

ОТЗЫВ

на диссертационную работу Смирнова Павла Михайловича

«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 диссертации

Процессы смешивания сыпучих материалов находят широкое применение в различных отраслях химической технологии и смежных с ней отраслях. В представленной диссертационной работе исследуется процесс приготовления однородных сыпучих смесей склонных к сегрегации, содержащих сравнительно небольшие добавки компонента, входящего в смесь в соотношении до 1:11. Получение однородных смесей с малыми добавками сегрегирующих компонентов является актуальной, но достаточно сложной технической и технологической задачей, требующей всесторонних экспериментальных и теоретических исследований процесса смешивания. Решение этой задачи автор связывает с разработкой и совершенствованием ступенчатого барабанно-винтового аппарата непрерывного действия. Устройства барабанного типа широко распространены в производстве благодаря простоте конструкций и низкой энергоемкости. Кроме того, актуальность работы определяется использованием разработанного оборудования и других результатов исследований в агрегате для очистки газовых промышленных выбросов от содержащихся в них вредных примесей серы. Это связано с приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники, определенными указом Президента РФ № 529 от 18.06.2024 года.

Анализ содержания диссертации

Диссертация имеет традиционную структуру и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 163 наименования, приложения, в котором дана информация о практическом использовании результатов работы в производстве, а также представлено программное обеспечение, разработанное в ходе выполнения исследований. Диссертация изложена на 124 страницах и содержит 36 рисунков и одну таблицу.

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, поставлена цель работы, сформулированы задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов работы, а также основные положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе проведен обзор известных смесителей сыпучих материалов барабанного типа. При анализе конструкций аппаратов автор опирается на известные классификации методов повышения качества смесей. Рассмотрены способы приготовления смесей, склонных к сегрегации. Проанализированы и систематизированы основные методы подавления сегрегации в этих устройствах, а также проведен обзор и анализ основных методов математического моделирования процессов смешивания сыпучих материалов. В качестве наиболее эффективных и обоснованных рассматриваются методы механики сплошных сред и стохастические модели. Отмечается высокая эффективность численных методов моделирования процессов смешивания.

Во второй главе разрабатывается смеситель для приготовления сыпучих смесей, склонных к сегрегации с малыми добавками ключевого компонента.

При разработке принципиальной схемы смесителя была использована ступенчатая конструкция корпуса, которая обеспечивает переработку компонентов с использованием метода разбавления. На конструкцию смесителя получен патент РФ на изобретение, что свидетельствует о его новизне. Приводится описание конструкции смесителя и принципа его работы. Разработана экспериментальная установка смесителя для решения задач оценки эффективности применения ступенчатого барабанно-винтового смесителя. Автор проводит сопоставление его работы с работой одноступенчатого аппарата. При этом исследования показали преимущество трехступенчатого барабанно-винтового аппарата перед одноступенчатым смесителем при переработке смеси с небольшой концентрацией ключевого компонента (0,125 и 0,083), склонной к сегрегации, как по крупности частиц, так и по их плотности.

Получены экспериментальные кривые смешивания, отражающие влияние шага и высоты борта винтового желоба смесителя на однородность получаемых смесей. Результаты экспериментов приводятся в виде соответствующих графических зависимостей. Таким образом, по результатам исследований могут быть даны рекомендации по выбору некоторых конструктивных параметров, таких как число и длина ступеней, шаг и высота винтовых желобов.

При проведении экспериментальных исследований был предложен и апробирован способ исследования качества смеси в устройстве с дополнительными рабочими элементами, новизна которого подтверждена патентом РФ.

В третьей главе диссертации разрабатывается математическое описание процесса смешивания сыпучих материалов в исследуемом аппарате. При моделировании процесса автор использует методы механики сплошных сред. Изменение поля концентраций условной двухкомпонентной смеси определяется уравнением непрерывности. В поперечном сечении материала выделены две зоны характерного поведения. В нижней зоне частицы материала поднимаются вверх по линиям тока и не переходят из одной линии тока в другую, а в зоне обрушения скатываются вниз под

действием силы тяжести, попадая в нижней части снова в транспортирующую зону. При моделировании процесса сегрегации смеси предполагается, что механизм его определяется различием частиц компонентов по диаметрам и плотностям. Силы тяжести, приложенные к частице и силы выталкивания, действующие на неё со стороны окружающих частиц, не уравниваются друг друга. Это приводит к возникновению сегрегационных потоков. Численные расчеты, в соответствии с математической моделью процесса, осуществлены методом конечных объемов с применением противоточной разностной схемой первого порядка.

Разработка методики инженерного расчета ступенчатого смесителя приводится в четвертой главе. В ее основу положены экспериментальные и теоретические исследования смесителя, представленные в третьей главе. Методика включает расчет конструктивных параметров нового аппарата по заданной производительности, по коэффициенту неоднородности, физико-механическим свойствам компонентов и концентрации в смеси ключевого компонента. При установлении связи производительности аппарата с его конструктивными параметрами автор учитывает условия сохранения потоков смешиваемых компонентов в ступенях смесителя. В основу расчета длины корпуса аппарата положена математическая модель процесса.

Также в четвертой главе приводится описание промышленного использования смесителя в топливно-энергетической отрасли для очистки дымовых газов от угольной пыли, а именно в агрегате десульфуризации дымовых газовых выбросов, которые оказывают негативное влияние на здоровье человека и окружающую среду. Применение ступенчатого смесителя в агрегате обеспечивает повышение его эффективности за счет увеличения поверхности контакта реагирующих компонентов.

Научную новизну работы составляют:

- математическая модель процесса смешивания сыпучего материала в новом аппарате, позволяющая определить поле скоростей и концентраций частиц и рассчитать коэффициент неоднородности смеси в произвольном сечении;

- экспериментальные исследования процесса смешивания, в результате которых получены уравнения регрессии, связывающие коэффициент неоднородности смеси с параметрами нового аппарата (числом ступеней, их длинами, шагом и высотой винтового желоба, концентрацией ключевого компонента);

- теоретическое обоснование методики инженерного расчета конструктивных и режимных параметров нового смесителя.

Научная новизна, на которую претендует соискатель, соответствует содержанию работы и полученным экспериментальным результатам. Основные научные положения теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены.

Теоретическая значимость состоит в предложенной математической модели процесса смешивания, которая позволяет прогнозировать состояние

однородности смеси в различных сечениях смесителя и может быть использована при создании обоснованных методов расчета новых устройств.

К практической ценности результатов исследований можно отнести:

- разработку нового барабанно-винтового ступенчатого смесителя для приготовления однородных смесей с соотношением компонентов до 1:11 и ниже;

- разработку эффективного способа экспериментального исследования процесса смешивания в устройствах непрерывного действия с дополнительными рабочими элементами;

- алгоритм численного расчета процесса смешивания в новом аппарате по предложенной математической модели и метод инженерного расчета нового смесителя сыпучих материалов, который может быть востребован проектными организациями для разработки смесительного оборудования в различных отраслях промышленности;

- эффективное использование новой конструкции смесителя в агрегате для десульфуризации дымовых газов.

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

Основное содержание диссертации изложено в 23 научных работах, в том числе в 6 статьях в журналах из перечня рекомендованного ВАК РФ, 2 патентах на изобретение РФ и в 15 тезисах докладов на научных конференциях, в том числе 7 международных.

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.).

Замечания по диссертации

1. В списке литературы содержится 115 (из 163) названий источников, изданных более 20 лет назад. По-видимому, этот список должен включать больше работ, опубликованных за последние годы.
2. В диссертации на схемах, представленных на рисунках 2.2, 3.1, 3.3, 4.1 и 4.2., не показаны или показаны только частично геометрические параметры аппарата, связанные с его технологическими параметрами (производительностью, концентрацией смеси и другими). Например,

не ясно к чему относится подпись к расчётной схеме, представленной на рис. 3.1.

3. Лабораторная установка для проведения экспериментальных исследований не точно соответствует оригиналу исследуемого аппарата. Внутренняя форма торообразной эластичной камеры (покрышки) отличается от формы винтового желоба, воспроизведенного на установке. Не ясно также как обоснован выбор материалов при проведении исследований.
4. При пояснении поведения кривых, показанных на рис. 2.10, автор использует термин «метод разбавления», который недостаточно определен с точки зрения его использования в ступенчатом аппарате.
5. Вызывает сомнение обоснованность выбора в виде экспоненты функции, аппроксимирующей результаты экспериментальных исследований влияния длины аппарата на качество смеси, представленные на рис. 2.7 - 2.9, 2.15, 2.16. При больших абсолютных значениях показателя экспоненты коэффициент неоднородности смеси определяется только положительной константой.
6. Выводы по второй и третьей главам носят констатирующий характер. Третий вывод по второй главе в части выбора числа и параметров ступеней сформулирован недостаточно ясно.
7. Не ясно, каким образом данные, представленные на рис. 3.3, соотносятся с экспериментальной частью работы.

Указанные замечания не снижают общего хорошего впечатления от диссертационной работы и компетентности соискателя.

Заключение по диссертации

Работа выполнена по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий и соответствует паспорту специальности по следующим пунктам:

1. Фундаментальные исследования явлений переноса энергии, массы и импульса в химико-технологических процессах и аппаратах.

3. Способы, приемы, методология исследования гидродинамики движения жидкости, газов, перемещение сыпучих материалов в технологических аппаратах и схемах.

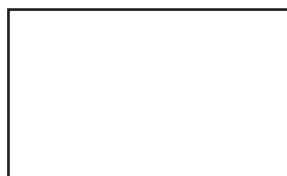
6. Способы, приемы, методология исследования механических процессов, совершенствование их аппаратурного оформления.

Диссертация представляет собой законченное научное исследование, выполненное самостоятельно, на высоком научном уровне. Полученные результаты имеют существенное значение для теории и практики процессов смешивания сыпучих материалов. В ней изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения по совершенствованию процессов и оборудования.

Работа соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденного постановлением

Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 года, а её автор Смирнов Павел Михайлович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.13. – Процессы и аппараты химических технологий.

Официальный оппонент,
доктор технических наук по специальности
05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы, доцент,
профессор кафедры механического оборудования
ФГБОУ ВО «Белгородский
государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова»



С.Ю. Лозовая

Адрес организации
Почтовый адрес 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46
www.bstu.ru, тел. +7 (4722) 54-20-87, E-mail: lozwa@mail.ru

Подпись Лозовой С.Ю. заверяю
Ученый секретарь ученого совета
д.т.н., доцент

«10» *марта* 2026



Т.А. Дуюн