

Научная статья

УДК 691.555

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-126-137>

EDN: QFWFGG



СМЕШЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СМЕСЕЙ В ПНЕВМАТИЧЕСКОМ СМЕСИТЕЛЕ СО СПИРАЛЬНОЙ ЭНЕРГОНЕСУЩЕЙ ТРУБКОЙ

Аль Мамури Саад Кхалил Шадид, О. М. Шеметова, Л. Х. Загороднюк, А. Л. Бочарников*

Белгородский государственный технологический

университет им. В.Г. Шухова

г. Белгород, Россия

saad.shadeed.ss71@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6827-6976>

olga95kizilova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8916-499X>

lhz47@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9840-4414>

engineersmik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7477-803X>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Смешение сухих компонентов в смесительных аппаратах является одним из важнейших этапов любого технологического процесса при изготовлении композиционного материала. К настоящему времени в различных технологиях используется самое разнообразное смесительное оборудование, которое характеризуется различными принципами смешения и конструктивными решениями. Особый интерес для приготовления качественных и однородных смесей теплоизоляционного назначения представляет пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой. В статье приведены результаты исследований с использованием метода математического планирования полнофакторного эксперимента ПФЭЦКРП², позволяющего наиболее адекватно оценить происходящие процессы при минимизации систематических ошибок.

Материалы и методы. В работе в качестве сырьевых материалов для проведения испытаний использовали портландцемент ЦЕМ 0 42,5Н ГОСТ 31108–2020 с удельной поверхностью 308 м²/кг, песок Вольского месторождения. В качестве легкого наполнителя использовали вспученный вермикулит, полученный в результате термообработки природного вермикулита при температуре около 700 °С.

Результаты. Теплоизоляционные смеси, приготовленные в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой, обеспечивают получение теплоизоляционных растворов со стабильными показателями по плотности 1420 кг/м³, имеющие достаточные прочностные показатели при сжатии 3,3 МПа, гарантируют высокие теплозащитные свойства в строительных конструкциях.

Заключение. Разработанная конструкция и проведенные исследования позволили установить высокую эффективность предлагаемого смесителя, обеспечивающего равномерное распределение смешиваемых частиц, высокую гомогенизацию и создание условий для ускорения физико-химических взаимодействий в создаваемой смеси при последующем затворении приготовленной смеси водой и формирование требуемой внутренней структуры создаваемых композитов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: смешение, вяжущая композиция, вермикулит, портландцемент, пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой

БЛАГОДАРНОСТИ: исследование выполнено за счет гранта РНФ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и Правительства Белгородской области, Соглашение №3 от 24.03.2022.

Статья поступила в редакцию 26.12.2022; одобрена после рецензирования 15.02.2023; принята к публикации 20.02.2023.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. **Конфликт интересов отсутствует.**

Для цитирования: Аль Мамури Саад Кхалил Шадид, Шеметова О. М., Загороднюк Л. Х., Бочарников А. Л. Смешение теплоизоляционных смесей в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 126-137. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-126-137>

© Аль Мамури Саад Кхалил Шадид, Шеметова О. М., Загороднюк Л. Х., Бочарников А. Л., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-126-137>
EDN: QFWFGG

MIXING OF HEAT-INSULATING MIXTURES IN PNEUMATIC MIXER WITH SPIRAL ENERGY CARRYING TUBE

Al Mamuri Saad Khalil Shadid, Olga M. Shemetova,
Lilia Kh. Zagorodnuk, Andrey L. Bocharnikov*

V. G. Shukhov Belgorod State Technological University
Belgorod, Russia

saad.shadeed.ss71@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6827-6976>

olga95kizilova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8916-499X>

lh47@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9840-4414>

engineersmik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7477-803X>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Mixing of dry components in mixers is one of the most important stages of any technological process in the manufacture of a composite material. To date, various technologies use a wide variety of mixing equipment, which is characterized by different principles of mixing and design solutions. Of particular interest for the preparation of high-quality and homogeneous mixtures for heat-insulating purposes is a pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube. The article presents the results of studies using the method of mathematical planning of the full-factor $\Pi\Phi\Xi\zeta\text{KPP}2^4$ experiment, which makes it possible to most adequately assess the ongoing processes while minimizing systematic errors.

Materials and methods. In the work, ЦЕМ 0 42,5Н ГОСТ 31108–2020 Portland cement with a specific surface area of $308 \text{ m}^2 / \text{kg}$, sand of the Volsky deposit were used as raw materials for testing. Expanded vermiculite obtained as a result of heat treatment of natural vermiculite at a temperature of about 700°C was used as a light filler.

Results. Heat-insulating mixtures prepared in a pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube ensure the production of heat-insulating mortars with stable density values of 1420 kg/m^3 , having sufficient compressive strength of 3.3 MPa, and guarantee high heat-shielding properties in building structures.

Conclusion. The developed design and the conducted studies made it possible to establish the high efficiency of the proposed mixer, which provides a uniform distribution of the particles to be mixed, high homogenization and the creation of conditions for accelerating the physicochemical interactions in the created mixture with subsequent mixing of the prepared mixture with water and the formation of the required internal structure of the created composites.

KEYWORDS: mixing, binder composition, vermiculite, Portland cement, pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube

ACKNOWLEDGEMENTS: the study was supported by the RSF grant No. 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> and the Government of the Belgorod Region, Agreement No. 3 from 03/24/2022.

The article was submitted 26.12.2022; approved after reviewing 15.02.2022; accepted for publication 20.02.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Al Mamuri Saad Khalil Shadid, Shemetova Olga M., Zagorodnuk Lilia Kh., Bocharnikov Andrey L. Mixing of heat-insulating mixtures in pneumatic mixer with spiral energy carrying tube. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (1): 126-137. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-1-126-137>

© Al Mamuri Saad Khalil Shadid, Shemetova O. M., Zagorodnuk L. Kh., Bocharnikov A. L., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Получение высококачественных сухих теплоизоляционных смесей представляет важную задачу для современных строительных технологий^{1, 2, 3} [1, 2, 3, 4, 5]. От качества приготовления сухих смесей зависят технологические, физико-механические и эксплуатационные характеристики приготавливаемого продукта^{4, 5} [6, 7, 8]. В настоящее время ученые ищут новые пути создания строительных композитов с регулируемыми свойствами, способными выдерживать физико-механические, теплотехнические и эксплуатационные нагрузки^{6, 7} [9, 10, 11, 12]. Смешение сухих компонентов в ограниченном объеме смесителя является одним из существенных элементов технологического процесса, создающего условия для равномерного распределения смешиваемых частиц, дополнительное диспергирование, гомогенизацию, в нередких условиях досушку сырьевых ингредиентов и создание потенциальных условий для ускорения физико-химических взаимодействий в смешиваемой системе при последующем затворении приготовленной смеси водой и формирование дальнейших фазовых контактов при образовании внутренней структуры композитов^{8, 9}.

К настоящему времени имеется значительное количество самых разнообразных смесителей для перемешивания различных сыпучих материалов. В технологических процессах стоимость смесителей может составлять до 40% стоимости всего оборудования.

Несмотря на положительные факторы, существующие смесители имеют определенные

недостатки. В связи с тем, что используемые сырьевые материалы и составы приготавливаемых смесей, имеющих самый широкий спектр назначения, постоянно совершенствуются и в соответствии с поставленными задачами требования к смесителям также повышаются и требуют разработки новых конструкций и технологических решений.

Смешение сухих компонентов при приготовлении различных материалов является одной из важнейших технологических операций, определяющих физико-механические и технико-экономические показатели, создаваемого композита. Эффективное развитие строительной отрасли требует создания нового эффективного оборудования, обеспечивающего высокие технико-экономические, технологические и физико-механические показатели создаваемым материалом.

Особое место среди смесителей занимают пневматические смесители. В связи с вышеизложенным особый интерес представляет пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой, отвечающий требованиям современных стандартов и безопасности труда в строительстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе в качестве сырьевых материалов для проведения испытаний использовали портландцемент ЦЕМ 0 42,5Н ГОСТ 31108–2020 с удельной поверхностью 308 м²/кг, песок Вольского месторождения (таблица 1).

¹ Фадин Ю. М., Шеметова О. М., Шеметов Е. Г., Загороднюк Л. Х., Аль Маури Саад Халил Шадид. Пневмосмеситель для сухих сыпучих материалов. Патент RU 214199 U1 14.10.2022. 7 с.

² Айнштейн В. Г., Захаров М. К., Носов Г. А., Захаренко В. В., Зиновкина Т. В., Таран А. Л., Костянян А. Е. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник: в 2 кн. М.: Логос, 2002. 912 с.

³ Альтамура В. Оборудование предприятий строительных производств. Нью-Йорк: The City University of New-York, 2003. 738 с.

⁴ Ануриев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 томах, Том 2. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.

⁵ Анциферов С. И., Пахотин Е. Г. Анализ современного рынка оборудования для производства сухих строительных смесей // Сборник. Образование, наука, производство БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. С. 1402–1405.

⁶ Кальянов Н. Н., Мерзляк А. Н. Вермикулит и перлит – пористые заполнители для теплоизоляционных изделий // Москва: Госстройиздат. 1961. 155 с.

⁷ Zhang H. Building Materials in Civil Engineering // Woodhead Publishing. UK. 2011. Vol. 1. Pp 440.

⁸ Дергунов С. А., Рубцова В. Н. Модификация сухих строительных смесей // материалы 6-й Международной научно-технической конференции «Современные технологии сухих смесей в строительстве MixBUILD». М.: АЛИТ, 2004. С. 30–35.

⁹ Орехова Т. Н., Уваров В. А. Анализ конструкций пневмосмесителей для производства сухих строительных смесей // Интерстроймех – 2010: Сб. докладов Международной научно-практической конференции. Белгород. Изд-во БГТУ, 2010. С. 92–94.

Таблица 1

Характеристики кварцевого песка Вольского месторождения

Источник: составлено авторами.

Table 1

Characteristics of quartz sand from the Volskoye deposit

Source: compiled by the authors.

Показатель						Значение			
Насыпная плотность						1468 кг/м³			
Содержание пылевидных, глинистых и илистых частиц						0,72 мас. %			
Потеря массы при прокаливании						не более 0,5%			
Содержание глинистых частиц						не более 1%			
Модуль крупности									
2,5									
Химический состав									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	ZrO ₂
96,2	2,84	0,139	0,024	0,144	0,07	0,287	0,054	0,023	0,013

Таблица 2

Химический состав вспученного вермикулита (% по массе)

Источник: составлено авторами.

Table 2

The chemical composition of expanded vermiculite (% by mass)

Source: compiled by the authors.

Химический состав, %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Прочее, %
43,3	15,3	13,4	2,2	17,4	1,3	0,4	2,6	4,1

В качестве легкого наполнителя использовали вспученный вермикулит, полученный в результате термообработки природного вермикулита при температуре около 700°C. Химический состав приведен в таблице 2.

Вермикулит имеет переслаивающиеся фазы, такие как вермикулит, флогопит и гидробиотит. Гранулы вспученного вермикулита представлены тончайшими слюдистыми пластинками, при нагревании они значительно увеличиваются в объеме, что является предпосылками для эффективного использования вермикулита в качестве наполнителя и заполнителя теплоизоляционных растворов и бетонов [4, 5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

До недавнего времени смешение считалось механическим процессом, в последние

годы исследователи установили закономерности в процессе перераспределения частиц при гидродинамическом воздействии. При получении сухих смесей отмечается образование вторичных агрегаций отдельных зерен смешиваемого порошка вследствие различий химических, физических и гранулометрических особенностей компонентов, их насыпной плотности, строением частиц, сцеплением между отдельными частицами, текучестью порошка, его абразивностью, наличием электростатического заряда и так далее.

Особое место среди существующих смесителей занимает пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой.

С целью приготовления сухих теплоизоляционных смесей была разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования процессов смешения сыпучих материалов (рисунок 1).

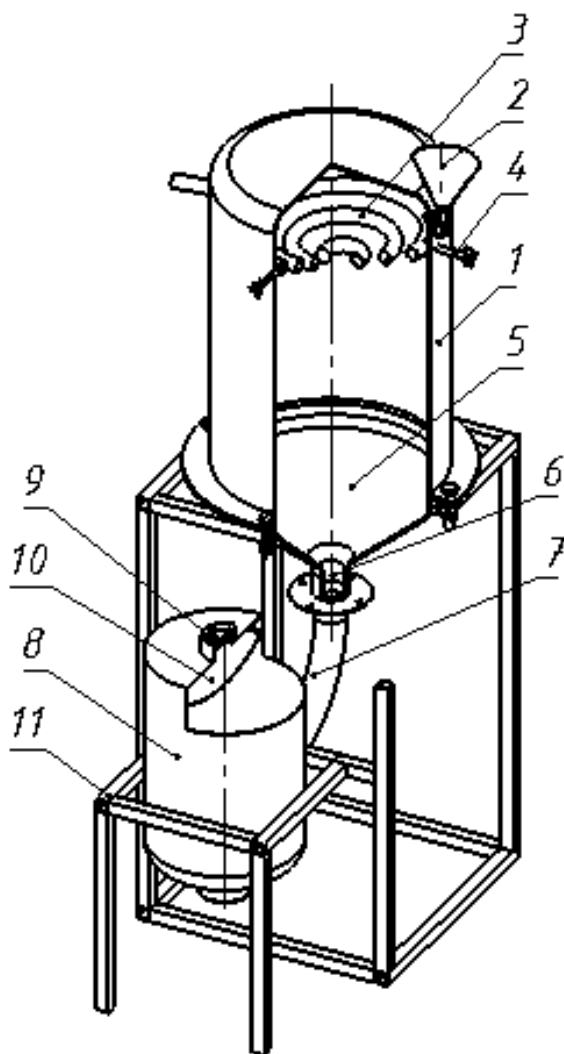


Рисунок 1 – Пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой: 1 – камера; 2 – загрузочный патрубок; 3 – спиральная энергонесущая трубка; 4 – держатели; 5 – коническое днище; 6 – выгрузочный патрубок; 7 – труба; 8 – бункер; 9 – вентилятор; 10 – фильтр; 11 – рама
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube: 1–chamber; 2 – loading pipe; 3 – spiral energy-carrying tube; 4 – holders; 5 – conical bottom; 6 – unloading pipe; 7 – pipe; 8 – bunker; 9 – fan; 10 – filter; 11–frame
Source: compiled by the authors.

Пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой характеризуется высокоэкологическими и производственными показателями. Учитывая разные показатели по плотности смешиваемых сырьевых компонентов, различные характеристики пористости и шероховатости исследуемых ингредиентов смесей, использование этого пневмосмесите-

ля предполагает получение смесей с высокими показателями по качеству и однородности. Смешиваемые материалы, поступающие в корпус смесителя в хаотично вихревом потоке, обеспечивают равномерное смешение всех компонентов смесей, включая и мелкодисперсные частицы. Вследствие особенностей строения вермикулита предполагается, что этот смеситель будет препятствовать оседанию цементных зерен в порах материала, а также равномерно распределяться по всей поверхности заполнителя, кроме того, высокие скорости энергоносителя будут способствовать лучшему смешению компонентов смеси [1].

Для проведения экспериментальных исследований была спроектирована и изготовлена лабораторная установка, в которой изучались процессы смешения различных сырьевых композиций, в том числе разработанная сухая строительная смесь для теплоизоляционных растворов.

Схема лабораторной установки и фото пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой приведена на рисунке 1 и 2.



Рисунок 2 – Лабораторная установка пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Laboratory setup of a pneumatic mixer with a spiral energy-carrying tube
Source: compiled by the authors.

Принцип работы пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой заключается в использовании энергоносителя, представленного сжатым воздухом, поступающим из компрессора 4ВУ1-5/9М, оснащенного электродвигателем, ресивером и реле давления [13, 14, 15]. Воздух, поступающий с ресивера, подается в рабочую камеру пневматического смесителя. Производительность компрессора 0,56 м³/мин, давление в камере 0,8 МПа. В установке принят электродвигатель мощностью 22 кВт. Через шнековый дозатор сухие компоненты для смешения поступают в корпус 1 пневмосмесителя, через патрубок загрузки 2. В рабочей зоне материал посредством сжатого воздуха подхватывается и одновременно с сырьём, поступающим из отверстия спиральной трубки 3, перемещается в корпус смесителя. Вследствие спиральной формы энергонесущей трубки создается большая поверхность взаимодействия сжатого воздуха с сырьевыми компонентами, что сказывается на повышении качества перемешивания конечного продукта из-за улучшения процесса смешения. В днище 5, имеющего коническую форму, создается дополнительное разрежение и по завершению процесса смешения полученная смесь разгружается посредством патрубка 6, предназначенного для выгрузки. Затем смесь перемещается через трубу 7, накапливается в бункере 8. Сжатый воздух через вентилятор 9, очищаясь, поступает в фильтр 10. Перемешанный материал через выходной патрубок упаковывается и складывается. Пневмосмеситель с бункером установлен на раме 11.

При смешении в рабочей камере пневмосмесителя происходит равномерное распределение частиц сырьевых компонентов, которые перед смешением могут находиться в различном состоянии. Цель процесса смешения заключается в получении однородной смеси, когда в любой точке смесителя частицы всех компонентов равномерно распределяются в общей массе смесителя в зависимости от принятого соотношения сырьевых компонентов.

При проведении экспериментов исследуемая смесь подвергалась перемешиванию при различных режимах работы пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой. Для определения однородности готовой смеси после смешения в пневмосмесителе были проведены эксперименты с широко варьируемыми параметрами: коэффициент загрузки – ψ , %; шаг спирали – H , мм; количество отверстий на спирали – n , шт; давление в камере смешения – P , МПа [16, 17, 18, 19].

В работе использовался метод математического планирования эксперимента, который позволил при проведении минимального количества опытов получить максимальную информацию по выходным параметрам, прочности и плотности [20, 21, 22, 23, 24, 25].

Идеализация динамической модели пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой позволяет на основе математического планирования и моделирования решить задачу оптимизации эксперимента. Для этой цели используется композиционный план полного факторного эксперимента, который позволяет получить нелинейные математические модели установки пневматического смешения [26].

Для выполнения лабораторных экспериментов принимаем план полного факторного эксперимента ПФЭЦКРП2⁴. Данный тип полного факторного эксперимента позволяет наиболее адекватно применять для исследования происходящих процессов при минимизации систематических ошибок. Математическое описание плана данного эксперимента записывается в виде уравнения регрессии^{2,3}:

$$y = a_0 + \sum_{j=1}^k a_j \cdot x_j + \sum_{u,j=1}^k a_{uj} \cdot x_u \cdot x_j + \sum_{j=1}^k a_{jj} \cdot x_j^2, \quad (1)$$

где, y – функция отклика;

a_0 – свободный коэффициент уравнения регрессии;

a_j – коэффициенты при линейной зависимости;

a_{uj} – коэффициенты при парном взаимодействии факторов;

a_{jj} – коэффициенты при квадратичном взаимодействии факторов;

x_u, x_j – исследуемые независимые переменные;

$j = 1, 2, \dots, k$; a_{jj} – квадратичные эффекты.

Значимость коэффициентов проверяется по критерию Стьюдента [4]:

$$t = \frac{|a_j|}{S_{\{b_j\}}}, \quad (2)$$

где a_j – коэффициент при факторах варьирования в уравнении регрессии;

$S_{\{b_j\}}$ – квадратичная ошибка коэффициента регрессии.

Для проверки адекватности математической модели используется критерий Фишера [5]. Во время проведения экспериментов требуется определенное количество измерений и есть вероятность возникновения как случайной погрешности, так и погрешности на контрольно-измерительных приборах.

Суммарную погрешность можно определить как⁴:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{случ}})^2 + (\sigma_{\text{приб}})^2}, \quad (3)$$

где $\Delta x_{\text{случ}}$ – случайная погрешность измерений;
 $\sigma_{\text{приб}}$ – приборная погрешность.

В качестве исследуемых факторов при проведении экспериментов при смешении сухих строительных смесей в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой принимается:

$P (x_1)$ – давление сжатого воздуха, 50–250 кПа;

$n (x_2)$ – количество отверстий на спирали, 15–55 шт;

$\psi (x_3)$ – коэффициент загрузки материала, 50–90%;

$H (x_4)$ – шаг спирали, 10–50 мм.

В качестве функций отклика на воздействие факторов, определяющих характер протекания процесса, выбраны: часовая производительность Q (кг/ч), однородность распределения компонентов V_c , %, предел прочности на сжатие образцов $\delta_{\text{сж}}$ (МПа), плотность ρ (кг/м³).

В соответствии с планом принято пять уровней факторов: 1 – нижний; 0 – средний; +1 – верхний; -2 и +2 – звёздные точки. Указанные уровни варьирования сопоставляются с реальными условиями результатов пневматического смесителя со спиральной энергонесущей трубкой при смешении полидисперсных смесей.

Исследуемые факторы и уровни их варьирования приведены в таблице 3.

В соответствии с матрицей планирования для ПФЭЦКРП²⁴ проводились экспери-

ментальные исследования. При проведении экспериментов физико-химический состав материалов оставался неизменным. Изучался процесс смешения сырьевых компонентов портландцемента и вермикулита при различных соотношениях: цемент (90...70%), вермикулит (10...30%), кварцевый песок (10...30%).

Предварительно подготовленные сухие теплоизоляционные смеси: цемент, вермикулит засыпали в загрузочный люк смесителя, после чего ингредиенты попадали в смесительную камеру, где под действием сжатого воздуха происходило смешение компонентов. Готовые перемешанные смеси засыпали в сухие бумажные пакеты и герметично упаковывали.

Из приготовленных теплоизоляционных смесей формовали образцы – кубики размером 30 x 30 x 30 мм по четыре-пять образцов каждого состава. Образцы хранили в воздушно-сухом состоянии в течение 28 сут при температуре 20 °С и относительной влажности воздуха 50%.

Определение плотности образцов, кг/м³ проводили в сухом состоянии и вычисляли показатель как среднее значение испытаний всех образцов. Определение прочности затвердевших образцов проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 58767–2019.

При определении качества смешения в пневмосмесителе применялся метод точечного отбора проб, который позволяет установить наличие застойных зон в данном смесителе.

В работе использовался метод контроля распределения сырьевых компонентов в смеси, предложенный А. М. Ластовцевым для определения коэффициента неоднородности по одному ключевому компоненту²

Таблица 3
Исследуемые факторы и уровни варьирования ПФЭЦКРП²⁴
Источник: составлено авторами.

Table 3
Studied factors and ПФЭЦКРП²⁴ levels of variation
Source: compiled by the authors.

Исследуемые факторы	Обозначение	Уровни варьирования					
		-2	-1	0	1	+2	Интервал
Давление в пневматическом смесителе, кПа	X_1	50	100	150	200	250	50
Количество отверстий на спирали, шт.	X_2	15	25	35	45	55	10
Коэффициент загрузки материала, %	X_3	50	60	70	80	90	10
Шаг спирали, мм	X_4	10	20	30	40	50	10

$$V_c = \frac{100}{C_0} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_0)^2}{n-1}}, \quad (4)$$

где C_0 – концентрация по массе компонента при идеальном его распределении; C_i – значения концентрации ключевого компонента по массе одного из компонентов в пробах; n – число проанализированных взятых проб.

В результате проведения лабораторных исследований по смешению сырьевых компонентов в пневматическом смесителе со спираль-

ной энергонесущей трубкой были получены результаты, представленные в таблице 4. Изменяя варьируемые факторы, можно оценить исследуемые параметры: производительность пневматического смесителя – Q , кг/ч, коэффициент неоднородности смеси – V_c , %, предел прочности при сжатии – $\delta_{сж}$, МПа; плотность растворов – ρ , кг/м³. Исследования проводили с полиминеральной смесью, включающей портландцемент, вспученный вермикулит и кварцевый песок.

Таблица 4
Полученные результаты экспериментальных исследований
Источник: составлено авторами.

Table 4
The results of experimental studies
Source: compiled by the authors.

№ опыта	Варьирование фактора				Исследуемые параметры			
	Р, кПа	п, шт	ψ, %	Н, мм	Q, кг/ч	Vc, %	МПа	kg/m ³
1	100	25	60	20	13,4	8	3,7	1570
2	200	25	60	20	13,35	9	3,1	1419
3	100	45	60	20	13,7	6	3,5	1510
4	200	45	60	20	13,9	5	3,1	1320
5	100	25	80	20	13	13	3,4	1515
6	200	25	80	20	13,02	11	3,3	1501
7	100	45	80	20	14,65	2	3,6	1540
8	200	45	80	20	13,5	8	3,8	1550
9	100	25	60	40	12,8	12	3,5	1210
10	200	25	60	40	12,2	16	3	1290
11	100	45	60	40	13,25	9	3,2	1457
12	200	45	60	40	13,5	8	3,3	1405
13	100	25	80	40	10,3	37	3,6	1635
14	200	25	80	40	12,7	27	3,4	1545
15	100	45	80	40	15,2	9	3,5	1579
16	200	45	80	40	15,4	7	4	1650
17	50	35	70	30	15,1	9	3,9	1565
18	250	35	70	30	14,8	10	4	1573
19	150	15	70	30	16,6	2	4,1	1509
20	150	55	70	30	15,3	8	3,8	1501
21	150	35	50	30	15,8	4	3,3	1450
22	150	35	90	30	14,1	3	3,7	1570
23	150	35	70	10	14	4	4	1510
24	150	35	70	50	14,6	2	3,3	1420
25	150	35	70	30	13,8	5	3	1290
26	150	35	70	30	13,7	6	2,8	1205
27	150	35	70	30	13,7	6	2,7	1198
28	150	35	70	30	13,3	6	3	1203
29	150	35	70	30	13,6	7	3,1	1150
30	150	35	70	30	13,7	6	3,15	1223
31	150	35	70	30	14,1	3	3,1	1310

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованиями по изучению оптимальных режимов смешения сухой теплоизоляционной смеси, проведенными в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой, установлено, что наилучшим режимом является режим при давлении сжатого воздуха $P = 150$ кПа; количестве отверстий на спирали $n = 35$; при коэффициенте загрузки материала $\psi = 70\%$; с шагом спирали $H = 50$ мм. При таких условиях работы пневматического смесителя часовая производительность составила $Q = 14,6$ (кг/ч); с однородностью распределения компонентов $V_c = 2\%$. Образцы растворов, отформованные из приготовленных смесей, характеризуются пределом прочности при сжатии образцов $\delta_{сж} = 3,3$ МПа; с плотностью $\rho = 1420$ кг/м³.

Теплоизоляционные смеси, приготовленные в пневматическом смесителе со спиральной энергонесущей трубкой, обеспечивают получение теплоизоляционных растворов со стабильными показателями по плотности 1420 кг/м³, имеющие достаточно прочностные показатели при сжатии 3,3 МПа, гарантируют высокие теплозащитные свойства в строительных конструкциях.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют об эффективном смешении сырьевых компонентов и позволяют рекомендовать разработанный пневматический смеситель со спиральной энергонесущей трубкой для приготовления теплоизоляционных растворов с использованием легких заполнителей.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 22-19-20115, <https://rscf.ru/project/22-19-20115/> и Правительства Белгородской области, Соглашение № 3 от 24.03.2022.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ясинская Е. В., Никулин Н. М., Кривцов Е. Е. Исследование характеристик наномодифицированных сухих строительных смесей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 2 (20). С. 29–32.
2. Zagorodnyuk L., Sumskey D., Lesovik V., Fediuk R. Modified heat insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 260. Pp. 120440. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.120440.
3. Schackow A., Effting C., Folgueras M. V., Guths S., Mendes G.A. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent // Construction Building Materials. 2014. Vol. 57. Pp. 190–197.
4. Шкарин А. В., Загороднюк Л. Х., Щекина А. Ю., Лугинина И. Г. Получение композиционных вяжущих в различных помольных агрегатах // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2012. № 9. С. 89–92.
5. Шкарин А. В., Перепечин С. А., Завгородний А. А., Парасоцкая О. М., Соломина И. В. Смешение сухих строительных смесей в роторно-рециркуляционном смесителе // Успехи современного естествознания. 2012. № 6. С. 68–70.
6. Sengul O., Azizi S., Karaosmanoglu F., Tasdemir M.A. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete // Energy Buildings. 2011. Vol. 43. Iss. 2. Pp. 671–676.
7. Degirmenci N., Arin N. Y. Use of pumice fine aggregate as an alternative to standard sand in production of lightweight cement mortar // Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. 2011. Vol. 18. Pp. 61–68.
8. Unal O., Uygunoglu T., Yildiz A. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation // Building and Environment. 2007. Vol. 42. Pp. 584–590.
9. Koksall F., Gencel O., Brostow W., Hagg Lobland H. E. Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite // Materials Research Innovations. 2012. Vol. 16. Iss. 1. Pp. 7–13.
10. Lanzon M., Garcia-Ruiz P.A. Lightweight cement mortars: advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability // Construction Building Materials. 2008. Vol. 22. Iss. 8. Pp. 1798–1806.
11. Сумской Д. А. Теплоизоляционный раствор на основе композиционного вяжущего // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 2 (76). С. 283–289. DOI 10.20914/2310-1202-2018-2-283-289.
12. Загороднюк Л. Х., Рахимбаев Ш. М., Сумской Д. А., Рыжих В. Д. Особенности процессов гидратации вяжущих композиций с использованием отходов вспученного перлитового песка // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2020. № 11. С. 75–88. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88.
13. Abu-Jdayil B., Mourad A.-H., Hittini W., Hassan M., Hameedi S. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: an overview // Construction Building Materials. 2019. Vol. 214. Pp. 709–735.
14. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Svintsov A. P., Gladkova N.A., Timokhin R.A., et al., Self-compacting concrete using pretreated rice husk ash // Magazine Civil Engineering. 2018. Vol. 79. Iss. 3. Pp. 66–76.
15. Villasmil W., Fischer L.J., Worlitschek J. A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems //

Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 103. Pp. 71–84.

16. Ramezaniapour A. A., Mahmoud Motahari Karein S., Vosoughi P., Pilvar A., Isapour S., Moodi F. Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete // *Construction Building Materials*. 2014. Vol. 66. Pp. 222–228.

17. Kim Hung Mo, Hong Jie Lee, Michael Yong Jing Liu, Tung-Chai Ling. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar // *Construction Building Materials*. 2018. Vol. 179. Pp. 302–306.

18. Koksai F., Mutluay E., Gencel O. Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene // *Construction Building Materials*. 2020. Vol. 236. Pp. 117789.

19. Khoukhi M. The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: impact on building energy performance // *Energy Build.* 2018. Vol. 169. Pp. 228–235.

20. Perre P., Challansonnex A., Colin J. On the importance of heat and mass transfer coupling for the characterization of hygroscopic insulation materials // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 133. Pp. 968–975.

21. Rosti B., Omidvar A., Monghasemi N., Optimum position and distribution of insulation layers for exterior walls of a building conditioned by earth-air heat exchanger // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 163. Pp. 114362.

22. Abirami T., Loganaganandan M., Murali G., Fediuk R., VickramSreekrishna R., Vignesh T., Janupriya G., Karthikeyan K. Experimental research on impact response of novel steel fibrous concretes under falling mass impact // *Construction Building Materials*. 2019. Vol. 222. Pp. 447–457.

23. Hunter N.J.R., Weinberg R.F., Wilson C. J. L., Luzin V., Misra S. Quartz deformation across interlayered monomineralic and polymineralic rocks: a comparative analysis // *Journal of Structural Geology*. 2019. Vol. 119. Pp. 118–134.

24. Pachta V., Papadopoulos F., Stefanidou M. Development and testing of grouts based on perlite by-products and lime // *Construction Building Materials*. 2019. Vol. 207. Pp. 338–344.

25. Kapeluszna E., Kotwica L., Pichor W., Nocun-Wczelik, Cement-based composites with waste expanded perlite - structure, mechanical properties and durability in chloride and sulphate environments // *Sustainable Materials and Technologies*. 2020. Pp. e00160.

26. Zagorodnyuk L. Kh., Sumskey D. A., Lesovik V. S., Fediuk R. S. Modified heat-insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. P. 260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120440>.

REFERENCES

1. Yasinskaya E. V., Nikulin N. M., Krivtsov E. E. Study of the characteristics of nanomodified dry building mixtures [Issledovanie harakteristik nanomodifirovannyh suhih stroitel'nyh smesey]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*. 2011; 2 (20): 29–32. (In Russ.)

2. Zagorodnyuk L., Sumskey D., Lesovik V., Fediuk R. Modified heat insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand. *Construction and Building Materials*. 2020; 260: 120440. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.120440.

3. Schackow A., Effting C., Folgueras M. V., Guths S., Mendes G.A. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. *Construction Building Materials*. 2014; 57:190–197.

4. Shkarin A. V., Zagorodnyuk L. Kh., Shchekina A. Yu., Luginina I. G. Obtaining composite binders in various grinding units [Poluchenie kompozitsionnyh vyazhushchih v razlichnyh pomolnyh agregatah]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*. 2012; 9: 89–92. (In Russ.)

5. Shkarin A.V., Perepechin S.A., Zavgorodniy A. A. Parasotskaya O. M., Solomina I.V. Mixing of dry building mixes in a rotary recirculation mixer [Smeshenie suhih stroitel'nyh smesey v rotornorecirkulyacionnom smesitele]. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya*. 2012; 6: 68–70. (In Russ.)

6. Sengul O., Azizi S., Karaosmanoglu F., Tasdemir M.A. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete. *Energy Buildings*. 2011; 43. Iss. 2: 671–676.

7. Degirmenci N., Arin N.Y. Use of pumice fine aggregate as an alternative to standard sand in production of lightweight cement mortar. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. 2011; 18: 61–68.

8. Unal O., Uygungoglu T., Yildiz A. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. *Building and Environment*. 2007; Vol. 42: 584–590.

9. Koksai F., Gencel O., Brostow W., Hagg Lobland H. E. Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite. *Materials Research Innovations*. 2012; Vol. 16. Iss. 1: 7–13.

10. Lanzon M., Garcia-Ruiz P.A. Lightweight cement mortars: advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability. *Construction Building Materials*. 2008; Vol. 22. Iss. 8: 1798–1806.

11. Sumskey D. A. Heat-insulating mortar based on composite binder [Teploizolyatsionnyj rastvor na osnove kompozitsionnogo vyazhushchego]. *Vestnik VGUIT*. 2018; V. 80. No. 2 (76): 283–289. DOI 10.20914/2310-1202-2018-2-283-289. (In Russ.)

12. Zagorodnyuk L. Kh., Rakhimbaev Sh. M., Sumskey D. A., Ryzhykh V. D. Features of the processes of hydration of binder compositions using waste expanded perlite sand. *Vestnik BG TU im. V.G. Shuhova*. 2020; 11: 75-88. DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88. (In Russ.)
13. Abu-Jdayil B., Mourad A.-H., Hittini W., Hassan M., Hameedi S. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: an overview. *Construction Building Materials*. 2019; Vol. 214: 709–735.
14. Fediuk R.S., Lesovik V.S., Svintsov A.P., Gladkova N.A., Timokhin R.A., et al., Self-compacting concrete using pretreated rice husk ash. *Magazine Civil Engineering*. 2018; Vol. 79. Iss. 3: 66–76.
15. Villasmil W., Fischer L.J., Worlitschek J. A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; Vol. 103: 71–84.
16. Ramezani pour A. A., Mahmoud Motahari Karein S., Vosoughi P., Pilvar A., Isapour S., Moodi F. Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete. *Construction Building Materials*. 2014; Vol. 66: 222–228.
17. Kim Hung Mo, Hong Jie Lee, Michael Yong Jing Liu, Tung-Chai Ling. Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. *Construction Building Materials*. 2018; Vol. 179: 302–306.
18. Koksai F., Mutluay E., Gencel O. Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene. *Construction Building Materials*. 2020; 236: 117789.
19. Khoukhi M. The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: impact on building energy performance. *Energy Build*. 2018; Vol. 169: 228–235.
20. Perre P., Challanonnex A., Colin J. On the importance of heat and mass transfer coupling for the characterization of hygroscopic insulation materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019; 133: 968–975.
21. Rosti B., Omidvar A., Monghasemi N., Optimum position and distribution of insulation layers for exterior walls of a building conditioned by earth-air heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2019; Vol. 163: 114362.
22. Abirami T., Loganaganandan M., Murali G., Fediuk R., Vickram Sreekrishna R., Vignesh T., Janupriya G., Karthikeyan K. Experimental research on impact response of novel steel fibrous concretes under falling mass impact. *Construction Building Materials*. 2019; 222: 447–457.
23. Hunter N.J.R., Weinberg R.F., Wilson C.J.L., Luzin V., Misra S. Quartz deformation across interlayered monomineralic and polymineralic rocks: a comparative analysis. *Journal of Structural Geology*. 2019; 119: 118–134.
24. Pachta V., Papadopoulos F., Stefanidou M. Development and testing of grouts based on perlite by-products and lime. *Construction Building Materials*. 2019; 207: 338–344.
25. Kapeluszna E., Kotwica L., Pichor W., Nocun-Wczelik, Cement-based composites with waste expanded perlite - structure, mechanical properties and durability in chloride and sulphate environments. *Sustainable Materials and Technologies*. 2020. Pp. e00160.
26. Zagorodnyuk L. Kh., Sumskey D. A., Lesovik V. S., Fediuk R. S., Modified heat-insulating binder using jet-grinded waste of expanded perlite sand. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. P. 260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120440>.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Аль Мамури Саад Кхалил Шадид. Подбор теоретической базы для проведения эксперимента. Проведение эксперимента. Аprobация полученных результатов, написание статьи.

Шеметова О. Л. Подбор теоретической базы для проведения эксперимента. Проведение эксперимента. Аprobация полученных результатов.

Загороднюк Л. Х. Формулировка направления и темы исследования, подбор теоретической базы для проведения эксперимента. Контроль и консультирование по вопросам проведения эксперимента и написание статьи.

Бочарников А. Л. Проведение эксперимента, написание, редактирование и оформление статьи.

AUTHOR CONTRIBUTION STATEMENT

Al MamuriSaad Khalil Shadid – Selection of the theoretical base for the experiment. Conducting an experiment. Approbation of the obtained results, writing an article.

Olga M. Shemetova – Selection of the theoretical base for the experiment. Conducting an experiment. Approbation of the obtained results.

Lilia Kh. Zagorodnuk – Formulation of the direction and topic of the research, selection of the theoretical basis for the experiment. Supervising and advising on the conduct of the experiment and the writing of the paper.

Andrey L. Bocharnikov – Carrying out the experiment, writing, editing and layout of the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аль Мамури Саад Кхалил Шадид – аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций.

Шеметова Ольга Михайловна – аспирантка кафедры механического оборудования, SPIN-код: 2117-1054.

Загороднюк Лилия Хасановна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры строительного материала

поведения, изделий и конструкций, SPIN-код: 1205-0982.

Бочарников Андрей Леонидович – студент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, SPIN-код: 6866-8437.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Al Mamuri Saad Khalil Shadid, Postgraduate Student of the Building Materials Science for Products and Structures Department.

Olga M. Shemetova, Postgraduate Student of the Mechanical Equipment Department, SPIN-код: 2117-1054.

Lilia Kh. Zagorodnuk – Dr. of Sci., Professor, Professor of the Building Materials Science for Products and Structures Department, SPIN-код: 1205-0982.

Andrey L. Bocharnikov, Student of the Building Materials Science for Products and Structures Department, SPIN-код: 6866-8437.