

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 005.6, 658.56

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-55-74

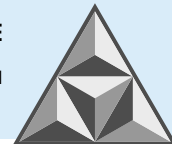
Технологические особенности производства гетерогенных строительных смесей и композитов при детерминированном формировании их однородности

А.В. Евсеев, Д.А. Карпилов, Я.А. Черкаев, И.А. Юраскова

**Алексей Владимирович Евсеев, Дмитрий Александрович Карпилов, Ярослав Андреевич Черкаев,
Ирина Андреевна Юраскова***

Тульский государственный университет, Тула, Российская Федерация

*ews1972@mail.ru, karpilovdima@yandex.ru, yaroslav.cherkaev@yandex.ru, yuraskova.ira@yandex.ru**



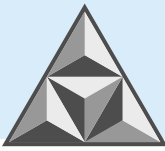
Проведен обзор состояния производства строительных смесей традиционными методами, систематизированы литературные и патентные данные по данному направлению. Представлены результаты экспериментального исследования технологии детерминированного формирования строительных смесей. Рассмотрены вопросы обеспечения необходимого уровня качества смеси за счет распределения компонентов на уровне малых доз и гарантированного характера процесса. Теория и практика процесса детерминированного формирования смеси представлена и исследована в различных вариантах конструкций нонмиксеров – конвейерном, роторном и бироторном. Механизмы упорядоченной укладки микродоз компонентов в нонмиксерах определяют технологические схемы разделения потоков компонентов.

Ключевые слова: гетерогенная смесь, композитные строительные материалы, детерминированное формирование однородности, гарантированный уровень качества

Для цитирования:

Евсеев А.В., Карпилов Д.А., Черкаев Я.А., Юраскова И.А. Технологические особенности производства гетерогенных смесей и композитов при детерминированном формировании их однородности // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 4. С. 55-74.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-55-74



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-55-74

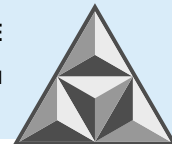
Technological characteristics of heterogeneous building mixtures and composites production at their homogeneous deterministic formation

A.V. Evseev, D.A. Karpilov, Ya.A. Cherkaev, I.A. Yuraskova

**Aleksey Vladimirovich Evseev, Dmitry Alexandrovich Karpilov, Yaroslav Andreevich Cherkaev,
Irina Andreevna Yuraskova***

Tula State University, Tula, Russian Federation

*ews1972@mail.ru, karpilovdima@yandex.ru, yaroslav.cherkaev@yandex.ru, yuraskova.ira@yandex.ru**



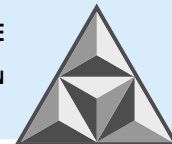
The article reviews the production of building mixes by traditional methods through scientific literature and patent data systematising. It also presents the results of an experimental study of building mixtures deterministic formation technology. The research dwells on ensuring the necessary level of mixture quality due to the distribution of components at the low dose level and the nature of the process. The article highlights theoretical and practical issues of deterministic mixture formation and observes various versions of nonmixer designs – conveyor, rotary, and birotor ones. The mechanisms of microdoses laying in nonmixers determine the technological schemes for separating the flows of components.

Keywords: heterogeneous mixture, composite building materials, deterministic uniformity formation, guaranteed quality level

For citation:

Evseev A.V., Karpilov D.A., Cherkaev Ya.A., Yuraskova I.A. Technological characteristics of heterogeneous building mixtures and composites production at their homogeneous deterministic formation // *Smart Composites in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 4. P. 55-74. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5562/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-4-55-74



ВВЕДЕНИЕ

В строительной индустрии востребована смесевая продукция с высокими содержаниями компонентов и гарантированным уровнем качества. Смесью компонентов часто обладает разнообразными физико-механическими и химическими свойствами, а строительные композиты характеризуются широким диапазоном соотношений компонентов (1:10 и выше). Это позволяет создавать материалы с уникальными характеристиками, адаптированными под конкретные нужды и условия эксплуатации.

Смеси высокого качества требуются для обеспечения нужд не только строительной, но и пищевой, фармацевтической, химической, электротехнической, металлургической, авиационно-космической и других отраслей промышленности, а также оборонно-промышленного комплекса [1-4].

Одним из основных аспектов, связанных с производством смесей с включением различных фракций, являются ограничения, связанные с технологическими особенностями традиционного смесительного оборудования. Реализуемый способ получения смеси основан на вероятностных методах достижения однородности продукции. Описание сложных физико-механических процессов перемещения компонентов в рабочем объеме смесителя заключается в установлении связей между стохастическими входными и выходными параметрами: компоненты, смеситель, смесь. Данное представление не дает возможности непосредственно управлять указанными процессами, а технологический цикл не обеспечивает получение смесевой продукции заданного качества [5-8]. Например, при производстве добавок для дорожных работ, используемых в качестве антиобледенителей, важно обеспечить высокие концентрации и равномерное распределение частиц по всему объему.

В наши дни требования к продуктам формируются под влиянием отраслевых стандартов и изменяющихся предпочтений клиентов. Это приводит к тому, что технические нормы и регламенты становятся более жесткими. На сегодняшний день определены следующие требования к смесям: коэффициент вариации – 0.5-1.5%, при этом соотношение компонентов должно быть 1:100 и выше, что сложно реализовать на традиционном смесительном оборудовании.

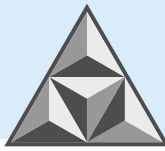
Теоретические основы и исследования в области производства смесей обосновали и осуществили Капранова А.Б. [9, 10], Макаров Ю.И. [11], Чувпило А.В. [12], Александровский А.А. [13] и др., что отражено в многочисленных работах [11-19].

Широкое распространение в современном производстве композиты получили за счет высоких эксплуатационных характеристик и специальных свойств. В области создания и производства композитных материалов основные разработки принадлежат российским ученым Васильеву В.А., Васину С.А., Евсееву А.В. Мизонову В.Е., Першину В.Ф., а также зарубежным специалистам – Исикаве К., Тагути Г., Фейгенбауму А. [20-24] и др.

Создание новых материалов и развитие технологий их производства способствовало развитию многих отраслей промышленности. В настоящее время смеси и композиты активно применяются в строительстве.

Анализ методов создания неоднородных смесей и машин для их производства

Метод создания смесей, который считается традиционным, подразумевает случайное перемещение частиц в рабочей зоне смесителя. Это приводит к равномерному распределению изначально разделенных компонентов. От способа их смешивания и характеристик



(физические, механические, химические, магнитные и др.) зависит конструкция смесителя. На качество смеси влияет объем смесителя, форма и скорость движения рабочих элементов, режим и продолжительность смешивания, а также состав исходных компонентов.

Контроль качества смеси осуществляется методами статистического анализа путем отбора проб при остановке смесителя, при этом оценивается распределение ключевого компонента.

Особенности организации технологического процесса, конструкция и соотношение компонентов в строительной смеси – ключевые аспекты [25-27], которые определяют классификацию традиционных смесителей (рис. 1).



Рис. 1. Классификация смесительного оборудования [28]

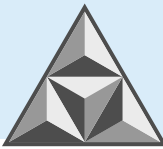
Fig. 1. Classifications of mixing equipment [28]

Существует несколько способов смешивания компонентов; один из них – периодический. Он заключается в том, что компоненты загружаются, смешиваются и выгружаются за один цикл. Однако первая и третья часть этого цикла не приносят пользы. Время, в течение которого происходит смешивание локальных объемов компонентов, остается неизменным. Это означает, что в пределе конечное распределение частиц будет соответствовать равновесному состоянию для выбранного режима работы.

Другой способ – непрерывное смешивание. В этом случае цикличность в работе оборудования отсутствует. Производительность определяется настройкой дозирующих устройств, а качество смеси зависит от распределения времени пребывания локальных объемов материалов в смесителе. Хотя качество смешивания не достигает равновесного состояния, его можно улучшить путем установки каскада смесителей. Это сужает закон распределения по времени пребывания и качеству проработки. Также качество можно улучшить организацией обратных перетоков между смесителями.

В процессе смешивания применяются методы, основанные на непрерывной работе дозатора и питателя. Точность функционирования этих устройств имеет ключевое значение для обеспечения высокого качества смеси. Наряду с этим, для достижения максимальной точности в весовой дозировке требуется использовать дискретные методы, что подразумевает необходимость применения питателей, уменьшающих колебания и сглаживающих пульсации при подаче компонентов. Это усложняет смесительную установку.

Современное оборудование для смешивания дополняется устройствами, которые выполняют особые технологические операции, такие как измельчение, уплотнение или разрыхление, сушка или увлажнение, удаление пыли, аэрация и гранулирование.



Анализ научной литературы и патентных данных в этой области показал [7, 9, 29, 30, 31], что процессы, протекающие в смесителе, носят вероятностный характер. В связи с этим возникает необходимость использования теории вероятностей и математической статистики для анализа случайных процессов и их вероятностных характеристик. Также отмечается, что при традиционном способе приготовления смеси, основанном на стохастических процессах, трудно обеспечить равномерное распределение компонентов и достичь гарантированной однородности смеси.

Также проблемой традиционного смесительного оборудования является то, что оно не позволяет получить соотношение компонентов более чем 1:10 за один технологический переход. Кроме того, традиционные методы требуют значительных энергетических затрат на производство продукции из-за многократного манипулирования объемами смеси с помощью рабочих органов смесителей.

Для обеспечения высокого качества готового продукта необходимо отказаться от традиционных технологий приготовления смесей в пользу управляемого формирования.

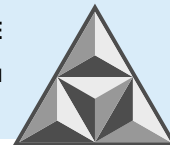
Предпосылки появления способов детерминированного формирования однородности строительных смесей и композитов

Чувпило А.В. и Макаров Ю.И. еще в 1960-х гг. разработали новые конструкции аппаратов непрерывного действия, которые формировали смесь путем внедрения тонкодозированных потоков компонентов в процессе непрерывного транспортирования, что позволило получить смеси лучшего качества. Коэффициент вариации достигал 2-4% при соотношении компонентов не более 1:10.

Чувпило А.В. [12, 32, 33], изучая процесс непрерывного смешения порошковых материалов, исследовал зависимость концентрации компонента на выходе из смесителя при различных способах его подачи на входе аппарата. Им подробно рассмотрен вопрос о влиянии способа дозирования компонентов на однородность смеси, заложены основы для рассмотрения смесителей сыпучих материалов как динамических систем, обладающих способностью сглаживания флуктуации входящих потоков компонентов. Этот подход затем был развит Макаровым Ю.И., его коллегами и учениками. Чувпило А.В. также применил аппарат марковских процессов для установления состояния смешения (диффузионное или конвективно-диффузионное). В [33] он показал, что вероятность равномерного распределения компонента увеличивается с повышением его доли в смеси и уменьшается с ростом числа компонентов.

Макаров Ю.И. [4, 11] для описания входящих потоков компонентов и выходящего потока смеси использует теорию случайных функций, представляя смеситель в виде системы, сглаживающей флуктуации потоков компонентов. Он использует простейшие модели – идеального смешения и вытеснения, диффузионную, ячеечную. Это обстоятельство не позволяет идентифицировать данные модели как однородные; получение объективного результата требует использования модели реального процесса приготовления смеси.

Вопросы повышения качества смесей путем управляемого формирования их однородности рассматривали многие отечественные ученые – Баранцева Е.А., Верлока И.И., Евсеев А.В., Капранова А.Б., Макаров Ю.И., Мизонов В.Е., Першин В.Ф., Подгорнов Ю.И., а также зарубежные исследователи [2, 4, 16, 34]. Однако эти работы имеют, скорее, рекомендательный характер для будущих теоретических исследований. Анализ таких работ показывает, что создание строительных смесей с заданной однородностью традиционными методами затруднительно, так как процесс трудно поддается описанию и управлению.



Одним из возможных путей решения этой задачи является теоретическое описание технологии детерминированного формирования однородности гетерогенных смесей [35] и строительных композитов и выбор соответствующего оборудования для успешной реализации [36].

Принципы детерминированного создания однородности строительных смесей и композитов

Возможность создания строительных смесей с соотношением компонентов выше 1:100 с гарантированным качеством, а также улучшение экономических, экологических и безопасных параметров их производства достигается благодаря отказу от традиционного стохастического смешивания.

Нонмиксеры обеспечивают гарантированное отклонение содержания ключевого компонента в смеси не более чем на 0,5-2,0% и позволяют создавать новые смеси с высокой вероятностью. Обеспечение необходимого качества смеси происходит за счет распределения компонентов на уровне малых доз. В зависимости от типа дозаторов компоненты подаются дискретно или тонкоструйными потоками.

Основная идея метода заключается в следующем: с помощью питателей создаются непрерывные или дискретные потоки компонентов. Затем из этих потоков отбираются небольшие порции, которые перемещаются под действием силы тяжести и размещаются в специальной емкости. Многократное повторение этого процесса приводит к образованию упорядоченной структуры смеси. Этот процесс можно назвать детерминированным, то есть заранее определенным. Качество готовой смеси зависит от точности выдачи небольших порций компонентов через питатели и от надежности распределения этих порций в емкости.

Технология нонмиксинга заключается в создании однородной смеси с определенными качественными характеристиками. Нонмиксинг представляет собой упорядоченное распределение небольших порций компонентов на этапе дозирования, что позволяет получить детерминированную структуру смеси с известными показателями. На основе теоретических исследований были предложены конструкции нонмиксеров, осуществляющих формирование смеси [37-41].

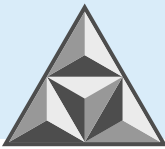
В табл. 1 представлено сравнение показателей традиционного смесительного оборудования и нонмиксеров.

Таблица 1. Технические характеристики устройств для создания смесей [28]

Table 1. Technical characteristics of devices for mixture formation [28]

Параметры	Традиционные смесители	Нонмиксеры
Соотношение компонентов	1:10	1:20 и выше
Уровень отклонения содержания ключевого компонента, %	2,0 и выше	0,5 и выше
Средняя потребляемая мощность, кВт	4-10	1,5
Процесс формирования смеси	стохастический	детерминированный

Поскольку спрос на высококачественную продукцию и эффективные технологии в строительстве растет, использование технологии детерминированного формирования однородности смесей становится перспективным. На этой основе становится возможным проектировать новые конструкции нонмиксеров.



Конструкции нонмиксеров

Для решения научно-технических задач, связанных с различными видами производственных процессов создания строительных смесей, разработаны различные конструкции нонмиксеров. Теория и практика нонмиксинга реализована в трех вариантах конструкций нонмиксеров – конвейерном, роторном и бироторном. В нонмиксерах используются различные механизмы для упорядоченной укладки микродоз компонентов. Эти механизмы играют ключевую роль в технологических схемах разделения потоков компонентов и синтеза готовой строительной смеси с определенной дискретной структурой. Некоторые конструктивные решения находятся в стадии разработки, апробации и внедрения.

На рис. 2 показан конвейерный нонмиксер, который обеспечивает равномерное смешивание компонентов. Этот тип нонмиксера работает по принципу наложения слоев смеси друг на друга, создавая непрерывную «слоеную» ленту толщиной от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров для сыпучих материалов или от 3 до 12 слоев, состоящих их штучных компонентов.

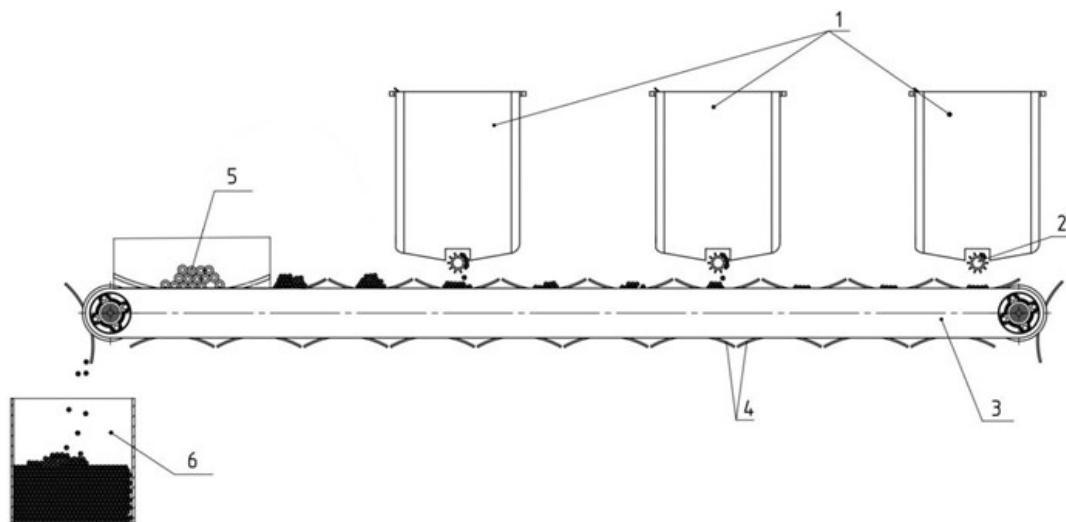
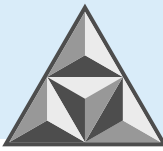


Рис. 2. Конвейерный нонмиксер [36]

Fig. 2. Conveyor nonmixer [36]



Существует альтернативный вариант конструкции нонмиксера – роторный модуль, который изображен на рис. 3. В этом модуле ингредиенты, подаваемые сверху с помощью дозаторов, собираются в одну упаковку в виде «слоеных» дисков (см. рис. 4).

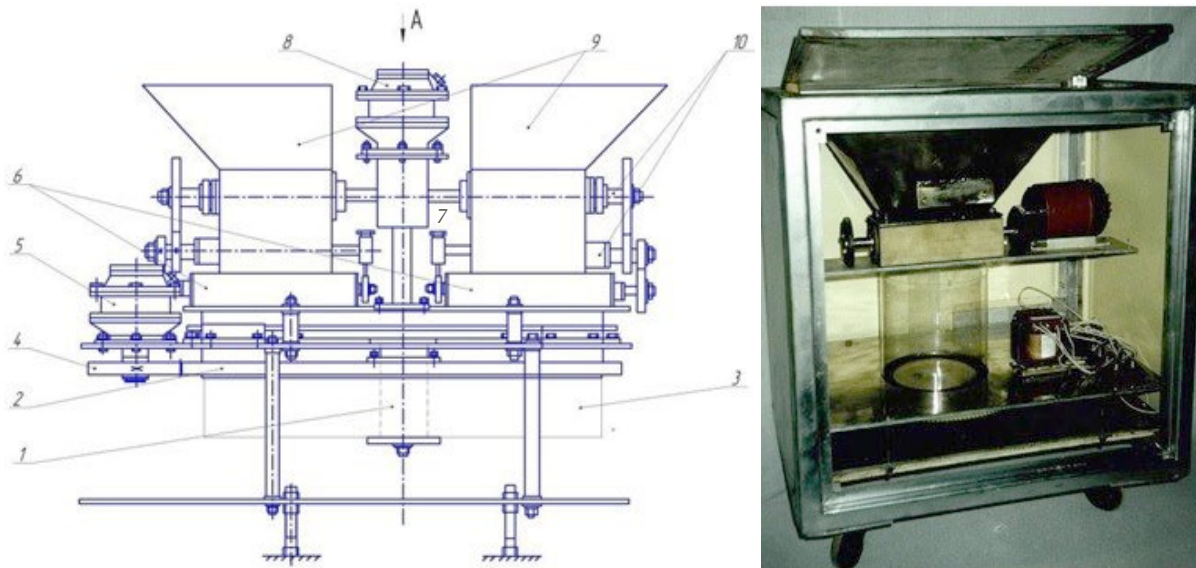


Рис. 3. Роторный двухпозиционный нонмиксинговый модуль

Fig. 3. Rotary two-position nonmixing module

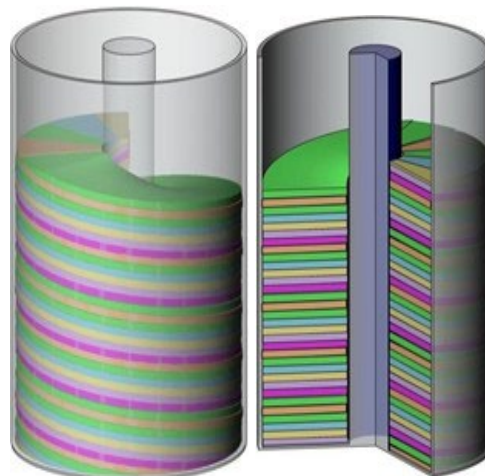


Рис. 4. Процесс синтеза компонентов в емкости роторного нонмиксера

Fig. 4. Scheme of mixture formation in a rotary nonmixer container

При этом в специальные отсеки 9 помещают сыпучие материалы, которые перемешиваются с помощью специальных устройств 10, предотвращающих слеживание. Материалы из отсеков 9 поступают в конусообразные роторные питатели 6, которые приводятся в движение с помощью привода 8. Питатели 6 с помощью специальных механизмов 7 отделяют небольшие порции материала от основной массы.

От электродвигателя 5 через шестерню 4 емкость 3 начинает вращаться вокруг своей оси. Вместе с емкостью 3 вращается основной вал 1 ротора. Питатели 6 подают материал под действием силы тяжести, и он равномерно распределяется по кругу внутри емкости.

В бироторном нонмиксере (см. рис. 5) более сложная кинематика разбивает каждый «слоеный» диск на секторы, и в каждом из них слои материала располагаются в различном порядке.



Рис. 5. Бироторный нонмиксер [38]

Fig. 5. Bi-rotor nonmixer [38]

Схема формирования однородной смеси показана на рис. 6.



Рис. 6. Схема процесса формирования однородной смеси с помощью бироторного нонмиксера

Fig. 6. Scheme of deterministic formation of mixture homogeneity on a bi-rotor nonmixer

Роторные и бироторные конструкции нонмиксеров предназначены для поддержания однородности смеси после ее упаковки и транспортировки [2, 37, 41].

Методология выбора и проектирования нонмиксеров (рис. 7) устанавливает взаимосвязи между ключевыми элементами системы – типом конструкции нонмиксера, типом производства (потребления) смеси, типом продукта и необходимыми характеристиками качества смесей.

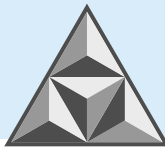


Рис. 7. Процесс определения и разработки концепции нонмиксеров

Fig. 7. Methodology for selecting and designing nonmixers

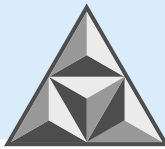
Существует множество возможных вариантов взаимодействия между элементами, включая корреляционные, но основная цель методологии – найти такую комбинацию, которая наилучшим образом соответствует требованиям, предъявляемым к производимым строительным смесям.

Предлагаемая технология систематического формирования однородности позволяет получать смеси высокого качества при значительном варьировании соотношения компонентов (от 1:20 и более) и для небольших объемов. Важно отметить, что нонмиксинг может реализоваться различными способами в зависимости от природы процесса; можно использовать растворы, конечные и промежуточные смеси, а также компоненты из естественных источников, такие как растения или минералы, а также применять не только гравитационные, но и магнитные и другие ориентирующие воздействия на потоки компонентов.

Существует множество технологических особенностей, методов и способов, которые также относят к технологическим решениям нонмиксинга.

Производство композиционного бетона

Строительные технологии не могут обойтись без новых строительных материалов, в частности, композиционных бетонов. Преимуществами последних являются широкие возможности в области строительства и решения различных архитектурных задач. За счет снижения плотности при сохранении механической прочности достигаются снижение массы, термостойкость и высокие тепловые характеристики строительных материалов. Высокий спрос на газо- и керамические блоки и плиты перекрытия подчеркивает актуальность производства композиционных бетонов.



Композиционные бетоны изготавливают посредством смешивания компонентов в выверенной пропорции. Необходимые физико-механические свойства достигаются за счет варьирования соотношений компонентов. В состав многокомпонентного бетона могут входить вяжущие вещества, расширяющие компоненты, наполнители и модификаторы различной природы. Модификаторы влияют на расширение смеси, ее реологические, кинетические и экзотермические свойства, тепловыделение и скорость отвердевания. Улучшение термических способностей при сохранении механической прочности достигается при замене 60% бетонной смеси композитом.

Рассмотрим возможность получения сухого бетона. Сухой строительный бетон – смесь цемента, песка и щебня, которые смешивают в определенной пропорции без добавления воды. Композитный бетон – это смесь обычного строительного бетона и добавок-модификаторов. При этом важно точно соблюдать пропорции компонентов в смеси, чтобы получить бетон с требуемыми свойствами. В настоящем исследовании в качестве ключевых компонентов выбран цемент и комплекс антиобледенительных добавок, а наполнителем служила смесь песка и щебня (или доломита).

Получали гетерогенные бетонные смеси с соотношением компонентов в композиции до 1:10. Для экспериментов использовали традиционные тарельчатые миксеры с рабочим объемом чаши 3 м³ и загрузкой 0.50-2.25 м³ бетонной композиции. Содержание компонентов в смеси, полученной стохастическим методом, показано на рис. 8.

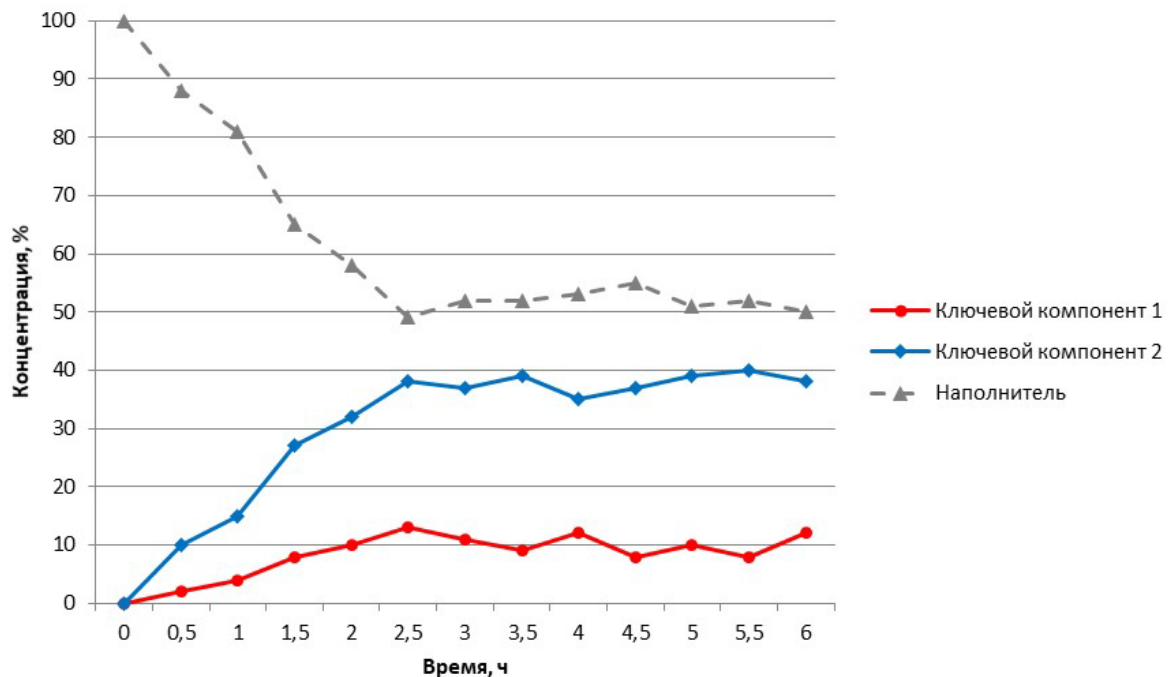


Рис. 8. Показатели качества композитных бетонов при традиционном формировании однородности

Fig. 8. Quality indicators of composite concrete with traditional formation of homogeneity

На рис. 9 представлены концентрации добавок и составляющих бетонной смеси, которые достигаются благодаря регулируемому процессу на линейном конвейере с горизонтальными барабанными дозаторами дискретного действия.

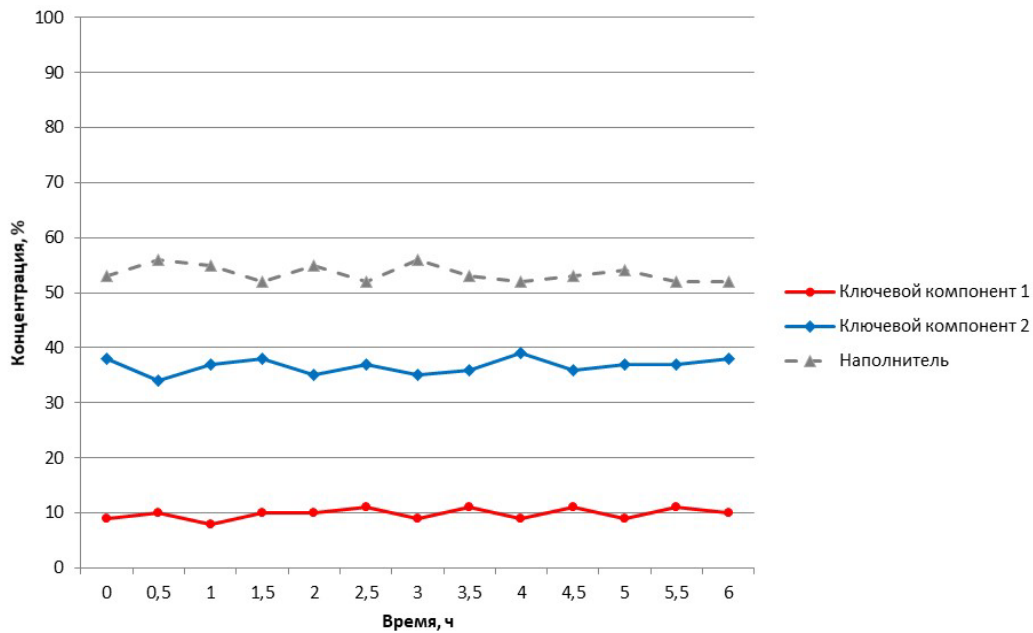
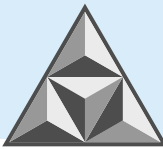


Рис 9. Характеристики композитных бетонов при контролируемом процессе достижения однородности
 Fig. 9. Quality indicators of composite concrete with controlled formation of homogeneity

Результаты исследования образцов, полученных с применением различных методов обеспечения однородности и отбора проб для анализа, представлены в табл. 2-4.

Таблица 2. Максимальные расхождения в содержании первого компонента (антиобледенительные добавки) в образцах.

Table 2. Maximum deviations for the 1st component (anti-icing additives) in samples

Традиционное смешивание		Детерминированное формирование однородности	
0-2 ч	10%	0-2 ч	2%
2-4 ч	3%	2-4 ч	2%
4-6 ч	4%	4-6 ч	2%

$$N_{y_{min}}^T = 1.5.$$

$$N_{y_{max}}^T = 5.0.$$

Таблица 3. Предельные отклонения концентрации второго компонента (цемент) в образцах

Table 3. Maximum deviations for the 2nd component (cement) in samples

Традиционное смешивание		Детерминированное формирование однородности	
0-2 ч	32%	0-2 ч	4%
2-4 ч	7%	2-4 ч	4%
4-6 ч	5%	4-6 ч	3%

$$N_{y_{min}}^T = 1.25.$$

$$N_{y_{max}}^T = 10.7.$$

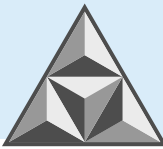
Таблица 4. Предельные расхождения в процентном содержании наполнителя (песчано-гравийная смесь) в образцах

Table 4. Maximum deviations for filler (sand-gravel mixture) in samples

Традиционное смешивание		Детерминированное формирование однородности	
0-2 ч	42%	0-2 ч	4%
2-4 ч	9%	2-4 ч	3%
4-6 ч	5%	4-6 ч	2%

$$N_{y_{min}}^T = 1.25.$$

$$N_{y_{max}}^T = 21.0.$$



Для композитных бетонов, когда качество с использованием двух ключевых компонентов и наполнителя улучшается в диапазоне 1.25-21.00 раз, была проведена проверка критерия оценки потребительских свойств готового строительного материала с доверительной вероятностью $p_{\xi} = 0.95$ и отклонением концентраций не более $\delta_{\xi} = 0.1-0.2$. При этом соотношение компонентов составляет до 1:10.

ВЫВОДЫ

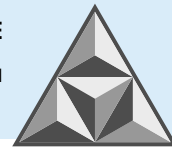
Технология, позволяющая создавать однородные смеси с заданными характеристиками, и оборудование, которое ее реализует, предоставляют возможность получать строительные композиты более высокого качества. Соотношение компонентов в таких смесях может быть от 1:20 и выше. При этом использование нонмиксеров исключает дополнительное пыление и нагрев.

Степень однородности смеси после детерминированного формирования повышается в 2.0-2.5 раз, а энергетические затраты снижаются втрое за счет исключения длительной операции смешивания компонентов. Производительность труда увеличивается в 2.0-2.5 раз благодаря сокращению технологической цепочки и трудоемкости процессов. Кроме того, комплексы могут быстро перенастраиваться, что исключает необходимость очистки емкостей, применяемых для выпуска строительных смесей.

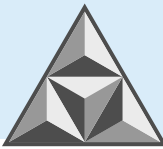
В дальнейшем необходимо разрабатывать новые конструкции технологических машин, что обеспечит более высокую эффективность использования смесей и строительных композитов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Александровский А.А., Кузнецов К.Н.** Исследование процесса смешения гетерогенных композиций. ЦНИИНТИ, 1973.
2. **Евсеев А.В.** Теория и оборудование детерминированного формирования однородности гетерогенных смесей: дисс. ... д-ра техн. наук. Тула, 2021. 297 с.
3. **Краснов И.Н., Филин В.М., Глобин А.Н., Ладугин Е.А.** Производство комбикормов в условиях личных подсобных и фермерских хозяйств: монография. ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2014. 228 с.
4. **Макаров Ю. И.** Процессы и аппараты химической техники: учеб. пособие. М.: МИХМ. 1977. С. 143-148.
5. **Vasin S.A., Evseev A.V., Malikov A.A.** Some aspects of the production of high-performance composite mixtures and materials // *Tsvetnye Metally*. 2022. № 6. P. 51-58.
6. **Васин С.А., Евсеев А.В., Юраскова И.А.** Некоторые аспекты производства модифицированных композитных материалов и изделий с их использованием // *Вестник Тульского государственного университета «Проблемы и перспективы развития автоматизации технологических процессов»*. 2023. С. 145-149.
7. **Бакин М.Н., Капранова А.Б., Верлока И.И.** Современные методы математического описания процесса смешивания сыпучих материалов // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 5 (5). С. 923-927.
8. **Юраскова И.А.** Повышение качества смесей и композитов, сформированных дискретными дозаторами конвейерного нонмиксера // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023. № 5. С. 541-543. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-541-542.
9. **Капранова А.Б., Бакин М.Н., Верлока И.И., Зайцев А.И.** Способы описания движения твердых дисперсных сред в различных плоскостях для сечений смесительного барабана // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2015. Т. 21. № 2. С. 296-304.
10. **Kapranova A.B., Verloka I. I.** The study of the volume fraction of key component in the second phase of the portion mixing by means of the device of gravity type // *J. Chem. Eng. Process Technol.* № 8 (5). P. 59. DOI: 10.4172/2157-7048-C1-009.
11. **Макаров Ю. И.** Аппараты для смешения сыпучих материалов. М: Машиностроение. 1973. 215 с.
12. **Чувпило А.В.** Новое в теории и технике приготовления порошковых смесей. ВНИИЭМ. 1964. 72 с.



13. **Александровский А.А.** Исследование процесса смешения и разработка аппаратуры для приготовления композиций, содержащих твердую фазу: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Казань, 1976. 48 с.
14. **Кольман-Иванов Э.Э.** Машины-автоматы химических производств. М.: Машиностроение. 1972. 408 с.
15. **Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю.** Системный анализ процессов химической технологии. Процессы смешения и измельчения сыпучих материалов. М.: Наука. 1985.
16. **Баранцева Е.А.** Моделирование и оптимизация процессов смешивания сыпучих материалов: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Иваново, 2010. 34 с.
17. **Капранова А.Б.** Деаэрация сыпучих сред в совмещенных со смешением процессах: автореферат дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. Иваново, 2009. 33 с.
18. **Кафаров В.В., Глебова М.Б.** Математическое моделирование основных процессов химических производств. М.: Высшая школа, 1991. 400 с.
19. **Wang S., Li C.H.** Application and Development of High-efficiency Abrasive Process // *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2012. № 47. P. 51-64.
20. **Васин С.А., Евсеев А.В., Маликов А.А., Юраскова И.А.** Приготовление смесей гетерогенных компонентов и сред при детерминированном формировании их однородности для создания новых композитных материалов // *Станкоинструмент*. 2023. № 3. С. 52-57. DOI: 10.22184/2499-9407.2023.32.3.52.57.
21. **Васин С.А., Евсеев А.В., Першин В.Ф., Юраскова И.А.** Управление качеством некоторых композитных и гетерогенных материалов модификацией нанокомпонентами // *Вестник РГУПС*. Машиностроение. 2023. № 2. С. 139-145. DOI: 10.46973/0201-727X_2023_2_139.
22. **Юраскова И.А.** Повышение качества смесей и композитов, сформированных дискретными дозаторами конвейерного нонмиксера // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023. № 5. С. 541-543. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-541-542.
23. **Yudaev I.V., Globin A.N., Plotnikova N.V.** Modeling of processes in a screw batcher // *Bulletin of the Lower Volga Agro-University Complex: science and higher professional education*. 2018. № 4 (52). P. 353-360. ISSN 2071-9485.
24. **Sivasubramanian P., Mayandi K., Arumugaprabu V., Rajini N., Rajesh S.** History of Composites and Polymers // *Polymer-Based Composites*. 2021. P. 1-21.
25. **Макаров Ю.И.** Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
26. **Фадин Ю.М., Шеметова О.М.** Применение пневматических смесителей в строительстве // *Механизация и автоматизация строительства*. 2020. С. 250-254.
27. **Тимонин А.С., Балдин Б.Г., Борщев В.Я., Гусев Ю.И.** Машины и аппараты химических производств: учеб. пособие для. Калуга: Издательство Н. Ф. Бочкаревой. 2008. 872 с.
28. **Юраскова И.А.** Классификация способов приготовления гетерогенных смесей и оборудование для их реализации // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 10. С. 482-485. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-10-482-485
29. **Ахмедпашаев А.У.** Технология изготовления порошковых фасонных фрез холодным прессованием // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2013. С. 46-52.
30. **Бакин М.Н., Верлока И.И., Капранова А.Б.** Об экспериментальных распределениях частиц сыпучих компонентов в разреженных потоках // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т. 23. № 10. С. 70-72.
31. **Лукаш А.Н., Евсеев А.В., Чувпило А.В.** Развитие технологий и оборудования для приготовления смесей сыпучих материалов // *Известия Тульского государственного университета. Машиностроение*. 2000. № 5. С. 218-224.
32. **Чувпило А.В.** Расчет, конструирование и исследование оборудования производства источников тока. М.: Энергия. 1968. 81 с.
33. **Чувпило А.В.** Время пребывания и эффект продольного смешения металлических и полупроводниковых порошков // *Тезисы докл. отрасл. науч. конф.* 1967. С. 33-35.
34. **Першин В. Ф., Воробьев А. М., Нечаев В. М.** Двухстадийное непрерывное дозирование при производстве и использовании углеродных наноматериалов // *Хим. и нефтегаз. машиностроение*. 2018. № 6. С.12-14.
35. **Evseev A.V., Yuraskova I.A., Chechuga A.O., Kasatkin G.V., Khachlaev T.S.** Mathematical model for optimizing the determination of the number of doses of components dispensed by discrete dispensers to obtain a minimum portion of a mixture with specified probabilistic characteristics on a conveyor nonmixer // *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2023)*. 2023. P. 83-92.

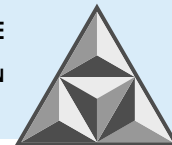


36. Патент № 2271243 Российская Федерация, МКИ 7 В01F23/60. Способ смешения сыпучих компонентов и устройство для его реализации: опубл. 10.03.2006 / Лукаш Александр Николаевич.
37. Патент № 2483790 РФ Российская Федерация, МКИ 7 В01F3/18, В01F7/04. Способ получения смеси из сыпучих компонентов и устройство для его осуществления: опубл. 03.12.2019 / Евсеев Алексей Владимирович.
38. Патент № 2129911 Российская Федерация, МКИ 7 В01F23/60, Способ смешения сыпучих компонентов и устройство для его реализации: опубл. 10.05.1999 / Лукаш Александр Николаевич.
39. Патент № 2542241 Российская Федерация, МКИ 7 В01 F3/18. Способ непрерывного приготовления многокомпонентных смесей сыпучих материалов: опубл. 14.10.2013 / Селиванов Юрий Тимофеевич.
40. Патент № 2804823 Российская Федерация, МКИ 7 В01 F3/18. Устройство для получения смеси из сыпучих компонентов: опубл. 06.10.2023 / Евсеев Алексей Владимирович.
41. Патент № 2708780 Российская Федерация, МПК В 65 G 53/46. Роторный питатель для сыпучего материала: опубл. 11.12.2019 / Евсеев Алексей Владимирович.
42. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023611457. Программа расчёта показателей качества смесей и композитов на основе диаграммы Парето: дата регистр. 19.01.2023 / Евсеев Алексей Владимирович.
43. **Бородулин Д.М.** Повышение эффективности процесса смешивания при получении комбинированных продуктов в смесительных агрегатах центробежного типа: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Кемерово, 2013. 39 с.
44. Патент № 2309841 Российская Федерация, МКИ 7 В01 F3/18. Способ приготовления сухой строительной смеси: опубл. 10.11.2007 / Трофимов Валерий Иванович.
45. Патент № 2363573 Российская Федерация, МКИ 7 В01 F3/18. Устройство для приготовления сухой строительной смеси: опубл. 10.08.2009 / Трофимов Валерий Иванович.
46. **Стренк Ф.** Перемешивание и аппараты с мешалками: под ред. И.А. Шупляка. Л., Химия, 1975. 384 с.
47. **Анциферов С.И.** Повышение эффективности процесса смешивания за счет совершенствования конструкции планетарного смесителя: дисс. ... канд. техн. наук. Белгород, 2017. 187 с.
48. **Khan Z.S., Bussel F.V., Schaber M., Seemann R., Scheel M., Michiel M.D.** High-speed measurement of axial grain transport in a rotating drum // *New Journal of Physics*. 2011. P. 124-129. DOI:10.1088/1367-2630/13/10/105005/
49. **Weinekötter R., Gericke H.** *Mixing of solids // Kluwer academic publishers*. 2000.
50. Официальный сайт компании «АЙРИХ». Каталог смесительного оборудования. URL: <https://www.eirich.ru/ru/tehnologija/smesitelnoe-oborudovanie/> (дата обращения: 18.10.2022).
51. Официальный сайт строительного портала StroyPlus.ru. Российский рынок алмазного инструмента. URL: <https://stroyplus.ru/tehnika-i-oborudovanie/30268/> (дата обращения: 10.02.2024).
52. Официальный сайт Федерального института промышленной собственности – ФИПС, (запрос: «Смесители сыпучих материалов»). URL: <https://fips.ru/iiss/> (дата обращения: 10.02.2024).
53. Официальный сайт Bühler. URL: <https://former.buhlergroup.com/europe/ru/9869.html> (дата обращения: 10.02.2024).
54. Официальный сайт Gericke. URL: <https://www.gerickegroup.com/contact/russia> (дата обращения: 10.02.2024).
55. Официальный сайт ООО «Шанхай» «SIECHI»/ Промышленное оборудование. Продукты и решения для порошковых материалов. URL: <http://siechiindustry.com/ru/products/powder.html> (дата обращения: 10.02.2024).
56. Официальный сайт Uelzener. URL: <https://www.uelzener-ums.de/kontakt/>(дата обращения: 10.02.2024).
57. **Бакин М.Н.** Совершенствование процесса смешивания сыпучих материалов в новом аппарате с подвижной лентой: дисс. ... канд. техн. наук. Ярославль, 2014. 179 с.

Поступила в редакцию 21.10.2024

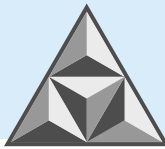
Одобрена после рецензирования 05.12.2024

Принята к опубликованию 12.12.2024

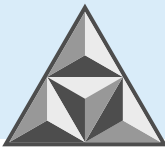


REFERENCES

1. **Aleksandrovsky, A.A. and Kuznetsov, K.N.** (1973), *Issledovanie protsessa smesheniya geterogennykh kompozitsiy* [Study of the process of mixing heterogeneous compositions], CNIINTI, Moscow, USSR (in Russian).
2. **Evseev, A.V.** (2021), "Theory and equipment of deterministic formation of heterogeneous mixtures", D. Sc. dissertation, Machines, units and processes (mechanical engineering), Tula State University, Tula, Russia (in Russian).
3. **Krasnov, I.N., Filin, V.M., Globin, A.N. and Ladygin, E.A.** (2014), *Proizvodstvo kombikormov v usloviyakh lichnykh podsobnykh i fermerskikh hozyajstv: monografiya* [Production of compound feeds in the conditions of personal subsidiary plots and farms]. Azov and Black sea Engineering Institute, Azov, Russia (in Russian).
4. **Makarov, Yu.I.** (1977), *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhniki* [Processes and apparatus of chemical technology], MIHM, Moscow, USSR (in Russian).
5. **Vasin, S.A., Evseev, A.V. and Malikov, A.A.** (2022), "Some aspects of the production of highly effective composite mixtures and materials", *Non-ferrous metals*, no. 6, pp. 51-58.
6. **Vasin, S.A., Evseev, A.V. and Yuraskova, I.A.** (2023), "Some aspects of the modified production of composite materials and products using them", *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, pp. 145-149 (in Russian).
7. **Bakin, M.N., Kapranova, A.B. and Verloka, I.I.** (2014), "Modern methods of mathematical description of the process of moving bulk materials", *Fundamental Research*, vol. 5, no.5, pp. 923-927 (in Russian).
8. **Yuraskova, I.A.** (2023), "Improving the quality of mixtures and composites formed by unit dispensers of a conveyor nonmixer", *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, no. 5, pp. 541-543 (in Russian).
9. **Kapranova, A.B., Bakin, M.N., Verloka, I.I. and Zaitsev, A.I.** (2015), "Methods for describing the movement of consolidated dispersed media in different planes for sections of drum mixtures", *Izvestiya Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, vol. 21, no. 2, pp. 296-304 (in Russian).
10. **Kapranova, A.B. and Verloka, I.I.** (2020), "Study of the volume fraction of the key component at the second stage of batch mixing using a gravity-type device", *J. Chem. English Process Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 52-57.
11. **Makarov Yu.I.** (1973), *Apparaty dlya smesheniya syuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials], Mashinostroenie, Moscow, USSR (in Russian).
12. **Chuvpilo, A.V.** (1964), *Novoe v teorii i tekhnike prigotovleniya poroshkovykh smesey* [New in the theory and technology of preparing powder mixtures], VNIIEM, Moscow, USSR (in Russian).
13. **Aleksandrovsky, A.A.** (1976), Research of the mixing process and development of equipment for the preparation of compositions containing a solid phase, Abstract Ph. D. dissertation, Kazan State University, Kazan, Russia (in Russian).
14. **Kolman-Ivanov, E.E.** (1972), *Mashiny-avtomaty himicheskikh proizvodstv* [Automatic machines for food production], Mashinostroenie, Moscow, USSR (in Russian).
15. **Kafarov V.V., Dorokhov I.N. and Arutyunov, S.Yu.** (1985), *Sistemniy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Protsessy smesheniya i izmel'cheniya syuchikh materialov* [System analysis of chemical technology processes. The process of mixing and grinding bulk materials], Nauka, Moscow, USSR (in Russian).
16. **Barantseva, E.A.** (2010), Modeling and optimization of lubricant supply processes. Abstract Ph. D. dissertation, Ivanovo State University, Ivanovo, Russia (in Russian).
17. **Kapranova, A.B.** (2009), Deaeration of granular media in processes combined with mixing. Abstract of D. Sc. Dissertation, Ivanovo State University, Ivanovo, Russia (in Russian).
18. **Kafarov, V.V. and Glebova, M.B.** (1991), *Matematicheskoe modelirovanie osnovnykh protsessov khimicheskikh proizvodstv* [Mathematical modeling of the main processes of chemical production], Vysshaya shkola, Moscow, USSR (in Russian).
19. **Wang, S. and Lee, C.H.** (2012), "Application and development of a highly efficient abrasive process", *International Journal of Advanced Science and Technology*, vol. 47, pp. 51-64.
20. **Vasin, S.A., Evseev, A.V., Malikov, A.A. and Yuraskova, I.A.** (2023), "Preparation of mixtures of heterogeneous components and agents with a deterministic approximation of their sources for the creation of new composite materials", *Stankoinstrument*, no. 3, pp. 52-57 (in Russian).



21. **Vasin, S.A., Evseev, A.V., Pershin, V.F. and Yuraskova, I.A.** (2023), "Quality control of some composite and heterogeneous materials by modification of nanocomponents", *Vestnik RGUPS. Mashinostroenie*, no. 2, pp. 139-145 (in Russian).
22. **Yuraskova, I.A.** (2023), "Improving the quality of mixtures and composites formed by unit dispensers of a conveyor nonmixer", *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, no. 5, pp. 541-543 (in Russian).
23. **Yudaev, I.V., Globin, A.N. and Plotnikova, N.V.** (2018), "Modeling of processes in a screw feeder", *Bulletin of the Nizhnevolsky agricultural university complex: science and higher professional education*, vol. 4, no. 52, pp. 353-360. ISSN 2071-9485 (in Russian).
24. **Sivasubramanian, P., Mayandi, K., Arumugaprabu, V., Rajini, N., and Rajesh S.** (2021), "History of composites and polymers", *Polymer-based composites*, pp. 1-21.
25. **Makarov, Yu.I.** (1973), *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials]. Mashinostroenie, Moscow, USSR (in Russian).
26. **Fadin, Yu.M. and Shemetova, O.M.** (2020), "Application of pneumatic mixers in construction", *Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya stroitel'stva*, pp. 250-254 (in Russian).
27. **Timonin, A.S., Baldin, B.G., Borshchev, V.Ya. and Gusev, Yu.I.** (2008), *Mashiny i apparaty khimicheskikh proizvodstv: ucheb. posobie* [Machines and apparatus for industrial production], Publishing house N.F. Bochkarev, Kaluga, Russia (in Russian).
28. **Yuraskova, I.A.** (2022), "Classification Methods for preparing heterogeneous mixtures and equipment for their implementation", *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, no. 10, pp. 482-485 (in Russian).
29. **Akhmedpashaev, A.U.** (2013), "Technology for manufacturing powder shaped cutters by cold pressing", *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, pp. 46-52 (in Russian).
30. **Bakin, M.N., Verloka, I.I. and Kapranova, A.B.** (2015), "On experimental distributions of particles of bulk components in rarefied flows", *Izv. vuzov. Khim. i khim. tekhnologiya*, vol. 23, no. 10, pp. 70-72 (in Russian).
31. **Lukash, A.N., Evseev, A.V. and Chuvpilo, A.V.** (2000), "Development of technologies and equipment for the preparation of mixtures of bulk materials", *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Mashinostroenie*, no. 5, pp. 218-224 (in Russian).
32. **Chuvpilo, A.V.** (1968), *Raschet, konstruirovaniye i issledovaniye oborudovaniya proizvodstva istochnikov toka* [Calculation, design and research of equipment for the production of current sources], Energiya, Moscow, USSR (in Russian).
33. **Chuvpilo, A.V.** (1967), "Residence time and the effect of longitudinal mixing of metal and semiconductor powders", *Abstracts of reports of an industry scientific conference*, pp. 33-35 (in Russian).
34. **Pershin, V.F., Vorobyov, A.M. and Nechaev, V.M.** (2018), "Two-stage continuous dosing in the production and use of carbon nanomaterials", *Khim. i neftegaz. mashinostroenie*, no. 6, pp. 12-14 (in Russian).
35. **Evseev, A.V., Yuraskova, I.A., Chechuga, A.O., Kasatkin, G.V., and Khachlaev, T.S.** (2023), "Mathematical model for optimizing the determination of the number of doses of components dispensed by discrete dispensers to obtain a minimum portion of a mixture with specified probabilistic characteristics on a conveyor nonmixer", *Lecture Notes in Mechanical Engineering: Proceedings of the 9th International Conference on Industrial Engineering*, Sochi, Russia, May, 2023, pp. 83-92 (in Russian).
36. **Lukash, A.N., Evseev, A.V., Ovchinnikova, T.A., Vlasov, K.V. and Karpukhina, O.V.**, Tula State University (2006), *Sposob smesheniya sypuchikh komponentov i ustrojstvo dlya ego realizatsii* [Method of mixing bulk components and device for its implementation], Tula, RU, Pat. 2271243 (in Russian).
37. **Evseev, A.V.**, Tula State University (2019), *Sposob polucheniya smesi iz sypuchikh komponentov i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya* [A method for producing a mixture of bulk components and a device for its implementation], Tula, RU, Pat. 2483790 (in Russian).
38. **Lukash, A.N., Klusov, I.A. and Evseev, A.V.**, Tula State University (1999), *Sposob smesheniya sypuchikh komponentov i ustrojstvo dlya ego realizatsii* [A method for mixing bulk components and a device for its implementation], Tula, RU, Pat. 2129911 (in Russian).
39. **Selivanov, Yu.T., Pershin, V.F. and Polyakov, B.E.**, Tula State University (2013) *Sposob nepreryvnogo prigotovleniya mnogokomponentnykh smesey sypuchikh materialov* [Method for continuous preparation of multicomponent mixtures of bulk materials], Tula, RU, Pat. 2542241 (in Russian).



40. **Evseev, A.V., Vasin, S.A., Pershin, V.F., Kitanina, T.I. and Yuraskova, I.A.**, Tula State University (2023), *Ustrojstvo dlya polucheniya smesi iz sypuchikh komponentov* [Device for producing a mixture of bulk components], Tula, RU, Pat. 2804823.
41. **Evseev, A.V.**, Tula State University (2019) *Rotorniy pitatel' dlya sypuchego materiala* [Rotary feeder for bulk material], Tula, RU, Pat. 2708780.
42. **Evseev, A.V., Vasin, S.A., Blagoveshchensky, D.I., Kozlovsky, V.N., Kitanina, T.I. and Yuraskova, I.A.**, Tula State University (2023), *Programma raschyota pokazatelej kachestva smesey i kompozitov na osnove diagrammy Pareto* [Program for calculating quality indicators of mixtures and composites based on the Pareto diagram], Tula, RU, program 2023611457 (in Russian).
43. **Borodulin, D.M.** (2013), Increasing the efficiency of the mixing process when obtaining combined products in centrifugal mixing units, Abstract of D. Sc. Dissertation, Processes and apparatuses of the food industry, Kemerovo Technological Institute of Food Industry, Kemerovo, Russia (in Russian).
44. **Trofimov, V.I. and Lebedev, V.E.**, Tula State University (2007), *Sposob prigotovleniya suhoj stroitel'noj smesi* [Method for preparing dry building mixture], Tula, RU, Pat. 2309841 (in Russian).
45. **Trofimov, V.I., Smirnov, M.A., Lebedev, V.E., Chugreev, A.A. and Kalinin, I.S.**, Tula State University (2009), *Ustrojstvo dlya prigotovleniya suhoj stroitel'noj smesi* [Device for preparing dry construction mixture], Tula, RU, Pat. 2363573 (in Russian).
46. **Strenk, F.** (1975), *Peremeshivanie i apparaty s meshalkami* [Stirring and apparatus with mixers], transl. from Polish, ed. by I.A. Szcziplyak, Chimiya, Leningrad, USSR (in Russian).
47. **Antsiferov, S.I.** (2017), "Increasing the efficiency of the mixing process by improving the design of a planetary mixer", Ph.D. dissertation, Machines, units and processes (construction, housing, and utilities), Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia (in Russian).
48. **Khan, Z.S., Bussel, F.V., Schaber, M., Seemann, R., Scheel, M. and Michiel, M.D.** (2011), "High-speed measurement of axial grain transport in a rotating drum", *New Journal of Physics*, pp. 124-129 (in Russian).
49. **Weinekötter, R. and Gericke, H.** (2000), *Mixing of solids*, Kluwer academic publishers.
50. The official site Eirich (2024), "Mixing equipment catalogue", available at: URL: <https://www.eirich.ru/ru/tehnologija/smesitelnoe-oborudovanie/> (Accessed 18 Feb. 2024).
51. The official site StroyPlus.ru (2024), "Russian market of diamond tools", available at: <https://stroyplus.ru/tehnika-i-oborudovanie/30268/> (Accessed 10 Feb. 2024).
52. Official website of the Federal Institute of Industrial Property (2024), "(enquiry: 'Bulk material mixers')", available at: <https://fips.ru/iiss/> (Accessed 10 Feb. 2024).
53. The official site Bühler (2024), available at: <https://former.buhlergroup.com/europe/ru/9869.html> (Accessed 10 Feb. 2024).
54. The official site Gericke (2024), available at: <https://www.gerickegroup.com/contact/russia> (Accessed 10 Feb. 2024).
55. The official site Shanghai Ltd. Siechi (2024), "Industrial equipment. Products and solutions for powder materials", available at: <http://siecheindustry.com/ru/products/powder.html> (Accessed 10 Feb 2024).
56. The official site Uelzener (2024), available at: <https://www.uelzener-ums.de/kontakt> (Accessed 10 Feb. 2024).
57. **Bakin, M.N.** (2014), Improving the process of mixing bulk materials in a new apparatus with a moving belt, Ph. D. dissertation, Processes and apparatuses of chemical technologies, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia.

Received 21.10.2024

Approved 05.12.2024

Accepted 12.12.2024