

ОТЗЫВ

официального оппонента
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 темы исследования

Смешивание сыпучих материалов является широко распространенным механическим процессом в химической и в ряде смежных отраслей промышленности. Получение однородных по составу сыпучих смесей является непростой технической задачей, особенно при низкой концентрации ключевого компонента, а также в тех случаях, когда смешивание осложняется сопутствующим процессом сегрегации компонентов за счет различия физико-механических свойств смешиваемых частиц.

Высокое качество смеси достигается за счет правильного выбора метода смешивания, оборудования и учета параметров материалов. Использование аппаратов непрерывного действия позволяет существенно интенсифицировать процесс смешивания, увеличить производительность, снизить энерго- и материалоемкость, а применение многоступенчатых конструкций приводит к увеличению времени пребывания компонент в системе. Поэтому создание простых и эффективных конструкций смесителей и их исследование является актуальной научной и практической задачей.

Научная новизна работы

1. Разработана математическая модель процесса смешивания сыпучего материала в новом барабанно-винтовом ступенчатом аппарате, позволившая определить поле скоростей и концентраций частиц и получить зависимости коэффициента неоднородности смеси в произвольном его сечении.

2. По результатам экспериментальных исследований нового аппарата получены уравнения регрессии, связывающие коэффициент неоднородности смеси с его параметрами (числом ступеней, их длинами, шагом и высотой винтового желоба, концентрацией ключевого компонента).

3. Теоретически обоснована методика инженерного расчета конструктивных и режимных параметров нового смесителя в части определения критерия качества смеси.

Теоретическая значимость состоит в том, что разработанная математическая модель, позволяет прогнозировать состояние однородности смеси в различных сечениях барабанно-винтового смесителя и может быть использована при создании обоснованных методов расчета новых устройств.

Практическая ценность результата

1. Разработан и защищен патентом новый барабанно-винтовой ступенчатый смеситель, для приготовления однородных смесей с соотношением компонентов 1:1-1:11.

2. Разработан и защищен патентом эффективный способ экспериментального исследования процесса смешивания в устройстве непрерывного действия, с дополнительными рабочими элементами.

3. Разработан алгоритм численного расчета процесса смешивания в новом аппарате по предложенной математической модели. Метод инженерного расчета нового смесителя сыпучих материалов непрерывного действия может быть востребован проектными организациями для разработки оборудования непрерывного действия в различных отраслях промышленности.

4. Новая конструкции смесителя и программное обеспечение для его расчета рассмотрены на предмет использования в агрегате десульфуризации дымовых газов в АО «Кондор-Эко».

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

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на 15, в том числе на 7 международных, научных конференциях. По теме диссертации опубликовано 23 научные работы, из них 6 в журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ, получено 2 патента РФ.

Анализ содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав с описанием и обсуждением полученных научных результатов, основных выводов, списка использованных источников, содержащего 163 наименований работ отечественных и зарубежных авторов, четырех приложений, содержащих информацию о разработанном в процессе выполнения исследований программном обеспечении и об использовании результатов работы в промышленности. Работа изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков и таблицу.

Автореферат в полной мере отражает положения диссертационной работы, соответствует ее содержанию и задачам исследования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы, задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов работы, основные положения выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ известных конструкций смесителей сыпучих материалов гравитационно-пересыпного действия и способов приготовления сыпучих смесей, склонных к сегрегации, рассмотрены основные методы снижения сегрегации в этих устройствах. Автор отмечает, что возможности ступенчатой конструкции в полной мере, не используются для повышения эффективности аппаратов (например, при использовании метода разбавления для приготовления смесей с малыми добавками).

Проанализированы основные методы математического описания процесса смешивания сыпучих материалов. В качестве наиболее эффективных и обоснованных предлагаются методы механики сплошных сред, стохастические модели.

Во второй главе представлено описание экспериментальных исследований процесса смешивания сыпучих материалов в новом барабанно-винтовом смесителе. При разработке принципиальной схемы смесителя применялась трехступенчатая конструкция, которая позволяет реализовать переработку компонентов с использованием метода разбавления. Разработана и реализована экспериментальная установка смесителя, предложен способ исследования качества смеси по сечениям аппарата. Новизна разработок смесителя и способа исследования смеси подтверждены патентами на изобретения РФ.

Представлены результаты экспериментальных исследований, задачами которых являлись оценка эффективности применения барабанно-винтового ступенчатого смесителя для переработки смесей с малыми добавками, сопоставление его работы с работой одноступенчатого аппарата и установление влияний конструктивных параметров на однородность получаемых сыпучих смесей.

Результаты исследований представлены графически в виде зависимостей коэффициента неоднородности получаемой смеси от длин ступеней аппарата, шага винтового желоба, высоты борта рабочей камеры. Стоит отметить, что при исследовании влияние высоты желоба на качество смеси непонятно о какой ступени идет речь, т.к. величина борта зависит от диаметров ступеней. На мой взгляд корректней приводить зависимость коэффициента неоднородности смеси от загрузки аппарата, а высоту желоба использовать в качестве ограничения загрузки.

Автор по результатам экспериментальных исследований приходит к выводу о преимуществе ступенчатого барабанно-винтового аппарата по сравнению с одноступенчатым смесителем при переработке смесей с небольшой концентрацией ключевого компонента (0,125 и 0,083), склонных к сегрегации, как по крупности частиц, так и по их плотности.

Однако, в работе не дается обоснование выбора именно трехступенчатого смесителя. Возможно, применение двухступенчатого аппарата позволит получить сопоставимое качество продукта, при более простой конструкции смесителя.

В третьей главе диссертации представлено математическое моделирование процесса смешивания сыпучих материалов в разрабатываемом барабанно-винтовом смесителе. Изменение поля концентраций двухкомпонентной смеси определяется уравнениями непрерывности. При этом учитываются суммарные потоки сыпучих компонентов, включая потоки сегрегации, а также потоки загрузки через дозаторы и выгрузки смеси в бункер. Предполагается, что потоки сегрегации связаны с отличием смешиваемых компонентов по плотности или размерам частиц. Механизм сегрегации определяется тем, что сила тяжести, действующая на частицу и

сила Архимеда, возникающая в результате давления на неё со стороны окружающих частиц, перестают уравновешивать друг друга.

Расчет полей концентраций компонентов смеси выполнен методом конечных объемов с применением противопоточной разностной схемы первого порядка точности. Приведено сопоставление результатов расчетов по модели с данными эксперимента, показывающее их удовлетворительное согласование.

В четвертой главе представлены методика инженерного расчета барабанно-винтового ступенчатого смесителя и его блок-схема. Методика включает расчет технологических и энергетических параметров смесителя. При расчете производительности использованы условия сохранения потоков компонентов в ступенях смесительного устройства. Длины ступеней определяются расчетом коэффициента неоднородности смеси по модели процесса смешивания, на основе которой разработана программа расчета представленная в приложении.

Предложен вариант использования барабанно-винтового ступенчатого смесителя в агрегате, реализующем технологию десульфуризации дымовых газов. Эффективность агрегата определяется применением в нем ступенчатого смесителя сыпучих материалов. При этом достигаются наилучшие условия смешивания, и повышается поверхность контакта реагирующих компонентов. Разработанный смеситель предлагается к использованию в топливно-энергетической отрасли для очистки дымовых газов от угольной пыли, получена справка об использовании результатов диссертационной работы в АО «Кондор-Эко».

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В тексте диссертации явно не отражено ограничение предложенного способа определения коэффициента неоднородности смеси бесконтактным методом на основе обработки изображений слоя, связанное с применением отличающихся по цвету компонент. Это можно понять только по названию патента в списке литературы (№144). Можно ли применять или модифицировать предложенный метод распознавания изображений для одноцветных компонентов смеси?

2. При анализе изображения для определения коэффициента неоднородности проводится его корректировка «...с учетом случайных колебаний частиц ключевого компонента на поверхности наблюдения.» (стр.44). В чем она заключается?

3. Подача исходного материала в первую ступень смесителя (патрубок 6, рис. 2.2) подразумевает возможность изменение точки ввода по длине ступени. Реализован ли этот механизм для второй и третьей ступеней (патрубки 7 и 8)? На стр. 45 указано, что длина пути меняется за счет изменения места загрузки через патрубки 6, 7, 8.

4. Почему кривая 1 на рисунках 2.13 и 2.14 имеет разный вид, хотя построена для одноступенчатого аппарата при концентрации ключевого компонента 0,0833?

5. На стр.53 скорее всего имелось ввиду уменьшение, а не увеличение шага желоба, приводящее к росту однородности смеси.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение по диссертации

Диссертационная работа Смирнова Павла Михайловича соответствует паспорту специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий в пунктах: 1, 3, 6 («Фундаментальные исследования явлений переноса энергии, массы и импульса в химико-технологических процессах и аппаратах», «Способы, приемы, методология исследования ..., перемещение сыпучих материалов в технологических аппаратах и схемах», «Способы, приемы, методология исследования механических процессов, совершенствование их аппаратурного оформления»).

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения по повышению эффективности процессов смешения сыпучих компонентов и оборудования для их реализации, имеющие существенное значение для развития страны, и соответствует требованиям пунктов 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а автор работы – Смирнов Павел Михайлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий.

Официальный оппонент,
доктор технических наук по специальности
05.17.08 – Процессы и аппараты химических
технологий, доцент, заведующий кафедры
«Прикладная математика» ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»



Беляков Антон Николаевич

Адрес организации
Почтовый адрес 153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34
www.ispu.ru, тел.: +7(4932)269745, E-mail: ab_pm@mail.ru

Подпись А.Н. Белякова заверяю
Ученый секретарь Совета ИГЭУ,
к.э.н., доцент
«10» марта 2026 г.



Былгина Юлия Вадимовна

10 марта