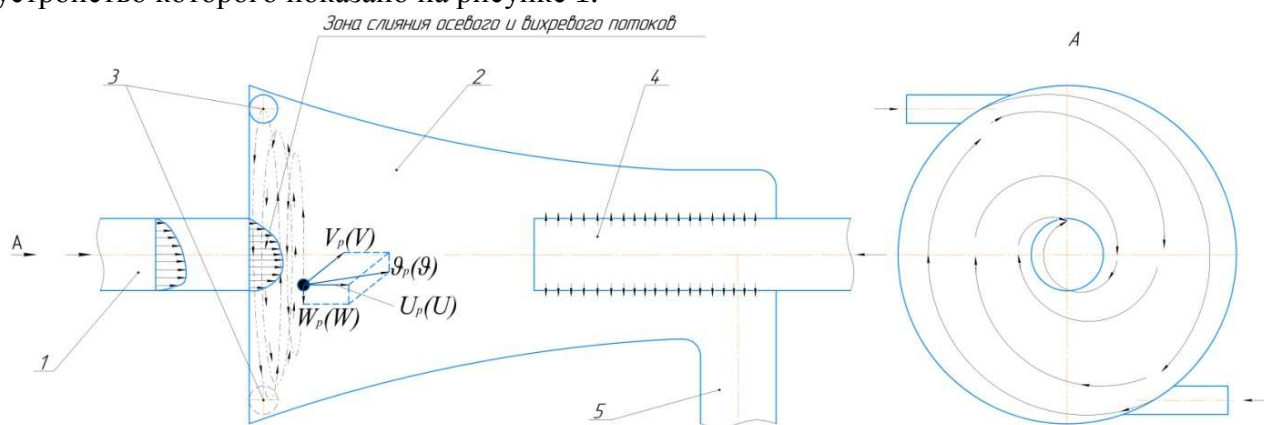


Рис. 1 Расчетная схема для математического моделирования динамики двухфазного потока внутри смесительной камеры пневмосмесителя: 1 – транспортирование компонентов смеси по разгонному узлу; 2 – камера гомогенизации; 3 – тангенциальный поддув воздуха; 4 – узел аэрации и дезагрегации смеси; 5 – разгрузочный патрубок

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 следующую расчетную схему, относительно которой разрабатывалась математическая модель с учетом ранее выполненных исследований [6, 7].

Отработка результатов численного моделирования процесса перемешивания различных компонентов с армирующими волокнами и натурных исследований проводилась на опытно-экспериментальном образце пневмосмесителя, показанном на рисунке 2. В соответствии с целью настоящего исследования необходимо определить параметры скоростных характеристик двухфазного потока в рабочем объеме пневмосмесителя.

При математическом моделировании смешения и динамики двухфазного потока внутри смесительной камеры агрегата используются уравнения газовой динамики с дисперсными частицами [8]. Такое



Рис. 2. Экспериментальная установка пневмосмесителя

моделирование процессов в оборудовании позволяет рассматривать поведение отдельно взятой частицы в несущей среде с учетом геометрии смесительной камеры.

Абсолютная скорость несущей среды и частицы определяется из выражения [9]:

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

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; z – вертикальная координата положения частицы в двухфазном потоке, м.

В исследовании рассматривается пространственная вихревая модель динамики воздуха с твердыми частицами в объеме смесительной камеры агрегата (рис. 2). В настоящих расчетах скоростей частиц пренебрегаем величиной силы, учитывающей ее вращение на различных участках тракта двухфазного потока, ввиду её малости.

В настоящем исследовании, как и в работе [6], радиальную, тангенциальную и осевую скорости движения воздуха и частицы перемешиваемых материалов определяем расстоянием от оси их горизонтального вращения и временными интервалами без соударений со стенками смесительной камеры как, например, в работе [7]. Математически динамику частицы произвольной формы в вихревом потоке центробежного поля смесительной камеры пневмосмесителя запишем в виде следующей системы уравнений [6]:

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

где ρ_p – плотность отдельных частиц смешиваемых компонентов, кг/м³; R – начальный радиус смесительной камеры, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; p – давление несущей среды (воздуха) на частицу материала в двухфазном потоке, Па.

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 [6]:

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

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

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

где $\bar{\lambda}$ – безразмерная величина ($\bar{\lambda} = \frac{1}{\tau}$) для осреднения показателей скоростей в выражениях (4)-(6) на основании результатов работы [10].

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

Результаты и обсуждение. 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 [6], проведем верификацию полученных результатов численного расчета с помощью программного комплекса SolidWorks Simulation.

На рисунке 3 смоделированы две ситуации: а) давление подачи основных компонентов больше давления в азраторе $P_1 > P_2$ (2,5 атм. в трубопроводе подачи компонентов против 2,0 атм. в азраторе); б) давление подачи основных компонентов меньше чем в азраторе $P_1 < P_2$ (2,0 атм. в трубопроводе подачи компонентов против 2,5 атм. 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.

Рисунок 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.

Случай на рисунке 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 $P_1 > P_2$ (чем предыдущий режим, рассмотренный выше).

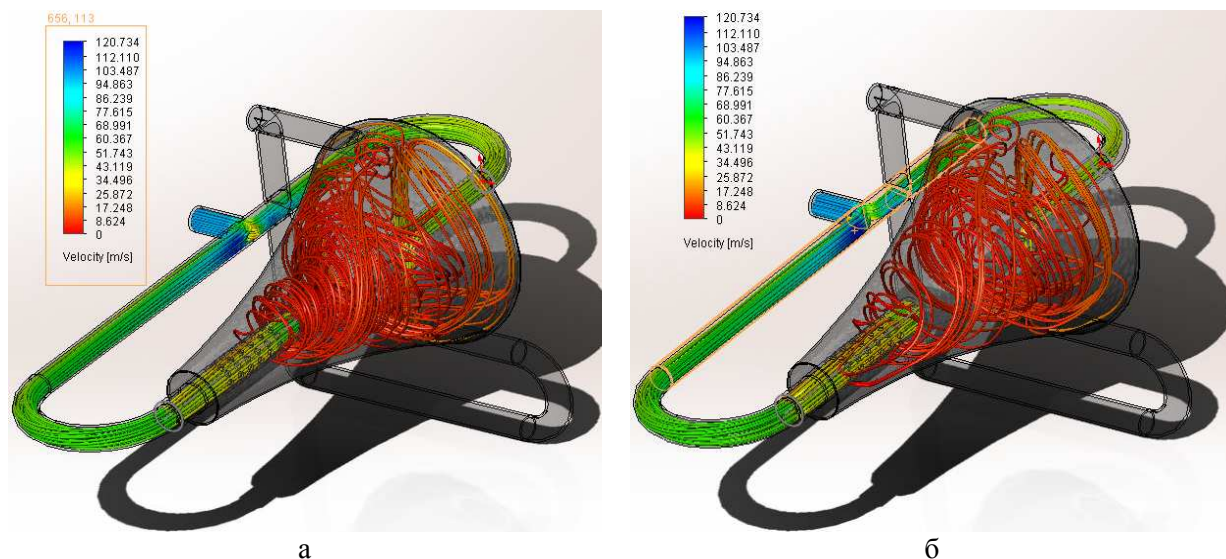


Рис. 3. Распределение скоростей несущей фазы в объеме пневмосмесителя при: а $P_1 > P_2$; б $P_1 < P_2$

По аналогии с рассматриваемыми случаями на рисунке 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 рисунке 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. Рисунок 4, б демонстрирует 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.

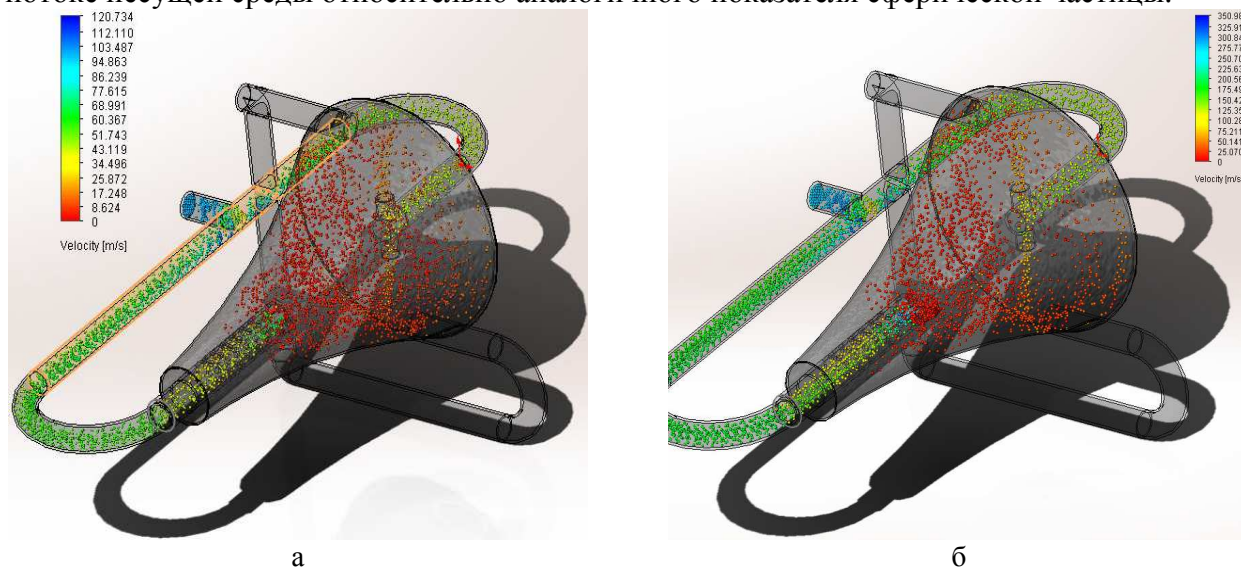


Рис. 4. Распределение средней скорости частицы в объеме смесительной камеры пневмосмесителя: а – для сферической частицы при $d_{cp} = 40$ мкм; б – для анизотропной частицы при $d_{cp} = 40$ мкм и $l = 1$ мм

Из численных результатов, представленных выше и полученных путем моделирования динамики анизотропной частицы в несущей 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 перемешивании 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.

На рисунке 5 показаны траектории и средние скорости несущей среды и твердых анизотропных частиц. Среднняя скорость несущей среды на входе в смесительную камеру при увеличении давления P_1 с 2,5 атм. до 4 атм. (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 азратора P_2 будет по-прежнему меньше P_1 и составит 49,2 м/с (рис. 5, а). Для выхода агрегатом на оптимальные показатели скоростных режимов подачи энергоносителя в смесительную камеру необходимо оценивать качество получаемых смесей. Этому вопросу будет посвящены дальнейшие исследования пневмосмесителя непрерывного действия. С помощью полученных численных результатов моделирования несущей среды в пневмосмесителе для данного исследования проведем верификацию результатов с математической моделью двухфазного потока, полученной в работе [6].

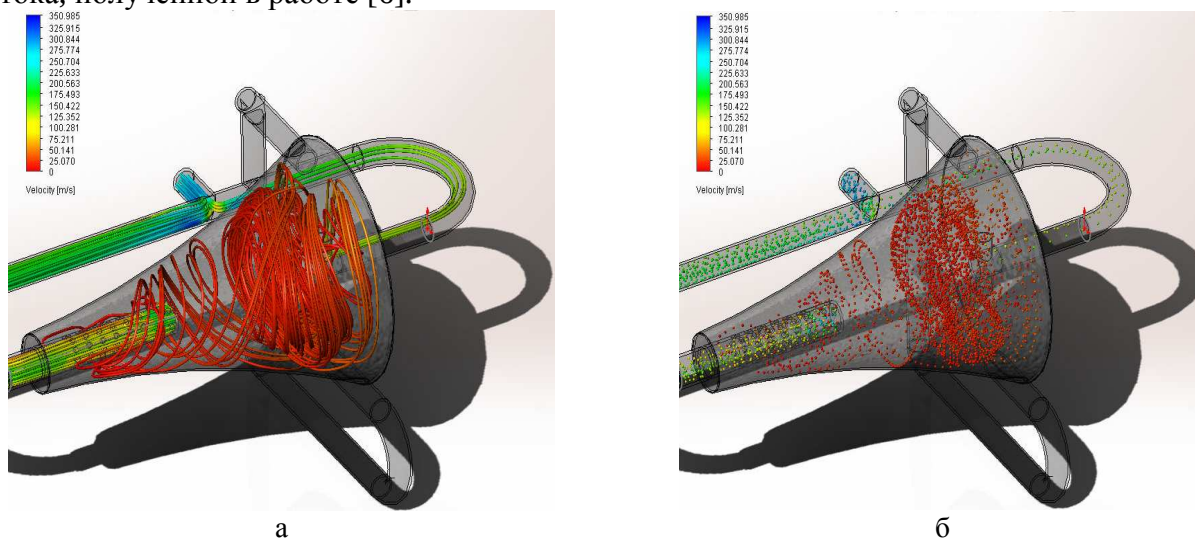


Рис. 5. Распределение средней скорости двухфазного потока в объеме смесительной камеры пневмосмесителя: а – несущая среда; б – анизотропная частицы при $d_{cp} = 40$ мкм и $l = 1$ мм

Рисунок 5, б показывает 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. Скорость частицы на выходе их смесительной камеры высокая и требует установки в технологической линии после пневмосмесителя дополнительного вспомогательного оборудования для гашения скорости готового продукта и предотвращения избыточного пыления. Эту проблему можно решить с помощью установки циклонного аппарата, под реальную производительность пневмосмесителя разработанной конструкции.

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 азратору (поз. 3, рис. 1). На рисунке 6 показаны результаты численного моделирования динамики анизотропной частицы в потоке энергоносителя. Средняя скорость двухфазного потока в зоне ввода дополнительного энергоносителя составляет 73,4 м/с. Этот параметр для дальнейших исследований тоже будет требовать оптимизации в зависимости от состава и средневзвешенного размера частиц в смеси.

В соответствии с полученными результатами численного моделирования в программном комплексе SolidWorks Simulation проведем верификацию с математической моделью, разработанной в работе [6]. Результаты верификации средних показателей скоростей несущей среды и частиц различной формы представлены в таблице 1.

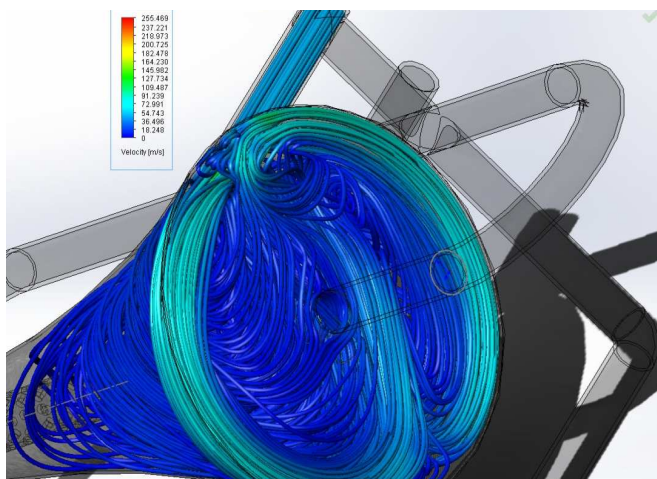


Рис. 6. Распределение средней скорости анизотропной частицы ($d_{cp} = 30$ мкм при $l = 1$ мм) в объеме пневмосмесителя при тангенциальном поддуве

Табл. 1. Результаты верификации расчетов средних скоростных параметров двухфазного потока на входе в пневмосмеситель

Параметр	$P_1 = 2,5$ атм. (0,258 МПа)			$P_1 = 4,0$ атм. (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 ($d_{cp} = 40$ мкм)	46,1	48,2	4,35	-	-	-
Анизотропная частица ($d_{cp} = 40$ мкм и $l = 1$ мм)	44,7	47,4	5,70	63,8	66,3	3,77

Примечание: SWS – результаты численного моделирования двухфазного потока в SolidWorks Simulation; ММ – результаты численного расчета динамики двухфазного потока по математической модели, изложенной в работе [6]; Δ – расхождение между результатами, %.

Таким образом, верификация расчета средней скорости двухфазного потока в пневмосмесителе в специализированной программе SolidWorks Simulation с результатами расчета по математической модели, представленной в работе [6], 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, полученной в работе [6], с идентичностью траекторий и скоростей двухфазного потока, смоделированного в программе SolidWorks Simulation. Проведена верификация математической модели вихревого движения двухфазного потока, представленная в работе [6], с результатами 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%.

Список литературы

1. 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 Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 7. – С. 98-110. – doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-7-98-110.
2. 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.

3. 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.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531.
4. Железнякова А.Л. Технологии верификации и валидации в численном газодинамическом моделировании // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2018. – Т. 19, № 2. – DOI: 10.33257/PhChGD.19.2.687.
5. Патент №141488 РФ. Противоточный пневмосмеситель для производства дисперсно-армированных смесей / Т.Н. Орехова, В.А. Уваров, С.В. Ключев, А.Е. Качаев. – Заявка №2013159013 от 30.12.2013; опубл. 10.06.2014.
6. Качаев А.Е., Орехова Т.Н. Описание вихревого движения двухфазного потока в пневмосмесителе непрерывного действия // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 5. – С. 121-125. – doi.org/10.12737/article_590878fb7932c3.02818288.
7. Севостьянов В.С., Качаев А.Е., Бойчук И.П., Кузнецова И.А. Теоретические исследования процессов в роторной мельнице с комбинированным воздействием на измельчаемый материал // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 9. – С. 122-129. – doi.org/10.12737/article_59a93b0aa409c9.96285097.
8. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. – М.: Наука, 1968. – 688 с.
9. 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.org/10.31857/S004036442004016X.
10. Смольский И.И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. – Новосибирск: Наука, 1992. – 301 с.

References

1. 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 // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2024, no. 7, pp. 98-110. doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-7-98-110.
2. Korobchuk M.V., Verigin A.N. Review of modern vibratory mixers for bulk materials and trends in their development // South Siberian Scientific Bulletin. 2020, no. 4(32), pp. 32-45.
3. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. Digital twins in industry: history of development, classification, technologies, use scenarios // News of higher educational institutions. Instrument making. 2021, vol. 64, no. 7, pp. 517-531. doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531.
4. Zheleznyakova A. L. Verification and validation technologies in numerical gas-dynamic modeling // Physicochemical kinetics in gas dynamics. 2018. vol. 19, no. 2. DOI: 10.33257/PhChGD.19.2.687.
5. Patent No. 141488 RU. Counter-current pneumatic mixer for the production of dispersed-reinforced mixtures / T.N. Orekhova, V.A. Uvarov, S.V. Klyuev, A.E. Kachaev. – Appl. No. 2013159013 from 30.12.2013; publ. 10.06.2014.
6. Kachaev A.E., Orekhova T.N. Description of the vortex motion of a two-phase flow in a continuous pneumatic mixer // Bulletin of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2017, no. 5, pp. 121-125. doi.org/10.12737/article_590878fb7932c3.02818288.
7. Sevostyanov V.S., Kachaev A.E., Boychuk I.P., Kuznetsova I.A. Theoretical studies of processes in a rotor mill with a combined effect on the ground material // Bulletin of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2017, no. 9, pp. 122-129. doi.org/10.12737/article_59a93b0aa409c9.96285097.
8. Rozhdestvensky B.L., Yanenko N.N. Systems of quasilinear equations and their applications to gas dynamics. – M.: Science, 1968. – 688 p.
9. Varaksin A.Yu. Two-phase flows with solid particles, droplets and bubbles: problems and research results (review) // High Temperature Thermophysics. 2020. vol. 58, no. 4, pp. 646-669. doi.org/10.31857/S004036442004016X.
10. Smulsky I.I. Aerodynamics and processes in vortex chambers. – Novosibirsk: Science, 1992. – 301 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Качаев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела сельхозводоснабжения	Kachaev Aleksandr Evgenievich – candidate of technical sciences, research fellow at the Department of agricultural water supply
Орехова Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры подъемно-транспортных и дорожных машин	Orekhova Tatyana Nikolaevna – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of lifting, transport and road machines
Строкова Валерия Валерьевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой материаловедения и технологии материалов	Stroкова Valeria Valerievna – doctor of technical sciences, professor, head of the Department of materials science and technology of materials
Уральский Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов	Uralskiy Aleksey Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of technological complexes, machines and mechanisms
doctor_cement@mail.ru	

Получена 09.04.2025