

## ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕОДНОРОДНОСТИ СМЕСИ В ПНЕВМАТИЧЕСКОМ СМЕСИТЕЛЕ

*Шеметова О.М., Фадин Ю.М., Анциферов С.И., Загороднюк Л.Х., Аль Мамури Саад К.Ш.*  
*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород*

**Ключевые слова:** пневмосмеситель, смешивание, строительные смеси, смеситель, совершенствование, сухие строительные смеси, исследования, лабораторные эксперименты.

**Аннотация.** Планирование экспериментов для проведения лабораторных исследований позволяет использовать минимальное необходимое число проведенных опытов, предварительно выбрав те условия, которые оптимизируют выходные параметры. Необходимо исследовать влияние наиболее существенных факторов на процесс пневматического перемешивания и получения достаточной однородности готовой смеси, но при этом не усложнив процесс трудоемкости процесса проведения лабораторных экспериментов и обработки полученных данных. Во время процесса перемешивания в камере пневматического смесителя происходит взаимное распределение частиц разных компонентов, которые перед перемешиванием могут находиться как по отдельности, так и в неравномерно введенном состоянии. По итогу смешивания получим такую смесь, когда в любой ее точке частицы других компонентов примыкают к каждой частице одного из компонентов в количествах, определяемых заданным соотношением компонентов.

## CARRYING OUT LABORATORY STUDIES TO DETERMINE THE HETEROGENEITY OF THE MIXTURE IN THE PNEUMATIC MIXER

*Shemetova O.M., Fadin Yu.M., Antsiferov S.I., Zagorodniuk L.Kh., Al Mamouri Saad K.Sh.*  
*Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod*

**Keywords:** pneumatic mixer, mixing, construction mixtures, mixer, improvement, dry building mixtures, research, laboratory experiments.

**Abstract.** Planning experiments for laboratory research allows using the minimum required number of experiments, pre-selecting those conditions that optimize the output parameters. It is necessary to investigate the influence of the most significant factors on the process of pneumatic mixing and obtaining sufficient homogeneity of the finished mixture, but at the same time without complicating the laboriousness of the process of conducting laboratory experiments and processing the data obtained. During the mixing process in the chamber of the pneumatic mixer there is a mutual distribution of particles of different components, which before mixing can be either separately or in an unevenly introduced state. As a result of mixing, we obtain such a mixture when, at any point in it, particles of other components adjoin each particle of one of the components in quantities determined by a given ratio of components.

**Введение.** Для подтверждения качества смешения материала в пневматическом смесителе со спиральной энеггнесущей трубкой необходимо проведение исследований в лабораторных условиях, в результате которых можно будет определить технологические и эксплуатационные характеристики [1-3].

**Материалы и методы исследований.** Проведение лабораторных экспериментальных исследований необходимо для определения влияния параметров разработанной конструкции пневматического смесителя со спиральной энеггнесущей трубкой и режимов его работы на процесс смешения сухих мелкодисперсных смесей, а также проверки адекватности теоретических исследований. Задачами исследования являются определение рациональных конструктивных параметров рассматриваемого устройства, оптимизация процесса смешения в пневматическом смесителе со спиральной энеггнесущей трубкой для достижения максимального эффекта процесса пневмосмешения [4-8].

Последовательность проведения экспериментов для исследования процесса пневмосмешения представлен в виде алгоритма (рис. 1).



Рис. 1. Последовательность проведения экспериментальных исследований

Определим этапы проведения экспериментального исследования пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой в лабораторных условиях для выполнения поставленных задач:

- создание лабораторной установки для изучения процесса смешения в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой;
- определение варьируемых параметров и контроль проведения экспериментов;
- определение критериев оценки качества готовой продукции после смешения компонентов в пневматическом смесителе;
- проведение экспериментов, получение и анализ экспериментальных данных;
- сравнение полученных в ходе экспериментов данных с теоретическими.

На рисунке 2 изображена лабораторная установка пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой.

Пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой работает следующим образом. Питание пневматического смесителя осуществляется при помощи энергоносителя (сжатого воздуха). Для получения сжатого воздуха использовался компрессор, который оснащен трехфазным асинхронным электродвигателем, реле давления и ресивером. От ресивера по магистрали воздух через сопло подавался в узлы пневматического смесителя. Компоненты для перемешивания, подаются через шнековый дозатор в корпус 1 пневматического смесителя для мелкодисперсных сыпучих материалов через загрузочный патрубок 2. В корпусе 1 материал подхватывается энергоносителем, подающимся одновременно с материалом и истекающим из отверстий в спиральной энергонесущей трубке 3 вытянутой вниз в виде усеченного конуса, которая закреплена при

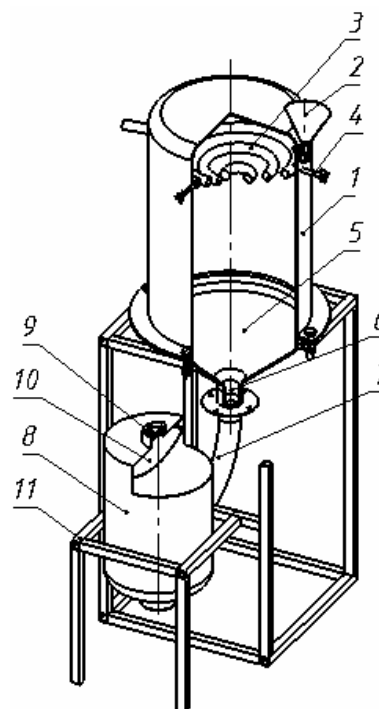


Рис. 2. Пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой: 1 – камера; 2 – загрузочный патрубок; 3 – спиральная энергонесущая трубка; 4 – держатели; 5 – коническое днище; 6 – выгрузочный патрубок; 7 – труба; 8 – бункер; 9 – вентилятор; 10 – фильтр; 11 – рама

помощи держателей 4. За счет вытягивания спиральной энергоносительной трубки 3 конусом вниз увеличивается площадь взаимодействия энергоносителя с компонентами перемешивания в корпусе 1 смесителя перемешивания, что обеспечивает повышение качества готового продукта за счет интенсификации процесса смешивания. В коническом днище 5 создается разрежение, и после цикла перемешивания, готовая смесь выходит через выгрузочный патрубок 6. После смесь проходит через трубу 7 и попадает в бункер 8, где происходит обеспыливание, в следствие чего энергоноситель при помощи вентилятора 9 уходит через патрубок предварительно очищаясь проходя через фильтр 10. Обеспыленная готовая смесь выходит через выходной патрубок бункера (на схеме не показан) и уходит либо далее по технологической линии или упаковывается и отправляется на склад. Пневматический смеситель с бункером стоит на раме 11 [9, 10].

**Результаты.** Во время проведения лабораторных исследований были определены основные показатели эффективности работы пневматического смесителя со спиральной энергоносительной трубкой. Для определения однородности готовой смеси после смешения в пневматическом смесителе проводим эксперименты с варьируемыми параметрами ( $\psi$  – коэффициент загрузки материала (%),  $H$  – шаг спирали (мм),  $n$  – количество отверстий на спирали (шт.),  $P$  – давление в камере смешения, (МПа)).

Анализ неоднородности смеси был проведен на основании статистической обработки результатов полученные в ходе экспериментальных лабораторных исследований:

$$V_c = 5,57 - 0,333 \cdot x_1 - 0,75 \cdot x_2 + 0,083 \cdot x_3 + 0,083 \cdot x_4 + 1,33 \cdot x_1^2 + 0,33 \cdot x_2^2 - 0,16 \cdot x_3^2 - 0,414 \cdot x_4^2 - 0,5 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,5 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,625 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,125 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,5 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,25 \cdot x_3 \cdot x_4. \quad (1)$$

В натуральном виде получим уравнение:

$$V_c = 9,45 - 0,095 \cdot P - 0,52 \cdot n + 0,352 \cdot \psi + 0,095 \cdot H + 0,00053 \cdot P^2 + 0,0033 \cdot n^2 - 0,0016 \cdot \psi^2 - 0,0041 \cdot H^2 + 0,001 \cdot P \cdot n - 0,001 \cdot P \cdot \psi - 0,00125 \cdot P \cdot H - 0,00125 \cdot n \cdot \psi + 0,005 \cdot n \cdot H + 0,0025 \cdot \psi \cdot H. \quad (2)$$

Из уравнения (1) следует, что на коэффициент неоднородности  $V_c$  оказывает влияние количество отверстий на спиральной энергоносительной трубке  $n$ . Давление, коэффициент загрузки материала и шаг спирали, оказывают меньше влияние на коэффициент неоднородности. То, что факторы воздействия  $P$  и  $n$  имеют отрицательный характер, давления и количества отверстий коэффициент неоднородности смеси уменьшается. Факторы  $\psi$  и  $H$  имеют положительный знак, то есть, при увеличении коэффициента загрузки материала и шага спирали, коэффициент неоднородности будет увеличиваться. Сочетание факторов давления и шага спирали оказывают наибольшее влияние на коэффициент неоднородности смеси, поскольку эти параметры имеют непосредственное влияние на готовность смеси. Влияние количества отверстий на спиральной трубке при увеличении количества отверстий мы получаем более интенсивное воздействия на смешиваемую среду.

На рисунке 3,а представлена зависимость  $V_c = f(P)$ , при его анализе видно, что при увеличении давления от 50 до 150 кПа коэффициент неоднородности падает, а при давлении с 150 до 200 кПа происходит возрастание. Это объясняется тем, что при маленьком давлении в камере смесителя на материал энергоноситель влияет недостаточно. С увеличением давления процесс смешивания становится более интенсивным и увеличивается количество перемещения материала по камере смесителя. При задании давления  $P=250$  кПа результат приводит к увеличению коэффициента неоднородности до максимального значения  $V_c=10,69$ , но дальнейшее увеличение давления в камере приведет к перерасходу энергоносителя. При количестве отверстий на спирали  $n=25$  шт. и давлении  $P=250$  кПа показатель коэффициента неоднородности равен  $V_c= 10,12\%$ , но с увеличением количества отверстий, качество смеси повышается.

На рисунке 3,б представлены зависимости  $V_c = f(P)$  при значениях  $n=35$  шт и  $H=20$  мм. При давлении 150 кПа и коэффициенте загрузки материала  $\psi=50\%$ , наблюдается минимальное значение коэффициента неоднородности  $V_c = 4,75\%$ . Далее наблюдается увеличение коэффициента неоднородности до  $V_c = 11,5\%$  при увеличении давления. При

количестве отверстий на спирали 35 шт и шаге спирали 30 мм материал при увеличении давления и коэффициента загрузки материала, движение компонентов смеси в пневматическом смесителе начинает затрудняться за счет переполнения камеры смешения компонентами и воздействия избыточного давления на взаимодействие частиц с друг другом, при котором ухудшается и качественное состояние смеси.

Максимальные значения  $V_c = 13,22\%$  при минимальном значении давления в камере 50 кПа и коэффициенте загрузки материала  $\psi = 90\%$ , можно объяснить высоким коэффициентом загрузки камеры при работе. При постоянном параметре количества отверстий на спирали и шаге спирали, но увеличивая давление в камере, смесь быстро доходит до состояния готовности, но ведет к перерасходу энергоносителя и работы пневматического смесителя впустую.

Зависимость коэффициента неоднородности  $V_c = f(P)$  представленный на рисунке 3,в, при шаге спирали  $H = 30$  мм коэффициента неоднородности  $V_c$  при повышении давления от 50 до 150 кПа уменьшается до значения  $V_c = 5,58\%$ , а затем в промежутке от 150 до 250 кПа возрастает до  $V_c = 10,12\%$ . Это объясняется тем, что при давлении равном по кПа происходит недостаточное воздействие энергоносителя на материал, а при значительном увеличении давления в камере начиная с 200 кПа на материал действует высокое давление, что влияет на качество смешения компонентов. При усредненных значениях давления  $P = 150$  кПа коэффициент неоднородности принимает минимальные значения, это достигается за счет того, что при таком давлении смешивание происходит равномерно и без помех в виде высокого давления приближенного избыточному и перерасхода энергоносителя. Такое явление сохраняется при всех значениях шага спирали. Наилучший показатель коэффициента неоднородности  $V_c = 4\%$  достигается при работе смесителя с параметрами: давления в камере  $P = 150$  кПа, шага спирали  $H = 10$  мм а также коэффициента загрузки материала  $\psi = 70\%$  и количества отверстий на спиральной трубке  $n = 35$ .

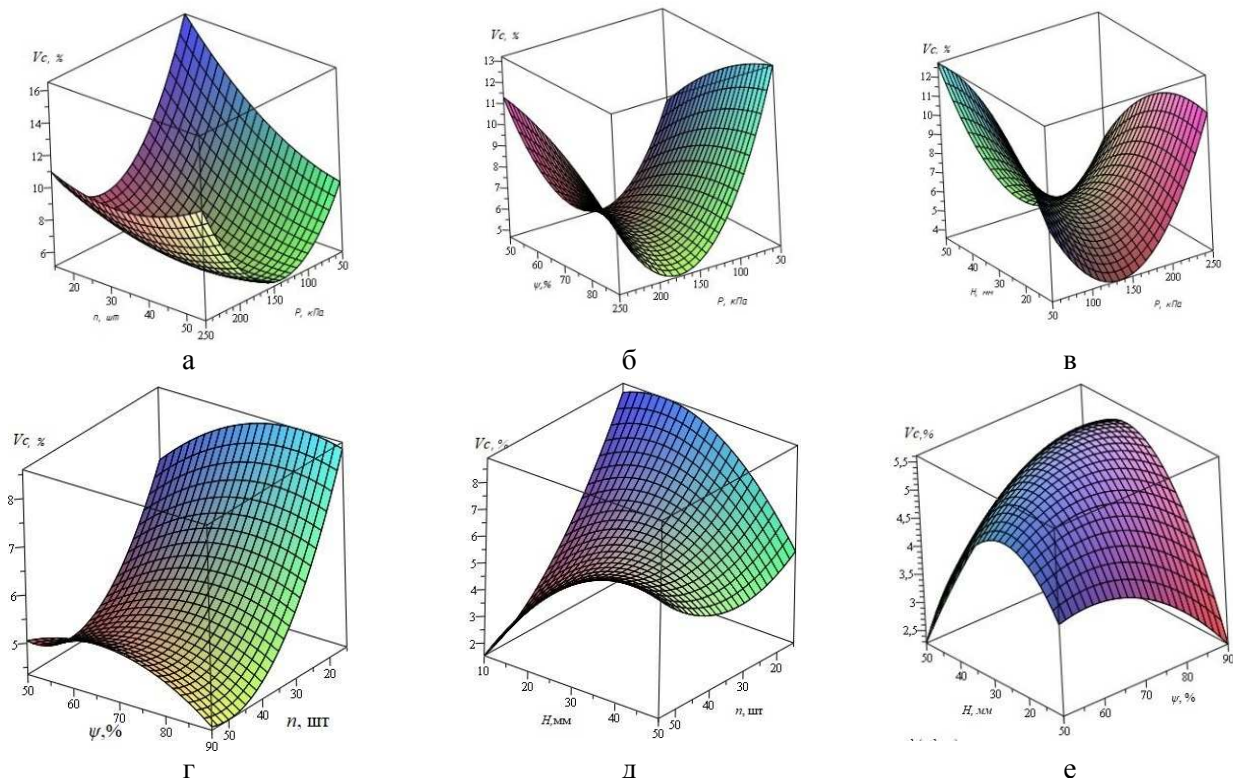


Рис. 3. 3-х мерное изображение графика зависимости  $V_c = f(P)$  при: а)  $\psi = 70\%$  и  $H = 30$  мм; б)  $n = 35$  шт. и  $H = 30$  мм; в)  $n = 35$  шт. и  $\psi = 70\%$ ; г)  $P = 150$  кПа и  $H = 30$  мм; д)  $P = 150$  кПа и  $\psi = 70\%$ ; е)  $P = 150$  кПа и  $n = 35$  шт

На рисунке 3,г представлена зависимость  $V_c = f(n)$ , где можно увидеть, что на протяжении кривой при увеличении отверстий на спиральной энергоносительной трубке от 15 до

45 шт. коэффициента неоднородности уменьшается, а в промежутке количества отверстий от 45 до 55 шт. коэффициента неоднородности увеличивается, и наибольшее значение коэффициента неоднородности  $V_c=8,46\%$  получается при количестве отверстий на спиральной трубке  $n = 15$  шт. и коэффициента загрузки материала  $\psi=90\%$ , минимальное значение коэффициента неоднородности  $V_c=4,42\%$  достигаются при количестве отверстий на спиральной трубке  $n = 55$  шт и коэффициента загрузки материала  $\psi=90\%$ . При среднем значении давления и шага спирали происходит равномерное распределение компонентов по всему объему камеры смешения.

На рисунке 3,д представлена зависимость  $V_c = f(n)$  где график показывает убывающий характер при количестве отверстий на спирали с 15 до 55 шт и шаге спирали  $H=10$  и  $H=30$  мм. За исключением кривой при шаге спирали  $H=50$  мм, где с ростом количества отверстий от 35 шт и до 55 шт начинает возрастать показатель неоднородности, что показывает при увеличении значения  $n$  при шаге спирали  $H=50$  мм происходит увеличение воздействия энергоносителя на смешиваемый материал и большом промежутке между витками спирали энергоноситель равномерно распределен по камере смешения, но недостаточно воздействует на материал. При установке максимального значения значения количества отверстий на спиральной трубке и низких показателях шага спирали значение коэффициента неоднородности максимальное  $V_c=1,5\%$ . Уменьшая количество отверстий на спиральной трубке до  $n=15$  шт. при шаге спирали равном  $H=10$  мм коэффициента неоднородности уменьшается с  $V_c=1,5\%$  до  $8,5\%$ , в связи с менее равномерным распределением частиц материала по всему объему камеры смесителя.

На рисунке 3,е показана зависимость  $V_c = f(\psi)$ , где наблюдается убывание графика при значениях шага спирали  $H=10$  мм и  $H=30$  мм. Данный факт объясняется тем, что с увеличением коэффициента загрузки материала и шаге спирали до 30 мм, смесь достигает более качественного состояния. При шаге спирали равной  $H=10$  мм показатели неоднородности смеси самые хорошие и достигают  $V_c=2,28\%$ . При шаге спирали  $H=50$  мм коэффициент неоднородности ухудшается за счет недостаточного воздействия на материал энергоносителем при широком шаге спирали по камере смешения.

**Выводы.** Можно сделать вывод о том, что при правильно подобранных параметрах давления, количества отверстий на спиральной трубке, коэффициента загрузки и шага витка спирали можно добиться оптимальных значений коэффициента неоднородности смеси при работе пневматического смесителя без перерасхода энергетических параметров.

**Благодарности и финансирование.** Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

#### Список литературы

1. Богданов В.С., Ильин А.С., Семикопенко И.А. Основные процессы в производстве строительных материалов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 551 с.
2. Шеметова О.М., Фадин Ю.М. Сухие строительные смеси и смесительное оборудование для их производства // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – №12. – С. 145-150.
3. Chatterjee S. Regression Analysis by Example (5th Edition). 2013. 424 p.
4. Богданов В.С., Бражник Ю.В., Несмеянов Н.П., Горшков П.С. Пути увеличения степени однородности сухих строительных смесей с целью формирования максимального их качества // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – №4. – С. 62-64.
5. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
6. Красовский Г.И. Планирование эксперимента. – Минск.: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
7. Патент №204403 РФ. Пневмосмеситель для сыпучих материалов со спиральной энергоносительной трубкой/ Фадин Ю.М., Воронов В.П., Шеметова О.М., Шеметов Е.Г., Лазько Е.В. – Заявка №2020136892 от 10.11.2020; опубл. 10.11.2020, Бюл. №15.
8. Шеметова О.М., Фадин Ю.М., Богданов В.С. Получение однородных мелкодисперсных смесей в пневмосмесителе // СТИН. – 2022. – №3. – С. 22-24.

9. Мизонов В.Е. Новый подход к моделированию и оптимизации процессов в сыпучих материалах // Каталог 3-го Ивановского инновационного салона «Инновации-2006». – Иваново, 2006. – С. 119-120.
10. Демин О. В. Экспериментальное исследование процесса смешения сыпучих материалов в смесителях // VI научная конференция. – Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2001. – С. 204.

#### References

1. Bogdanov V.S., Ilyin A.S., Semikopenko I.A. The main processes in production of building materials. – Belgorod: Publ. house of BSTU, 2008. – 551 p.
2. Shemetova O.M., Fadin Yu.M. Dry building 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.
3. Bogdanov V.S., Brazhnik Yu.V., Nesmeyanov N.P., Gorshkov P.S. Ways to increase the degree of homogeneity of dry building mixtures in order to form their maximum quality // Bulletin of the Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. 2013, no. 4, pp. 62-64.
4. Zedginidze I.G. Planning an experiment for the study of multicomponent systems. – M.: Science, 1976. – 390 p.
5. Krasovsky G.I. Experiment planning. – Minsk.: Publ. house of BSU, 1982. – 302 p.
6. Mizonov V.E. A new approach to modeling and optimizing processes in bulk materials // Catalog of the 3rd Ivanovo innovation salon "Innovations-2006". – Ivanovo, 2006. – P. 119-120.
7. Demin O. V. Experimental study of the process of mixing bulk materials in mixers // VI scientific conference. – Tambov: Publ. house Tambov state technical university, 2001. – P. 204.
8. Chatterjee S. Regression Analysis by Example (5th Edition). 2013. 424 p.
9. Patent No. 204403 RU. Pneumatic mixer for bulk materials with a spiral energy-carrying tube / Fadin Yu.M., Voronov V.P., Shemetova O.M., Shemetov E.G., Lazko E.V. – Application No. 2020136892 from 10.11.2020; publ. 10.11.2020, Bull. No. 15.
10. Shemetova O.M., Fadin Yu.M., Bogdanov V.S. Obtaining homogeneous fine mixtures in a pneumatic mixer // STIN. 2022, no. 3, pp. 22-24.

#### *Сведения об авторах:*

#### *Information about authors:*

<b>Шеметова Ольга Михайловна</b> – аспирантка	<b>Shemetova Olga Mikhailovna</b> – postgraduate student
<b>Фадин Юрий Михайлович</b> – кандидат технических наук, профессор	<b>Fadin Yuri Mikhailovich</b> – candidate of technical sciences, professor
<b>Анциферов Сергей Игоревич</b> – кандидат технических наук, доцент	<b>Antsiferov Sergey Igorevich</b> – candidate of technical sciences, associate professor
<b>Загороднюк Лилия Хасановна</b> – доктор технических наук, профессор	<b>Zagorodnyuk Liliya Khasanovna</b> – doctor of technical sciences, professor
<b>Аль Мамури Саад Халил Шаид</b> – аспирант	<b>Al Mamouri Saad Khalil Shadid</b> – postgraduate student
olga95kizilova@gmail.com	

Получена 23.11.2022