

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ. СТАНДАРТИЗАЦИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА PRODUCT QUALITY MANAGEMENT. STANDARDIZATION. INDUSTRIAL MANAGEMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.922: 621.921.34
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-173-180



ПРОГРАММА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РАСЧЕТА СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГРАММ ИСИКАВЫ-ПАРЕТО – MIXPARETO V3.0

Евсеев А.В., Яковлев Б.С., Карпилов Д.А., Черкаев Я.А., Петров С.А., Маркаров Е.Э.

Тульский государственный университет, Тула, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Актуальность работы обусловлена необходимостью получения гетерогенных композиций с заданными и обеспеченными показателями качества, что не позволяет получать ни одна традиционная технология. **Цель работы.** Реализация и изучение программы оптимизации поиска и анализа наиболее важных параметров для формирования показателей качества композитов и гетерогенных смесей, полученных различными методами и на различном оборудовании, в том числе с использованием нового класса автоматизированных машин – немиксеров методами управляемой однородности. **Используемые методы.** Ввод исходных данных для расчета осуществляется с использованием диаграммы Исикавы, а анализ полученных результатов осуществляется на основе данных диаграммы Парето. Оптимизация параметров производственных процессов осуществлялась с использованием симбеоза данных инструментов TQM с расширенным выбором различных алгоритмов, находящихся в теле разработанного программного обеспечения. **Новизна.** Методы управляемой однородности являются оригинальными и подтверждены соответствующими охраняемыми документами на технологические методы, оборудование и программное обеспечение. Научная новизна заключается в разработке и использовании новых методов формирования управляемой однородности гетерогенных композиций. **Результат.** Использование разработанного программного продукта позволило на практике применительно к некоторым (металлическим и неметаллическим) гетерогенным композициям оптимизировать получение высокой управляемой однородности и улучшить показатели качества композиций от 25% и выше. **Практическая значимость.** Использование разработанного программного обеспечения целесообразно и возможно как в условиях реальных производственных процессов для улучшения качества выпускаемой продукции, так и в учебных целях при подготовке специалистов различного уровня профильных направлений.

Ключевые слова: композиты, гетерогенные композиции, смеси, управляемая однородность, оптимизация, диаграмма Исикавы, диаграмма Парето, программное обеспечение, эксперимент, верификация

© Евсеев А.В., Яковлев Б.С., Карпилов Д.А., Черкаев Я.А., Петров С.А., Маркаров Е.Э., 2026

Для цитирования

Программа для производственного расчета свойств композитов с использованием диаграмм Исикавы-Парето – MixPareto V3.0 / Евсеев А.В., Яковлев Б.С., Карпилов Д.А., Черкаев Я.А., Петров С.А., Маркаров Е.Э. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 173-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-173-180>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MIXPARETO V3.0: SOFTWARE FOR INDUSTRIAL CALCULATION OF COMPOSITE PROPERTIES USING ISHIKAWA-PARETO DIAGRAMS

Evseev A.V., Yakovlev B.S., Karpilov D. A., Cherkaev Ya.A., Petrov S.A., Markarov E.E.

Tula State University, Tula, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The relevance of this study is determined by the need to produce heterogeneous compositions with specified and guaranteed quality characteristics that cannot be achieved by conventional technologies. **Objectives.** The study is aimed at implementing and investigating a software program for optimizing the search and analysis of the most significant parameters influencing the quality characteristics of composites and heterogeneous mixtures produced by various methods and equipment, including a new class of automated machines such as non-mixers using the controlled homogeneity approach. **Methods Applied.** Input data for calculations are generated using the Ishikawa diagram, while the analysis of the obtained results is based on the Pareto diagram. Optimization of production process parameters is carried out through the symbiosis of these TQM tools, combined with an extended selection of algorithms integrated into the developed software package. **Originality.** The controlled homogeneity methods are original and are protected by relevant intellectual property documents covering technological methods, equipment, and software. The scientific novelty lies in the development and application of new methods for achieving controlled homogeneity in heterogeneous compositions. **Results.** The developed software product was successfully applied to a number of metallic and non-metallic heterogeneous compositions, enabling the optimization of controlled homogeneity and improving quality indicators by 25% or more. **Practical Relevance.** The developed software can be effectively used both in real industrial production processes to improve product quality and in educational activities for training specialists at various levels in relevant engineering fields.

Keywords: composites, heterogeneous compositions, mixtures, controlled homogeneity, optimization, Ishikawa diagram, Pareto diagram, software, experiment, verification

For citation

Evseev A.V., Yakovlev B.S., Karpilov D. A., Cherkaev Ya.A., Petrov S.A., Markarov E.E. MIXPARETO V3.0: Software for Industrial Calculation of Composite Properties Using Ishikawa-Pareto Diagrams. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 173-180. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-173-180>

Введение

Производство композитных материалов является высокотехнологическим, трудоемким и энергозатратным производственным процессом. Это, в свою очередь, накладывает ряд жестких требований как на входные, так и выходные технологические и производственные показатели соответствующих инновационных технологических процессов.

Появление новых свойств материалов возможно только при высокой степени их однородности. Обеспечение такой высокой заданной, а в отдельных случаях – управляемой однородности получаемых композитов, а также создание высокого уровня автоматизации инновационных технологических процессов требует использования новых методов организации производства и нестандартных технологических подходов.

Традиционными методами миксинга достичь таких показателей практически невозможно. Кроме того, управление однородностью требует управления качеством получаемой продукции в соответствии нормативными документами, принципами и использованием различного инструментария общей теории управления качеством (TQM) [1-6].

Обеспечение такого управления невозможно без современных АСУ и соответствующего программного обеспечения к ним. Еще сложнее обеспечить высокую производительность производства гетерогенных композиций при минимуме брака. Поэтому научно-техническая задача производства композитов с новыми эксплуатационными свойствами при обеспечении заданного уровня показателей их качества методами управляемой однородности является актуальной и полностью соответствует пункту 21, а «Стратегии научно-технологического развития РФ» в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 года № 145. Решению этой задачи посвящены материалы данного исследования.

Материалы и методы исследования

Оптимизация управления качеством производства композитов методами управляемой однородности. Одним из наиболее перспективных подходов к решению данной научно-технической проблемы является разработка и применение нового типа автоматических технологических машин – нонмиксеров [1, 2, 7-10]. Эти устройства совместно с тонкопоточными дозирующими механизмами позволяют точно контролировать и регу-

лизовать состав получаемых смесей и композитов, обеспечивая более высокое качество и точность соотношения компонентов. При этом технологические процессы реализуются в условиях реального производства и в полном соответствии с принципами TQM.

В отличие от классических смесителей, нонмиксеры обеспечивают высокоточный синтез гетерогенных сред с различными физико-механическими свойствами, что гарантирует стабильность однородности. Основу процесса производства составляет подача компонентов в рабочую зону нонмиксера с помощью дискретных микродоз или непрерывных тонкоструйных потоков, в зависимости от типа используемых дозаторов.

За основу структуры и собственно наполнения программы авторами используется диаграмма Исикавы (рис. 1), основные факторы или группы факторов которой используются для ввода и первичного анализа данных в режиме реального времени при использовании разработанного ПО.

На данном примере основные группы факторов диаграммы Исикавы определены следующими группами: материалы, оборудование, технология, измерения и персонал. В каждой группе на диаграмме определены факторы первого порядка (см. рис. 1).

Оптимизация управления качеством при производстве композитов с помощью программного пакета *MixPareto v3.0* (далее – разработанное ПО [10]). Теперь уже с помощью диаграммы Парето методами разработанного ПО проводится вторичный, в том числе и корреляционный межфакторный анализ введенных или вновь введенных факторов или групп факторов. Все расчеты проводятся в рамках методов инструментария TQM и в процессе обработки информации многократно обновляются для нахождения максимального или наиболее эффективного конечного результата [7-10].

Интерфейс программы содержит три рабочих пространства: элемент для работы с факторами (рис. 2), диаграмма Парето (рис. 3), область изменения параметров диаграммы (рис. 4). Особенностью такой реализации интерфейса является то, что пользователю предоставляется возможность вводить факторы, проводить экспертную оценку, отслеживать изменения диаграммы Парето в режиме реального времени, задавать шаг графика и желаемый процент качества, а также отправлять результаты на печать.

Мы ввели параметры из диаграммы Исикавы на рис. 1, дали экспертные оценки каждому из них и получили результат (см. рис. 2), демонстрирующий тривиальные и значимые факторы в данном выборе. Тривиальные факторы выделены красным цветом, значимые – зеленым. Таким образом, благодаря программному обеспечению мы можем оценить и выделить группы факторов, оказывающих наибольшее влияние на процесс. По результатам расчетов в программе мы видим, что из набора факторов с рис. 1 мы получили, что тривиальными являются: рабочая группа, квалификация сотрудников, принципы управления и метрологическое обеспечение (сопровождение) соответствующего процесса синтеза композита. Значимые факторы: принцип укладки микродоз, скорость нонмиксинга, способы анализа, точность дозирования, хранение сырья, свойства сырья.

Теперь, изменяя экспертные оценки, мы будем получать разные результаты в режиме реального времени, что поможет нам точнее оценивать процесс. Более того, программа позволяет добавить новые факторы.

Также программа позволяет установить желаемый уровень качества, поменять шаг графика, экспортировать и распечатать результат (см. рис. 4).

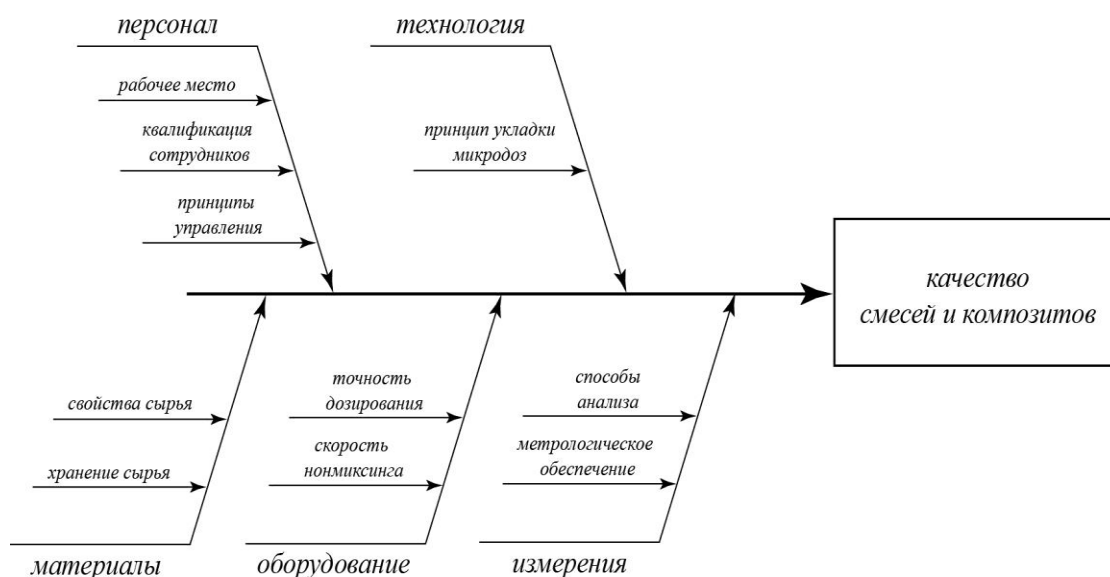


Рис. 1. Пример диаграммы Исикавы, используемой при производстве композитов
Fig. 1. Example of Ishikawa diagram used in composites production

Факторы		
Количество:	10	
Общее значение:	100	
Название	%	☑
Рабочее место	8	<input checked="" type="checkbox"/>
Квал. сотрудников	7	<input checked="" type="checkbox"/>
Принципы управлени	6	<input checked="" type="checkbox"/>
Принцип укладки до:	17	<input checked="" type="checkbox"/>
С-ва сырья	9	<input checked="" type="checkbox"/>
Хранения сырья	9	<input checked="" type="checkbox"/>
Точность дозировани	12	<input checked="" type="checkbox"/>
Скорость нонмиксинг	14	<input checked="" type="checkbox"/>
способы анализа	13	<input checked="" type="checkbox"/>
Метрологическое о-е	5	<input checked="" type="checkbox"/>

Рис. 2. Добавление факторов
Fig. 2. Adding factors

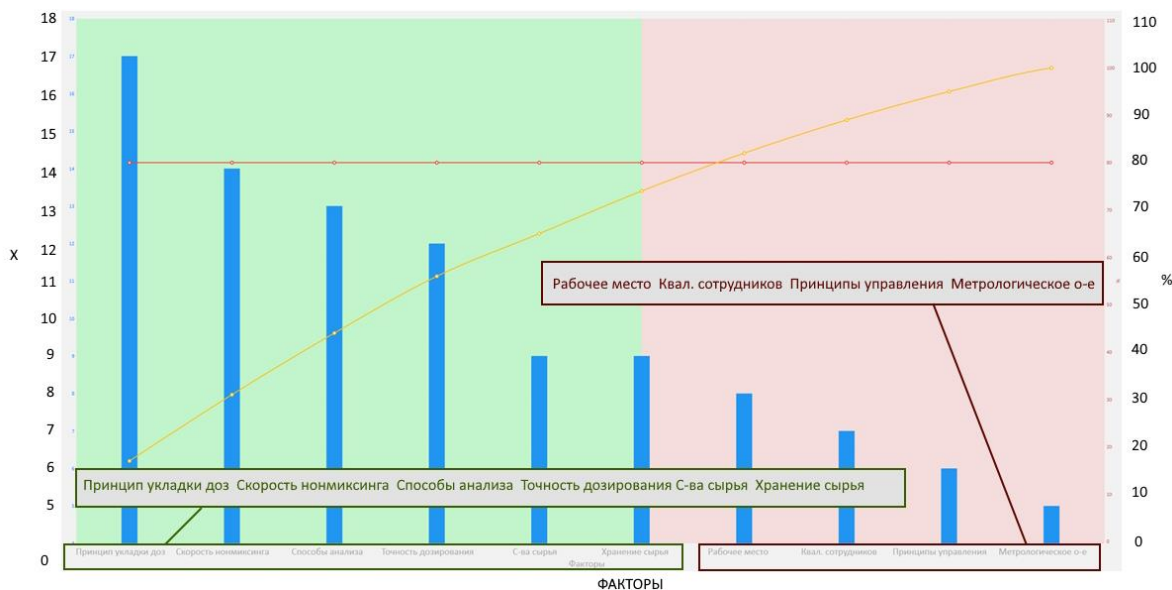


Рис. 3. Диаграмма Парето
Fig. 3. Pareto diagram

Уровень (%): <input type="text" value="80"/> <input type="button" value="Изменить"/>	Шаг графика: <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="Изменить"/> Авто: <input type="checkbox"/>	Факторы: <input type="button" value="Значимые"/> <input type="button" value="Тривиальные"/>	Печать и экспорт: <input type="button" value="Печать"/> <input type="button" value="Экспорт графика"/>
--	--	---	--

Рис. 4. Настройка диаграммы
Fig. 4. Diagram settings

Математические модели (подходы) процессов формирования однородности композитов из управляемых дискретных и непрерывных потоков компонентов и получения из них высокоэффективных продуктов рассмотрены в работах [2, 9, 10].

В ходе данного исследования были поставлены следующие задачи:

1) провести эксперимент получения композитов различного назначения, синтезируемых из непрерывных и дискретных потоков компонентов методами управляемой однородности на нонмиксерах [7, 8] при базовых (заданных) параметрах производства, рассчитанных при помощи разработанного программного обеспечения;

2) провести выборочный контроль и анализ качества композитов различного назначения;

3) провести разнонаправленные эксперименты при изменении входящих и выходных показателей производства при многофакторном расчете с помощью разработанного ПО;

4) провести комплексный анализ и верификацию полученных результатов.

Полученные результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования проводились на опытных стендах, обеспечивающих реализацию двух принципиально различных технологических решений нонмиксинга: из дискретных и непрерывных потоков, составляющих гетерогенные композиции компонентов.

Проведена соответствующая верификация разработанных математических моделей процессов нонмиксинга, зафиксированных в теле программы с результатами (выборочными), полученными экспериментально как авторами, так и другими исследователями [11-15].

Анализ данных для металлических композитов. Проведено сопоставление абсолютных и относительных характеристик качества продуктов, синтезируемых вероятностными и детерминированными методами и проведен сравнительный анализ [7, 8]. На **рис. 5** показано соотношение значений отклонений концентраций, составляющих композиты порошковых металлических компонентов при использовании двух вышеперечисленных способов.

Относительные показатели. В результате применения управляемого формирования однородности композитов при использовании алгоритма на базе разработанного ПО улучшилось качество металлических порошковых композитов:

- по техническим алмазам – от 1,6 до 9 раз;
- по олову – от 1,3 до 11,1 раза;
- по меди – от 2,5 до 14,9 раза.



Рис. 5. Предельные отклонения содержания компонентов в образцах инструментальных композитов: а – алмазы; б – олово; в – медь

Fig. 5. Maximum deviations in the component content of tool composite samples: а is diamonds; б is tin; в is copper

Анализ данных для неметаллических композитов. На **рис. 6** показано соотношение значений отклонений концентраций компонентов, составляющих бетонные композиты при использовании двух вышеперечисленных способов.

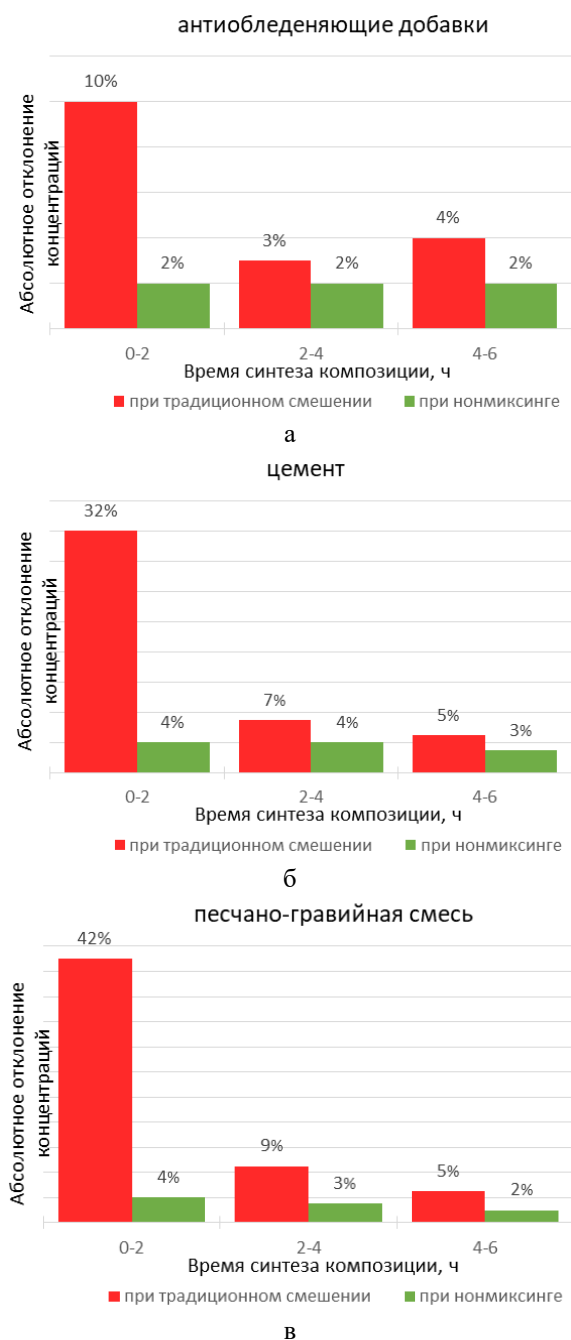


Рис. 6. Предельные отклонения содержания компонентов в образцах бетонных композитов: а – модификаторы; б – цемент; в – наполнитель

Fig. 6. Maximum deviations in the component content of concrete composite samples: а is modifiers; б is cement; в is filler

Относительные показатели. В результате применения управляемого формирования однородности смеси и ее оптимизации с помощью разработанного ПО качество композитных бетонов улучшилось по трём компонентам:

- по модификаторам – от 1,5 до 5 раз;
- по цементу – от 1,25 до 10,7 раза;

– по наполнителю – от 1,25 до 21,0 раза.

Теоретические разработки с использованием элементов теории немиксинга [6] вполне удовлетворительно подтверждены результатами экспериментальных исследований.

Можно сделать вывод, что получаемые потоки компонентов обеспечивают выдачу микродоз по массе и времени в отработанных экспериментально режимах в соответствии с распределением Гаусса, а данные устройства и методы синтеза потоков могут быть использованы далее в автоматах-немиксерах для получения высококачественных композиций с заданным гарантированным качеством и производительностью.

Верификация сходимости экспериментально полученных результатов с прогнозами, смоделированными с использованием разработанного ПО, не превысила уровень в 5-7%.

Заключение

Полученные в результате обработки информации данные при использовании разработанного ПО, в том числе и при учете полученных текущих экспериментальных характеристик, проходили верификацию при сравнении полученных расчетных и экспериментальных данных по показателям качества получаемых композитов.

В целях улучшения качества использования разработанного ПО было проведено более 1000 тестирований, как в лабораторных, так и в реальных производственных условиях. В конечном итоге разработано ПО версии 3.0, в том числе с использованием актуальных инструментов [16-18].

Однако понятно, что на перспективу необходимо разработать уже не прикладное ПО, а более совершенную экспертную систему, основной особенностью которой будет интеграция в нее корреляционных зависимостей и функций между параметрами (входными и выходными факторами) или их группами. При этом желательно использование не только стандартных функций, но и аппроксимированных зависимостей, полученных в условиях реальных промышленных экспериментов.

Основные результаты, полученные при внедрении разработанного ПО:

- уровень автоматизации с использованием разработанного ПО повышен на 15-25%;
- время нахождения оптимального решения (максимального качества) сокращено в 2-3 раза.

Список источников

1. Евсеев А.В. Теория и оборудование детерминированного формирования однородности гетерогенных смесей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13 / Евсеев Алексей Владимирович. Тула, 2021. 297 с.
2. Патент РФ № 2804823. Устройство для получения смеси из сыпучих компонентов. С01В 32/19, В82У 40/00 // Евсеев А.В. и др.; заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет. Опубл. 06.10.23. Бюл. № 28.

3. Капранова А.Б., Бакин М.Н., Верлока И.И. Моделирование критерия качества смеси в объеме барабанно-ленточного устройства // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2018. № 5. С. 3–9.
4. Размерные факторы в анализе качества перемешивания порошковых механических смесей / В.В. Мокрушин, А.Ю. Постников, А.А. Потехин, П.Г. Бережко, И.А. Царева, О.Ю. Юнчина // Молодежь в науке: сборник докладов 16-й научно-технической конференции. 2018. С. 98-103.
5. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
6. Мак-Келви Д.М. Переработка полимеров. Москва: Химия, 1965. 442 с.
7. Automated Production and Quality Control of Composites Produced by Automatic Non-Mixing Machines Employing Controlled Homogeneity Methods / Evseev A.V., Yuraskova I.A., Karpilov D. A., Cherkaev Y. A. // 2024 IEEE Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, Russia, 12–14 November 2024. С. 1–6. DOI: 10.1109/Dynamics64718.2024.10838640.
8. Providing production control of heterogeneous compositions from discrete and continuous flows of components / Evseev A.V., Yuraskova I.A., Karpilov D. A., Cherkaev Y. A. // 2024 IEEE Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, Russia, 12–14 November 2024. С. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics64718.2024.10838679.
9. Свидетельство № 2025612636. Программа расчёта и анализа показателей качества при производстве гетерогенных смесей на основе диаграммы Парето – MixPareto v2.0 / Евсеев А.В., Карпилов Д.А., Черкаев Я.А., Юраскова И.А. Заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет. Дата рег. 03.02.2025. Бюл. № 2.
10. Свидетельство № 2025612637. Программа производственного расчёта свойств композитов с использованием диаграмм Исикавы-Парето – MixPareto v3.0 / Евсеев А.В., Черкаев Я.А. Заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет. Дата рег. 03.02.2025. Бюл. № 2.
11. Капранова А.Б., Верлока И.И. Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами // Теоретические основы химической технологии. 2018. Т. 53, № 5. С. 1-15.
12. ГОСТ 8.579-2019. Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к количеству фасованных товаров в упаковках любого вида при их производстве, расфасовке, продаже и импорте.
13. Григорьян С.Г., Дегтярёва А.Н. Имитационное моделирование процесса комбинационного дозирования. // Новая наука: техника и технологии: материалы междунар. науч.-практ. конф., 17 апреля 2017 г. Москва, 2017. С. 42–44.
14. Жавнер В.Л., Чжао Вэнь. Мехатронная система дозирования сыпучих продуктов малыми дозами // Современное машиностроение: наука и образование ММЕСЕ-2017: материалы 6-й междунар. науч.-практ. конф., 22–23 июня 2017 г. СПб., 2017. № 6. С. 462–470. DOI: 10.1872/MMF-2017–40.
15. Peng Bo. Development and analysis of precision metrological loose packaging system. Hubei University of Technology. 2017.
16. Васильев А.Н. Программирование на С# для начинающих. Особенности языка. Москва: Эксмо, 2019. 528 с.
17. Комлев Н.Ю. Полезное программирование. Москва: Солон-Пресс, 2019. 256 с.
18. Gerard Sierksma; YoriZwols (2015). Linears and Integer Optimization: Theory and Practice. Boca Raton: CRC Press, 2015.

References

1. Evseev A.V. *Teoriya i oborudovanie determinirovannogo formirovaniya odnorodnosti geterogennykh smesei: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Theory and equipment of deterministic formation of homogeneity of heterogeneous mixtures. Doctoral dissertation]. Tula, 2021. 297 p.
2. Evseev A.V. et al. *Ustroystvo dlya polucheniya smesi iz syuchikh komponentov* [Device for producing a mixture from bulk components]. Patent RU, no. 2804823, 2023.
3. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I. Modeling the mixture quality criterion in the volume of a drum-belt device. *Khimicheskoe i nefegazovoe mashinostroenie* [Chemical and petroleum engineering machinery]. 2018;(5):3-9. (In Russ.)
4. Mokrushin V.V., Postnikov A.Yu., Potekhin A.A., Berezhko P.G., Tsareva I.A., Yunchina O.Yu. Dimensional factors in the analysis of powder mechanical mixture mixing quality. *Molodezh v nauke: sbornik докладов 16-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Youth in science. Proceedings of the 16th Scientific and Technical Conference]. 2018, pp. 98-103. (In Russ.)
5. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya syuchikh materialov* [Equipment for mixing bulk materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 216 p. (In Russ.)
6. McKelvey D.M. *Pererabotka polimerov* [Polymer processing]. Moscow: Khimiya, 1965, 442 p. (In Russ.)
7. Evseev A.V., Yuraskova I.A., Karpilov D.A., Cherkaev Y.A. Automated Production and Quality Control of Composites Produced by Automatic Non-Mixing Machines Employing Controlled Homogeneity Methods. 2024 IEEE Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, Russia, November 12-14, 2024. pp. 1-6. DOI: 10.1109/Dynamics64718.2024.10838640.
8. Evseev A.V., Yuraskova I.A., Karpilov D.A., Cherkaev Y.A. Providing production control of heterogeneous compositions from discrete and continuous flows of components. 2024 IEEE Conference Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). Omsk, Russia, November 12-14, 2024. pp. 1-4. DOI: 10.1109/Dynamics64718.2024.10838679.
9. Evseev A.V., Karpilov D.A., Cherkaev Ya.A., Yuraskova I.A. *Programma rascheta i analiza pokazatelei kachestva pri proizvodstve geterogennykh smesei na osnove diagrammy Pareto – MixPareto v2.0* [Software for calculation and analysis of quality indicators in the production of heterogeneous mixtures based on the Pareto chart – MixPareto v2.0]. Certificate, no. 2025612636, 2025.
10. Evseev A.V., Cherkaev Ya.A. *Programma proizvodstvennogo rascheta svoistv kompozitov s ispolzovaniem diagramm Ishikavy-Pareto – MixPareto v3.0* [Software for production calculation of composite properties using Ishikawa-Pareto diagrams – MixPareto v3.0]. Certificate, no. 2025612637, 2025.
11. Kapranova A.B., Verloka I.I. Stochastic description of the formation of bulk component flows in apparatuses with

- brush elements. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical engineering]. 2018;53(5):1-15. (In Russ.)
12. State Standard GOST 8.579-2019. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenii. Trebovaniya k kolichestvu fasovannykh tovarov v upakovkakh lyubogo vida pri ikh proizvodstve, rasfasovke, prodazhe i importe [State system for ensuring the uniformity of measurements. Requirements for the quantity of packaged goods in packages of any type during their production, packaging, sale and import].
 13. Grigoryan S.G., Degtyareva A.N. Simulation modeling of the combinatorial dosing process. *Novaya nauka: tekhnika i tekhnologii: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoy konferentsii* [New Science: engineering and technologies. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Moscow, 2017. pp. 42-44. (In Russ.)
 14. Zhavner V.L., Zhao Wen. Mechatronic system for small-dose dispensing of bulk products. *Sovremennoe mashinostroenie: nauka i obrazovanie MMESE-2017: materialy 6-i mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern mechanical engineering: science and education MMESE-2017. Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference]. Saint-Petersburg, 2017, no. 6, pp. 462-470. (In Russ.) doi:10.1872/MMF-2017-40.
 15. Peng Bo. Development and analysis of precision metrological loose packaging system. Hubei University of Technology; 2017.
 16. Vasilev A.N. *Programmirovaniye na C# dlya nachinayushchikh. Osobennosti yazyka* [Programming in C# for beginners. Language features]. Moscow: Eksmo, 2019, 528 p. (In Russ.)
 17. Komlev N.Yu. *Poleznoye programmirovaniye* [Useful programming]. Moscow: Solon-Press, 2019, 256 p. (In Russ.)
 18. Sierksma G., Zwols Y. *Linear and Integer Optimization: Theory and Practice*. Boca Raton: CRC Press, 2015.

Поступила 22.01.2026; принята к публикации 27.03.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 22/01/2026; revised 27/03/2026; published 30/06/2026

Евсеев Алексей Владимирович – доктор технических наук, доцент,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: ews1972@mail.ru. ORCID 0000-0003-0436-869X

Яковлев Борис Сергеевич – кандидат технических наук, доцент,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: bor_yak@mail.ru. ORCID 0000-0001-6856-6818

Карпилов Дмитрий Александрович – аспирант,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: karpilovdima@yandex.ru. ORCID 0009-0008-4383-9216

Черкаев Ярослав Андреевич – аспирант,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: yaroslav.cherkaev@yandex.ru. ORCID 0009-0008-6859-5705

Петров Сергей Александрович – аспирант,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: sap71ru@mail.ru. ORCID 0009-0000-0724-2465

Маркаров Евгений Эдуардович – аспирант,
Тульский государственный университет, Тула, Россия.
Email: eugene.markarov@gmail.com. ORCID 0000-0003-2397-5858

Alexey V. Evseev – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: ews1972@mail.ru. ORCID 0000-0003-0436-869X

Boris S. Yakovlev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: bor_yak@mail.ru. ORCID 0000-0001-6856-6818

Dmitry A. Karpilov – Postgraduate Student,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: karpilovdima@yandex.ru. ORCID 0009-0008-4383-9216

Yaroslav A. Cherkaev – Postgraduate Student,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: yaroslav.cherkaev@yandex.ru. ORCID 0009-0008-6859-5705

Sergey A. Petrov – Postgraduate Student,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: sap71ru@mail.ru. ORCID 0009-0000-0724-2465

Evgeny E. Markarov – Postgraduate Student,
Tula State University, Tula, Russia.
Email: eugene.markarov@gmail.com. ORCID 0000-0003-2397-5858