

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «ТГТУ»

д.т.н., профессор Д. Ю. Муромцев

2026 г.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» на диссертацию Смирнова Павла Михайловича на тему «Исследование процесса смешивания сыпучих материалов в барабанно-винтовом ступенчатом аппарате», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.13. - Процессы и аппараты химических технологий

#### Актуальность темы диссертации

Разработка эффективных устройств, обеспечивающих получение однородных сыпучих смесей для использования в различных отраслях химической промышленности, строительства, сельского хозяйства, энергетики и ряда других является актуальной задачей. Однако решение этой задачи связано с рядом трудностей. Одна из них связана с необходимостью приготовления смесей, содержащих частицы, отличающиеся по размеру, плотности, форме и ряду других физико-механических свойств и поэтому склонных к сегрегации. Кроме того, однородную смесь трудно получить, если она содержит малые добавки в концентрациях порядка 0,1 и ниже. Задача приготовления однородных смесей в указанных условиях является безусловно актуальной. Актуальность обусловлена также тем, что диссертационная работа направлена на создание эффективного смесительного оборудования для использования в технологии очистки дымовых выбросов от содержащихся в них серосодержащих примесей. Данная технология связана с предупреждением и снижением рисков чрезвычайных ситуаций техногенного характера, негативных социально-экономических последствий и входит в перечень важнейших наукоемких

технологий, определенных Указом Президента Российской Федерации от 18.06.2024 года № 529.

### **Анализ содержания диссертации**

Диссертация является завершенным исследованием, объединенным внутренним логическим единством. Она имеет традиционную для работ по специальности 2.6.13 структуру, включает введение, четыре главы, заключение, список использованных источников, приложение, содержащее программное обеспечение расчета процесса смешивания в разработанном аппарате и данные об использовании результатов работы в производстве. Диссертация представлена на 124 страницах, содержит 36 рисунков и таблицу.

*Во введении* сформулирована и обоснована актуальность темы исследования, поставлена цель работы и перечислены задачи, которые необходимо решить для ее достижения; сформулированы научная новизна и практическое значение результатов, а также основные положения, которые выносятся на защиту.

*Первая глава* посвящена обзору современных конструкций смесителей сыпучих материалов гравитационно-пересыпного действия и способов приготовления смесей, склонных к сегрегации, а также методов математического моделирования процесса смешивания сыпучих сред. По результатам проведенного анализа отмечено, что в конструкциях необходимо реализовывать сочетание различных способов подавления сегрегации сыпучей смеси. Автором предлагается использовать ступенчатую конструкцию аппаратов для повышения эффективности приготовления сыпучих смесей с малыми добавками с учетом явления сегрегации.

Далее проведен анализ современных подходов к математическому моделированию процессов смешивания, выделены перспективные методы и модели.

*Вторая глава* посвящена экспериментальным исследованиям процесса смешивания в разработанной конструкции барабанно-винтового смесителя

сыпучих материалов, которая приводится в начале главы. На конструкцию смесителя получен патент РФ на изобретение № 2812190. Ступенчатая конструкция обеспечивает решение поставленной задачи приготовления однородной смеси с малыми добавками ключевого компонента за счет использования метода разбавления.

Основной целью экспериментальных исследований являлось сравнение эффективности предложенного трехступенчатого смесителя с одноступенчатым аппаратом. При проведении экспериментальных исследований автор, наряду с известным бесконтактным способом определения однородности смеси, применяет новый способ, разработанный для проведения исследований в аппаратах с дополнительными рабочими элементами. На предложенный способ исследования также получен патент РФ № 2819489. В работе установлено влияние конструктивных параметров смесителя на качество получаемой смеси (шага и высоты винта). Экспериментальные зависимости получены в виде уравнений регрессии. В заключение главы на основании экспериментальных исследований качества смеси, получаемой в новом аппарате, даны рекомендации по его конструированию (выбору числа ступеней, параметров ступеней, параметров винтовых желобов смесителя).

*Третья глава* диссертации посвящена математическому моделированию процесса смешивания сыпучих компонентов в барабанно-винтовом аппарате. При моделировании область смешивания разделяется на две зоны характерного движения материала: зону транспортирования, контактирующую с корпусом смесителя в нижней его части, и зону обрушения. За счет разрежения потока в зоне обрушения происходит переход частиц с одной линии тока на другую, что приводит к смешиванию и сегрегации компонентов, различающихся по физико-механическим свойствам. Изменение поля концентраций двухкомпонентной смеси определяется уравнениями непрерывности, учитывающими суммарные потоки компонентов, включая сегрегационные потоки, потоки загрузки

смеси по ступеням через дозаторы и выгрузки смеси. Сегрегация определяется приложенной к частице равнодействующей сил тяжести и сил выталкивания Архимеда, которые возникают от суммарного действия на частицу, окружающих ее частиц.

При расчетах полей концентраций компонентов применялся метод конечных объемов с использованием противопоточной разностной схемы первого порядка точности. Проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, которое показало их удовлетворительное совпадение.

*В четвертой главе* автор разрабатывает методику инженерного расчета ступенчатого смесителя, которая включает расчет технологических (производительность), конструктивных и энергетических параметров. При расчетах автор учитывает условия сохранения потоков ключевого и транспортирующего компонентов в ступенях смесителя. Длина рабочей части корпуса смесителя определяется заданным коэффициентом неоднородности получаемой смеси и параметрами системы смеситель - смешиваемые компоненты. Расчет коэффициента неоднородности смеси осуществляется в соответствии с математической моделью процесса смешивания. Построена блок-схема расчета ступенчатого смесителя. Разработана программа расчета процесса смешивания в барабанно-винтовом ступенчатом смесителе, которая приводится в приложении.

В главе представлено также описание агрегата и технологии очистки дымовых газов от оксида серы, в котором использован разработанный аппарат со ступенчатым исполнением корпуса для приготовления составов с малыми добавками гашеной извести. В агрегате реализована технология десульфуризации дымовых газов, которые оказывают негативное влияние на здоровье человека и окружающую среду. Эффективность работы технологической схемы определяется, в том числе, однородностью получаемой в аппарате смеси твердых частиц угля и гашеной извести.

### **К научной новизне работы относится следующее:**

- математическая модель процесса смешивания сыпучего материала в новой конструкции барабанно-винтового ступенчатого аппарата, позволившая определить поле скоростей и концентраций частиц и получить зависимости коэффициента неоднородности смеси в произвольном его сечении;

- результаты экспериментальных исследований процесса смешивания в разработанном аппарате, представленные в виде уравнений регрессии, связывающих коэффициент неоднородности смеси с конструктивными параметрами (числом ступеней, их длинами, шагом и высотой винтового желоба) и концентрацией ключевого компонента;

- теоретическое обоснование методики инженерного расчета конструктивных и режимных параметров нового смесителя в части определения критерия качества смеси.

**Теоретическая значимость** диссертации состоит в том, что разработанная математическая модель, позволяет прогнозировать состояние однородности смеси в различных сечениях барабанно-винтового смесителя и может быть использована при разработке методов расчета смесителей.

### **Практическую ценность результатов работы представляют:**

- новая конструкция барабанно-винтового ступенчатого смесителя для приготовления однородных смесей с соотношением компонентов 1:1-1:11 (патент РФ № 2812190);

- способ экспериментального исследования процесса смешивания в устройстве непрерывного действия с дополнительными рабочими элементами (патент РФ № 2819489);

- алгоритм численного расчета процесса смешивания в новом аппарате по предложенной математической модели;

- методика инженерного расчета нового смесителя сыпучих материалов;

- практическое использование нового смесителя в топливно-энергетической отрасли для очистки дымовых газов от угольной пыли в агрегате для десульфуризации дымовых газов.

**Достоверность полученных результатов** обоснована применением апробированных экспериментальных методов исследований, современных компьютерных методов обработки результатов, а также корректностью моделирования процесса смешивания на основе известных законов механики движения и взаимодействия частиц.

**Основные результаты и положения диссертации** доложены и обсуждены на международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологиях»: ММТТ-36 (Н. Новгород, НГТУ, 2023г.); ММТТ-37 (Казань, КНИТУ, 2024г.); ММТТ-38 (Гродно, 2025г.); XII Международном Беремжановском съезде по химии и химической технологии, 4-6 декабря, 2024, Алматы, Казахстан; 75-78 всероссийских научно-технических конференциях студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием (Ярославль 2022–2025гг.).

Основное содержание диссертации изложено в 23 работах, в том числе в 4 статьях в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, 2 патентах на изобретение РФ.

**Автореферат** достаточно полно отражает основные положения, результаты, выводы и содержание диссертации.

#### **Рекомендации по использованию результатов работы**

Методика инженерного расчета смесителя сыпучих материалов, алгоритм численного расчета процесса смешивания в разработанной конструкции смесителя с использованием предложенной математической модели может быть рекомендован к применению организациями, занимающимися разработкой, изготовлением и эксплуатацией смесительного оборудования, в том числе НПО «Агромаш» (г. Ногинск, Московская область); Завод «Строммашина» (г. Самара); Асфальтобетонный завод №1 (г. Санкт-Петербург), «АБЗ КАПОТНЯ» (г. Дзержинский, Московская область).

## Замечания по диссертации

1. В диссертации желательно было обсудить ограничения по использованию предложенного метода определения однородности смеси (глава 2) в зависимости от ее склонности к сегрегации. Очевидно, что при высокой склонности смеси к сегрегации результаты оценки ее качества будут искажены при выгрузке смеси из рабочего объема смесителя на ленту.

2. При определении потока сегрегации учитывается число контактов контрольной частицы с окружающими частицами среды, которое согласно формулировке (стр. 64 диссертации, стр. 12 автореферата) определяется как отношение квадратов диаметров частиц. Из приведенного выражения следуют требующие объяснения выводы: 1) число контактов для крупной контрольной частицы меньше единицы; 2) число контактов уменьшается с увеличением диаметра контрольной частицы?

3. В диссертации проведена только качественная оценка соответствия расчетных результатов с экспериментальными данными (рис. 3.4, стр. 71 диссертации, рис. 8, стр. 13 автореферата). Следовало бы провести проверку адекватности разработанной математической модели процесса смешивания.

4. В работе не дано обоснование выбора числа ступеней барабанно-винтового смесителя.

5. Неудачная формулировка предмета исследования: 1) автор заявляет о механизме смесеобразования, однако в диссертации сведения о механизме не приводятся; 2) скорее предметом исследования является динамика процесса смешивания, но не «поведение критерия однородности».

6. В тексте диссертации встречается терминология, не являющаяся общепринятой при описании процессов смешивания, например, «транспортирующий компонент» (стр. 23, 34 и далее по тексту).

Указанные замечания не снижают общего положительного впечатления от рассмотренной диссертационной работы.

## Заключение

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой содержатся новые научно обоснованные технические и технологические решения по совершенствованию процессов и оборудования для смешения сыпучих сред. Диссертация соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Ємирнов Павел Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.13 - Процессы и аппараты химических технологий.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность» 04 марта 2026 года, протокол № 3.

Заведующий кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,  
доктор технических наук,  
профессор



Гатапова Наталья Цибиковна

### Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»)

392000, г. Тамбов, ул. Советская, д.106/5, помещение 2.

**Телефон:** (4752) 63-10-19

**E-mail:** [tstu@admin.tstu.ru](mailto:tstu@admin.tstu.ru)

**Сайт:** <https://www.tstu.ru/>