

РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СМЕСИТЕЛЯ ОРИГИНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Качаев А.Е.¹, Строкова В.В.², Орехова Т.Н.², Чемеричко Г.И.²

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

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

Ключевые слова: пневмосмеситель, уравнение состояния энергоносителя, уравнение движения энергоносителя, уравнение неразрывности, двухфазный поток, смесительная камера.

Аннотация. В настоящем исследовании разработана методика определения производительности и потребляемой мощности для пневмосмесителя оригинальной конструкции. Получены выражения для расчета величин производительности и потребляемой мощности в зависимости от конструктивных и технологических параметров смесительной камеры. Выбраны для исследования прямые аналитические методы исследования в комбинации с данными, полученными из численных моделей технологических процессов в пневмосмесителе. Проведены экспериментальные исследования по верификации теоретических расчетных показателей производительности и потребляемой пневмосмесителе мощности. Расхождение значений между теоретическими и экспериментальными значениями искомых параметров не превышает 7%. В процессе настоящего исследования установлена зависимость производительности пневмосмесителя от параметров давления в смесительной камере. Результаты исследования могут быть полезными инженерам, занимающимся вопросами разработки смесительного оборудования подобного типа.

CALCULATION OF THE DESIGN, TECHNOLOGICAL AND ENERGY PARAMETERS OF A PNEUMATIC MIXER OF AN ORIGINAL DESIGN

Kachaev A.E.¹, Strokova V.V.², Orekhova T.N.², Chemerychko G.I.²

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

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

Keywords: pneumatic mixer, equation of state of the energy carrier, equation of motion of the energy carrier, continuity equation, two-phase flow, mixing chamber.

Abstract. This study develops a methodology for determining the performance and power consumption of a pneumatic mixer with an original design. Expressions are derived for calculating performance and power consumption values depending on the design and process parameters of the mixing chamber. Direct analytical research methods were combined with data obtained from numerical models of technological processes in the pneumatic mixer. Experimental studies were conducted to verify the theoretical calculated performance indicators and the power consumed by the pneumatic mixer. The discrepancy between the theoretical and experimental values of the sought parameters does not exceed 7%. This study established the dependence of the pneumatic mixer performance on the pressure parameters in the mixing chamber. The results of the study may be useful to engineers developing similar mixing equipment.

Введение. На современном этапе развития промышленности особая роль принадлежит автоматизированному и энергоэффективному технологическому оборудованию. Пневматические смесители занимают важное место в области химической, строительной, пищевой промышленности и в производстве высокотехнологичных материалов [1]. Они предназначены для эффективного и однородного перемешивания сыпучих, порошковых и гранулированных веществ с помощью воздушных и газовых потоков [2]. Использование оригинальных конструкций пневматических смесителей позволяет не только повысить качество перемешивания, но и значительно снизить энергозатраты, повысить надежность и уменьшить технологические потери. Современные требования к данному оборудованию обуславливают необходимость точных расчетов его конструктивно-технологических и

энергосиловых параметров, что обеспечивает оптимальную работу устройства и его длительный эксплуатационный ресурс [3].

Масштабное внедрение технологий автоматизации и повышения энергоэффективности продукции в производстве строительных материалов вызывает повышенный интерес к разрабатываемым моделям пневматических смесителей. Особенно важным аспектом является создание устройств с оригинальными конструктивными решениями, дающими преимущества перед традиционными аналогами, такие как меньшие энергозатраты, более равномерное перемешивание и повышение надежности [4]. Проведение расчетов конструкторско-технологических и энергосиловых параметров позволяет обеспечить оптимальную работу этих устройств и соответствие современным требованиям порошкообразных гомогенных материалов.

Актуальность научных исследований в области расчетов пневматических смесителей обусловлена необходимостью создания нового поколения оборудования, максимально соответствующего требованиям эффективности, надежности и экологической безопасности.

Цель исследования – разработка методики расчета конструктивно-технологических и энергосиловых параметров пневматического смесителя оригинальной конструкции ее сравнительный анализ с экспериментальными данными вышеуказанных показателей.

Методы и объект исследования. Для определения производительности и потребляемой мощности использовалось сочетание аналитических расчетов, экспериментальных измерений и компьютерного моделирования. Такой подход позволяет не только вычислить теоретические показатели, но и проверить их на практике, что особенно важно при внедрении оригинальных конструкций пневмосмесителей в промышленности [5]. Объектом исследования является пневмосмеситель [6], показанный на рисунках 1 и 2.

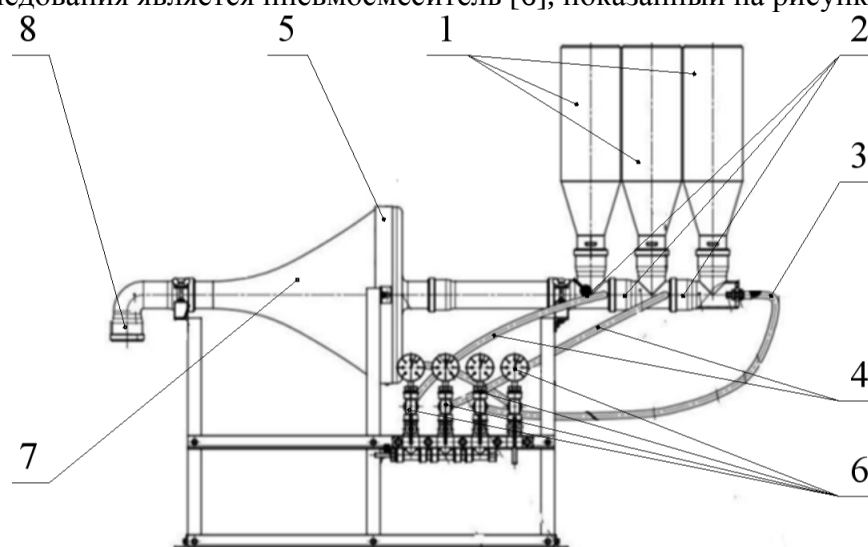


Рис. 1. Схема экспериментальной установки пневмосмесителя: 1 – бункер; 2 – патрубки ввода компонентов; 3 – труба подающая; 4 – патрубки подвода воздуха; 5 – полость с дополнительным подводом сжатого воздуха; 6 – манометры; 7 – корпус основной камеры смешения; 8 – выгрузка материала

Интенсификация процесса воздушного перемешивания дисперсных компонентов в объеме смесительной камеры агрегата может быть осуществлена путем установки сопел, как показано на рисунке 3. Это необходимо для поддержания вихревого движения двухфазного потока, который и осуществляет перемешивание дисперсных компонентов в объеме смесительной камеры. Регулирующиеся сопла позволяют подбирать углы поддува для различных частиц тонкомолотых материалов.

Рассмотрим аналитические выражения, позволяющие получить методику для определения показателя производительности и потребляемой мощности пневмосмесителя, разработанной конструкции [6].



Рис. 2. Экспериментальная установка пневмосмесителя

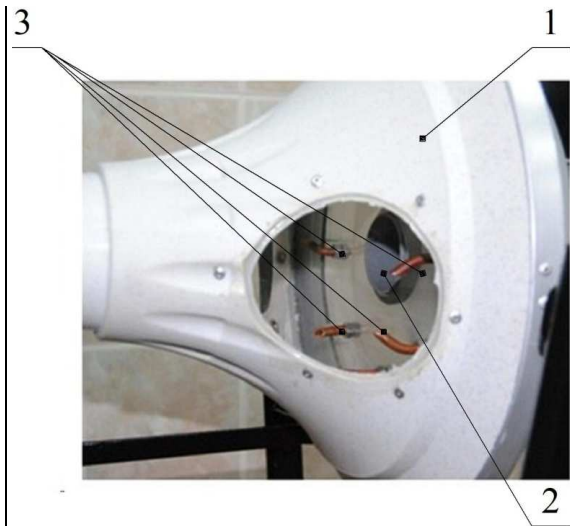


Рис. 3. Устройство смесительной камеры:
1 – корпус; 2 – труба подающая; 3 – сопла

Основная часть. Согласно основным законам механики установившееся движения газа с тонкими частицами в смесительной камере, которая является криволинейным конфузуром с определенным сопротивлением, можно описать тремя последовательно (совместно) решаемыми уравнениями.

1. Уравнение движения энергоносителя в относительном коническом объеме с учетом силы тяжести, которая действует на частицы, определяется из уравнения [7]:

$$dZ + \frac{VdV}{2g} + \frac{dP}{\rho g} = \xi \frac{V^2 dx}{2D_i \cdot g}, \quad (1)$$

где Z – энергия поглощения, м/с; V – скорость потока в трубопроводе, м/с; P – давление воздуха в объеме, Па; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность воздуха в потоке, кг/м³; D_i – диаметр сечения, м; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления при течении газа в конфузоре рекомендуется определять по формуле из работ [8-10]:

$$\xi = (-0,0125n_0^4 + 0,0224n_0^3 - 0,00723n_0^2 + 0,00444n_0 - 0,00745)(\alpha_p^3 - 2\pi\alpha_p^2 - 10\alpha_p), \quad (2)$$

где n_0 – степень сужения конфузора; α_p – угол сужения для конфузора с криволинейными стенками, равен $\alpha_p = 0,01745$ α; α – угол сужения конфузора с прямыми стенками, град;

2. Уравнение состояния энергоносителя [11]:

$$P = \rho \cdot z \cdot R \cdot T, \quad (3)$$

где z – коэффициент сжимаемости энергоносителя (СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*. – М.: Госстрой, ФАУ "ФИЦ", 2013); R – универсальная газовая постоянная, $R \approx 8,314462618$ Дж/(моль·°К); T – температура энергоносителя, °К.

3. Уравнение неразрывности [12]:

$$Q_m = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} \cdot \rho \cdot V. \quad (4)$$

Тогда согласно (4) выражение для скорости V получим в виде:

$$V = \frac{4 Q_m}{\pi \rho \cdot D_i^2}. \quad (5)$$

Проанализируем выражение (1). Первый член в уравнении движения энергоносителя (1) – это энергия положения; вторая составляющая – это кинетическая энергия энергоносителя; третья составляющая – это потенциальная энергия давления энергоносителя; за знаком равенства находится величина потеряннного напора внутри смесительной камеры.

Расчетная схема для определения расхода по объему смесительной камеры представлена на рисунке 4.

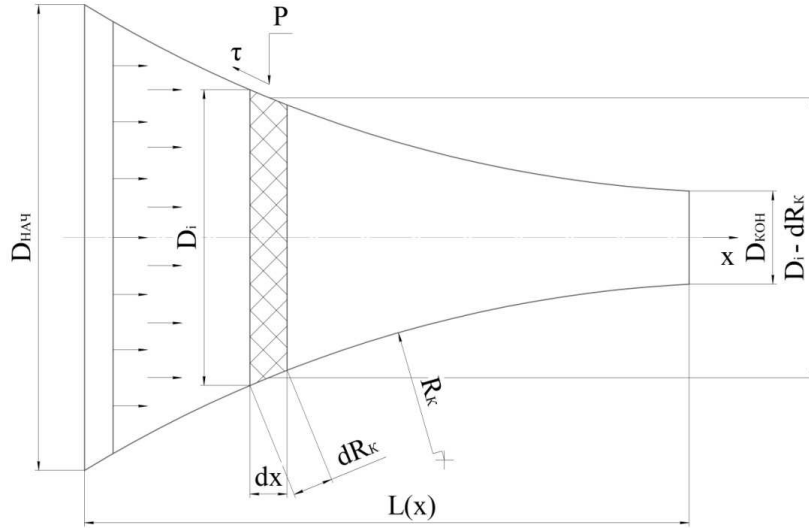


Рис. 4. Расчетная схема к определению расхода смесительной камеры

Аналитические исследования ряда авторов [13-15] показали, что при теоретическом определении величины производительности конфузورных пневматических устройств первым составляющим уравнения (1) пренебрегаем из-за его малости. Будем иметь в виду, что скорость двухфазного потока внутри смесительной камеры пневмосмесителя будет увеличиваться по ее длине в виду нелинейного изменения ее поперечного сечения [16].

С учетом вышеизложенного упростим выражение (1), умножив его на g и ρ^2 :

$$\rho \cdot dP = \xi \frac{\rho^2 \cdot V^2 dx}{2D_i} - \frac{\rho^2 \cdot V dV}{2}. \quad (6)$$

В полученное выражение (6) подставим из выражения (5) величину V :

$$\rho \cdot dP = \xi \frac{2 Q_m^2}{\pi^2 \rho^2 \cdot D_i^4} \frac{\rho^2 \cdot dx}{D_i} - \frac{\rho^2 \cdot V dV}{2}. \quad (7)$$

Из выражения (3) получим формулу для определения плотности энергоносителя ρ :

$$\rho = \frac{P}{z \cdot R \cdot T}. \quad (8)$$

Произведем подстановку полученного выражения (8) в (7):

$$\frac{P \cdot dP}{z \cdot R \cdot T} = \xi \frac{2 Q_m^2}{\pi^2 \cdot D_i^5} dx - \frac{\rho^2 \cdot V dV}{2}. \quad (9)$$

Полученное дифференциальное уравнение (9) проинтегрировали по давлению P и скорости V :

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{P \cdot dP}{z \cdot R \cdot T} + \int_{V_1}^{V_2} \frac{\rho^2 \cdot V dV}{2} = \xi \frac{2 Q_m^2}{\pi^2 \cdot D_i^5} \int_0^L dx, \quad (10)$$

$$\text{или} \quad \frac{P_2^2 - P_1^2}{2z \cdot R \cdot T} + \frac{\rho^2 \cdot (V_2^2 - V_1^2)}{2} = \xi \frac{2 Q_m^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot D_i^5}, \quad (11)$$

здесь P_1 , P_2 и V_1 , V_2 – соответственно давление (Па) и скорость (м/с) в начале и конце смесительной камеры.

Окончательно выразим массовый расход энергоносителя из выражения (11):

$$Q_m = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot D_i^5 \left[\frac{(P_2^2 - P_1^2)}{2z \cdot R \cdot T} + \frac{\rho^2 \cdot (V_2^2 - V_1^2)}{2} \right]}{2\xi \cdot L}}. \quad (12)$$

Теперь определим объемный расход энергоносителя через соотношение $Q_V = Q_m/\rho$, получим:

$$Q_v = \frac{\pi \cdot \sqrt{D_i^5}}{\rho} \sqrt{\frac{\left[\frac{(P_2^2 - P_1^2)}{2z \cdot R \cdot T} + \frac{\rho^2 \cdot (V_2^2 - V_1^2)}{2} \right]}{2\xi \cdot L}}. \quad (13)$$

В результате аналитических исследований получили выражение (13), через которое можно определить объёмный расход энергоносителя, необходимого для осуществления процесса перемешивания дисперсных частиц порошкообразных материалов в смесительной камере пневматического смесителя оригинальной конструкции.

Теперь по массовым долям для различных зон пневмосмесителя определим величину плотности двухфазного потока по формуле [17, 18]:

$$\frac{1}{\rho_p} = \frac{M_p}{\rho_{Med}} + \frac{1 - M_p}{\rho_{t_{cp}}}, \quad (14)$$

где $\rho_{см}$ – плотность двухфазного потока, кг/м³; ρ_{Med} – усредненная плотность перемешиваемых компонентов, кг/м³; M_p – масса твердого вещества на единицу массы энергоносителя, кг/кг; $\rho_{t_{cp}}$ – плотность энергоносителя при $t_{cp} = \frac{T_{вх} + T_{вых}}{2}$, кг/м³ [19];

$T_{вх}$ – температура материала на входе в смесительную камеру, °К; $T_{вых}$ – температура материала на выходе из смесительной камеры, °К.

Окончательное выражение для определения производительности пневмосмесителя по дисперсным материалам в объеме энергоносителя (после подстановки (14) в (13)) будет иметь вид:

$$Q_v = \frac{\pi \cdot \sqrt{D_i^5} \cdot \rho_{Med} \cdot \rho_{t_{cp}}}{M_p \cdot \rho_{t_{cp}} + \rho_{t_{cp}} (1 - M_p)} \sqrt{\frac{\left[\frac{(P_2^2 - P_1^2)}{2z \cdot R \cdot T} + \frac{\rho^2 \cdot (V_2^2 - V_1^2)}{2} \right]}{2\xi \cdot L}}. \quad (15)$$

Теперь определим потребляемую мощность пневмосмесителя по эмпирической формуле в зависимости от параметров работы компрессора [20]:

$$N_{\Sigma} = P_{кам} \cdot V_{кам} \cdot n_{комп}, \quad (16)$$

здесь $P_{кам}$ – максимальное давление в смесительной камере агрегата, Па; $V_{кам}$ – рабочий объем смесительной камеры, м³; $n_{комп}$ – частота вращения вала электродвигателя компрессорной установки, 1/с.

Формула (16) описывает потребляемую пневмосмесителем мощность, устанавливая связь между рабочими характеристиками компрессорной установки сжатого воздуха и конструктивно-технологическими параметрами самого агрегата. Совместное использование выражений (15) и (16) позволяет рассчитать удельные энергозатраты на процесс смешивания в разработанном пневмосмесителе при производстве сухих строительных смесей.

Для оценки адекватности полученной методики расчета производительности и потребляемой мощности пневмосмесителя проведем верификацию расчетных результатов этих параметров с экспериментальными значениями исследуемых показателей.

Результаты и их обсуждение. В ходе теоретических изысканий было использовано эмпирическое уравнение (16), предназначенное для расчета требуемой мощности компрессора (пневмосмесителя). Экспериментальные исследования заключались в измерении фактической потребляемой электрической мощности электропривода компрессора в зависимости от варьируемых параметров, с последующим сопоставлением полученных данных с теоретическими расчетами мощности по смесителю в зависимости от величины давления в его смесительной камере. На рисунке 5 приведена величина (максимального) давления внутри помольной камеры, определенная численными методами в программе SolidWorks [21]. Данные по показателю давления (100 кПа), полученные численным расчетом аэродинамика смесительной камеры, были использованы при расчете теоретической потребляемой мощности и производительности пневматического смесителя оригинальной конструкции.

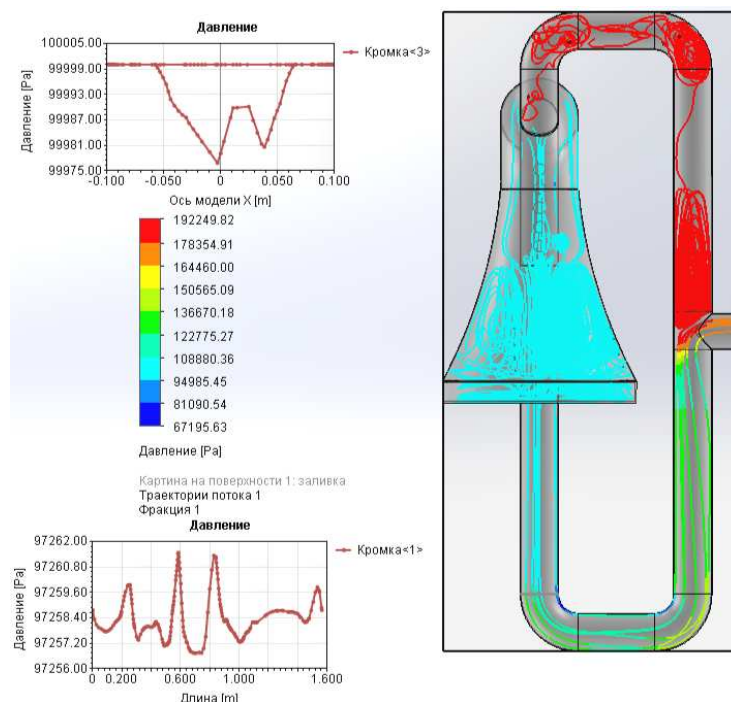


Рис. 5. Численный расчет давления внутри смесительной камеры, выполненный в программе SolidWorks

На рисунке 6 представлена динамика мгновенной потребляемой электрической мощности привода компрессора в зависимости от создаваемого внутри смесительной камеры давления. Теоретическая зависимость была построена на основе формулы (16).

Разработанная методика расчета параметров пневматического смесителя позволяет создать оборудование высокой эффективности и надежности. Внедрение таких систем способствует снижению эксплуатационных затрат за счет уменьшения энергопотребления, повышения качества перемешиваемых материалов и расширения возможностей автоматизации технологических процессов.

Рисунок 7 демонстрирует графики зависимости производительности от давления в камере смешения. Эти графики построены как на основе теоретических расчетов, выполненных согласно формуле (15), так и на основе эмпирических данных, собранных в ходе экспериментальных и численных исследований пневмосмесителя и процессов в нем. Отмечено, что расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями потребляемой пневмосмесителем мощности и производительности не превышает 7%.

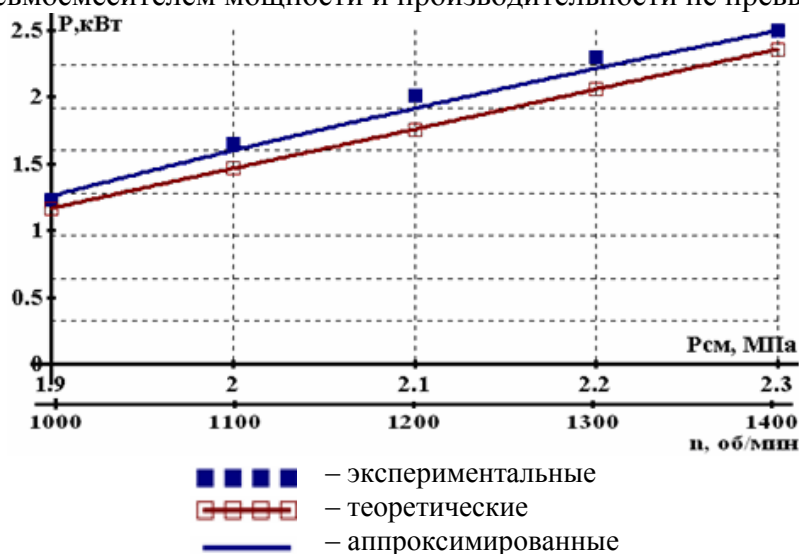


Рис. 6. Значения потребляемой мощности пневмосмесителя

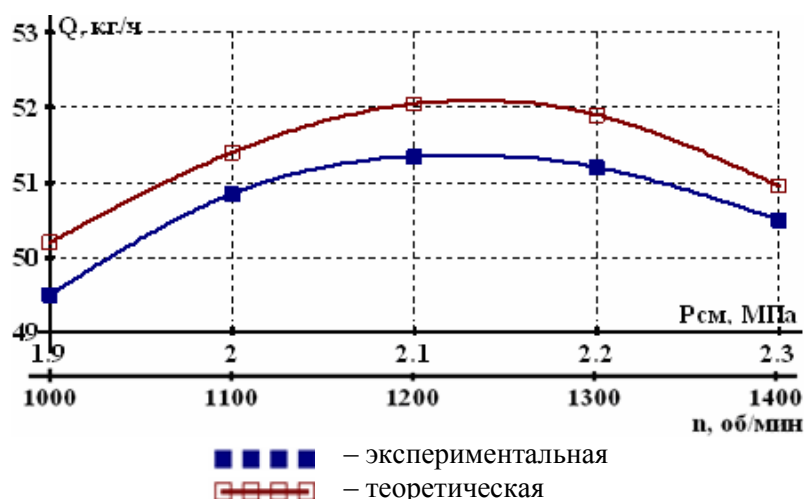


Рис. 7. Зависимость производительности пневмосмесителя от параметров давления в смесительной камере

Кроме того, полученные результаты позволяют внедрять индивидуальные или модульные конструкции, что обеспечивает гибкость в условиях производства и технологические преимущества для различных отраслей. Разработка оригинальных конструкций с точными расчетами также упрощает стандартизацию и сертификацию оборудования, а проведение комплексных расчетов помогает снизить риск выхода оборудования из строя и повысить его эксплуатационный срок.

Выводы. Разработана методика расчета конструктивно-технологических и энергосиловых параметров пневматического смесителя оригинальной конструкции. Получены выражения для определения массового расхода энергоносителя в пневмосмесителе и расчета объемного расхода двухфазного потока смесительной камеры агрегата. Установлена зависимость производительности пневмосмесителя от параметров давления в смесительной камере, а также проведен сравнительный анализ теоретических и экспериментальных значений потребляемой мощности агрегата. Определено расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями потребляемой пневмосмесителем мощности и производительности, которое не превышает 7%.

Список литературы

1. Киселева В.С., Свестельник Е.А., Исаева А.Р. Обзорный анализ конструкций пневмосмесителей // Вестник Коломенского института (филиала) Московского политехнического университета: сборник научных трудов. – М.: Московский Политех, 2025. – С. 354-359.
2. Фадин Ю.М., Шеметова О.М. Сухие строительные смеси и смесительное оборудование для их производства // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – №12. – С. 145-150. – doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-12-145-150.
3. Orekhova T.N., Nosov O.A., Prokopenko V.S., Kachaev A. E. Complex modeling of technological processes in pneumatic mixers for production of dry construction mixtures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 327, iss. 2, p. 022084. doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022084.
4. Лымарь И.А., Лозовая С.Ю., Лозовой Н.М., Самсонова П.С. Силовой расчет взаимодействия рабочего органа с компонентами смеси в смесителе периодического действия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – №2. – С. 438-445.
5. Orekhova T.N., Prokopenko V.S., Okushko V.V., Kachaev A.E. The rotating layer mechanics of polydisperse particles in the continuous action pneumatic mixers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 698, iss. 2, p. 022023. doi.org/10.1088/1757-899X/698/2/022023.
6. 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.
7. Трофимов А.С., Кочарян Е.В., Василенко В.А. Регуляризация уравнений нестационарного движения газа в трубе // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2006. – №3(57). – С. 53-55.
8. Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Гончаров Е.И. Аэродинамические особенности пневмосмесителей для производства сухих строительных смесей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – №11. – С. 149-155.
9. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 2005. – 690 с.

10. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха: учебник. – СПб.: АВОК Северо-Запад, 2005. – 399 с.
11. Севостьянов В.С., Уральский В.И., Севостьянов М.В. Ресурсо-энергосберегающее оборудование и комплексы для переработки природных и техногенных материалов. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. – 315 с.
12. Мухаметзянова А.Г., Бронская В.В. CFD-моделирование гидродинамики потока в статических смесителях Sulzer SMRX // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – №9. – С. 65-67.
13. Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Окушко В.В., Шестаков Ю.Г. Механика взвешенного слоя с полидисперсными частицами в пневмосмесителях непрерывного действия // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – №3. – С. 121-127. – doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127.
14. Фадин Ю.М., Шеметова О.М., Шеметов Е.Г. Исследование процесса смешения в пневмосмесителе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 10. – С. 170-174. – doi.org/10.24412/2071-6168-2021-10-170-175.
15. Пирожков А.В. Анализ конструкций смесителей для производства противогололедных смесей // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: БГТУ, 2021. – С. 2228-2233.
16. 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.
17. Maher D., Hana A., Habib S. Новые формулы для расчета потерь давления в двухфазном потоке, разработанные на основе модели гомогенных потоков // Теплоэнергетика. – 2020. – № 2. – С. 20-35. – doi.org/10.1134/S0040363620020034.
18. Алешков М.В., Волгина Л.В. Кинематические характеристики двухфазных потоков при гидроабразивной резке // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14, №12. – С. 1610-1618. – doi.org/10.22227/1997-0935.2019.12.1610-1618.
19. Мельников В.П., Аникин Г.В., Ишков А.А., Андрианов И.Е. Исследование двухфазных потоков диоксида углерода при охлаждении грунтов горизонтальной испарительной системой // Криосфера Земли. – 2019. – Т. 23, №6. – С. 47-56. – doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-6(47-56).
20. Галеркин Ю.Б., Рекстин А.Ф., Солдатов К.В., Дроздов А.А. Особенности газодинамического проектирования центробежных компрессоров для газовой промышленности // Компрессорная техника и пневматика. – 2015. – № 5. – С. 6.
21. Лунева С.К. Моделирование процессов тепломассопереноса в программной среде solidworks/flowsimulation // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2018. – №2(44). – С. 27-31.

References

1. Kiseleva V.S., Svestnik E.A., Isaeva A.R. Review analysis of pneumatic mixer designs // Bulletin of the Kolomna Institute (branch) of Moscow Polytechnic University: collection of scientific papers. – M.: Moscow Polytech, 2025. – P. 354-359.
2. Fadin Yu.M., Shemetova O.M. Dry construction mixes and mixing equipment for their production // Bulletin of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2020, no. 12, pp. 145-150. doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-12-145-150.
3. Orekhova T.N., Nosov O.A., Prokopenko V.S., Kachaev A. E. Complex modeling of technological processes in pneumatic mixers for production of dry construction mixtures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 327, iss. 2, p. 022084. doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022084.
4. Lymar I.A., Lozovaya S.Yu., Lozovoy N.M., Samsonova P.S. Force calculation of the interaction of the working element with the components of the mixture in a batch mixer // News of Tula State University. Technical sciences. 2020, no. 2, pp. 438-445.
5. Orekhova T.N., Prokopenko V.S., Okushko V.V., Kachaev A.E. The rotating layer mechanics of polydisperse particles in the continuous action pneumatic mixers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, vol. 698, iss. 2, p. 022023. doi.org/10.1088/1757-899X/698/2/022023.
6. Patent No. 141488 RU. Countercurrent 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.
7. Trofimov A.S., Kocharyan E.V., Vasilenko V.A. Regularization of equations of unsteady gas motion in a pipe // News of higher educational institutions. Oil and Gas. 2006, no. 3(57), pp. 53-55.
8. Kachaev A.E., Orekhova T.N., Goncharov E.I. Aerodynamic features of pneumatic mixers for the production of dry construction mixtures // Bulletin of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2017, no. 11, pp. 149-155.
9. Idelchik I.E. Handbook of Hydraulic Resistances. – M.: Mechanical Engineering, 2005. – 690 p.
10. Stefanov E.V. Ventilation and Air Conditioning: Textbook. – SPb.: AVOK Severo-Zapad, 2005. – 399 p.
11. Sevostyanov V.S., Uralskiy V.I., Sevostyanov M. V. Resource-saving equipment and complexes for processing natural and man-made materials. – Belgorod: Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2017. – 315 p.

12. Mukhametzyanova, A.G., Bronskaya V.V. CFD-modeling of flow hydrodynamics in Sulzer SMRX static mixers // Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region. 2021, no. 9, pp. 65-67.
13. Kachaev A.E., Orekhova T.N., Okushko V.V., Shestakov Yu.G. Mechanics of a suspended bed with polydisperse particles in continuous pneumatic mixers // Bulletin of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2020, no. 3, pp. 121-127. doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-3-121-127.
14. Fadin Yu. M., Shemetova O. M., Shemetov E. G. Study of the mixing process in a pneumatic mixer // News of the Tula State University. Technical sciences. 2021, no. 10, pp. 170-174. doi.org/10.24412/2071-6168-2021-10-170-175.
15. Pirozhkov A.V. Analysis of mixer designs for the production of anti-icing mixtures // International scientific and technical conference of young scientists of BSTU n.a. V.G. Shukhov. – Belgorod: BSTU, 2021. – P. 2228-2233.
16. 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.
17. Maher D., Hana A., Habib S. New formulas for calculating pressure losses in a two-phase flow, developed based on the homogeneous flow model // Thermal Power Engineering. 2020, no. 2, pp. 20-35. doi.org/10.1134/S0040363620020034.
18. Aleshkov M.V., Volgina L.V. Kinematic characteristics of two-phase flows during waterjet cutting // Bulletin of MGSU. 2019, vol. 14, no. 12, pp. 1610-1618. doi.org/10.22227/1997-0935.2019.12.1610-1618.
19. Melnikov V.P., Anikin G.V., Ishkov A.A., Andrianov I.E. Study of two-phase carbon dioxide flows during soil cooling by a horizontal evaporation system // Earth's Cryosphere. 2019, vol. 23, no. 6, pp. 47-56. doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-6(47-56).
20. Galerkin Yu.B., Rekstin A.F., Soldatova K.V., Drozdov A.A. Features of gas-dynamic design of centrifugal compressors for the gas industry // Compressor technology and pneumatics. 2015, no. 5, p. 6.
21. Luneva S. K. Modeling of heat and mass transfer processes in the solidworks/flowsimulation software environment // Technical and technological problems of service. 2018, no. 2(44). pp. 27-31.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Качаев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом эксплуатации гидромелиоративных систем и гидротехнических сооружений	Kachaev Aleksandr Evgenievich – candidate of technical sciences, head of the Department of operation of irrigation systems and hydraulic structures
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
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
Чемеричко Галина Ивановна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механического оборудования	Chemerichko Galina Ivanovna – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of mechanical equipment
doctor_cement@mail.ru	

Получена 10.12.2025