

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Ректор Федерального  
государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Ярославский  
государственный технический  
университет»

Е.О. Степанова

«22» сентября 2021 г.



## **ОТЗЫВ**

**ведущей организации на диссертационную работу  
Фатахетдинова Артема Мяксутовича**

**«Совершенствование технологии процесса вибрационного смешивания  
при производстве сухих строительных смесей», представленную на  
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)**

### **1. Актуальность темы выполненной работы**

Процессы смешения сыпучих материалов, приводящие к получению товарных смесей и полуфабрикатов, широко распространены в строительной, химической, фармацевтической, пищевой и других отраслях промышленности. Во многих технологических процессах преимущество отдается смесителям принудительного принципа действия. Однако применение вибрационных смесителей периодического и непрерывного действия, поиск новых технических решений в области вибрационного смешивания остаются актуальными и привлекают к себе значительный интерес отечественных и зарубежных исследователей. Применительно к сыпучим материалам вибровзвешенный слой, организованный в вибрационных смесителях является таким состоянием дисперсной системы, в котором создаются благоприятные условия для осуществления самых различных гетерогенных процессов. Кроме того, в условиях вибровзвешенного слоя снижается тормозящее действие внешних диффузионных микро- и макрофакторов, что благоприятствует повышению, например, коэффициентов тепло- и массопереноса смеси во времени.

В связи с данными обстоятельствами представляется актуальным расчетно-экспериментальное исследование процессов непрерывного и периодического перемешивания сыпучих материалов на основе математических моделей процесса в вибрационных смесителях, учитывающих параметры колебаний рабочих органов смесителей.

Актуальность темы исследований подтверждается тем, что разработанные модели, программное обеспечение, решение на их основе конструкторских задач применились в компании «DASO» ООО «РИМ» (Ивановская область).

## **2. Новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В результате выполненных исследований диссертантом получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. На основе математического аппарата теории цепей Маркова разработана модель кинетики процессов смешения в аппаратах периодического и непрерывного принципов действия, позволяющие оценить влияние параметров колебаний смесителя на качество готовой продукции.

2. К новым результатам следует отнести подтверждение равенство скоростей сегрегации и коэффициентов макродиффузии процессов периодического смешения и фракционирования сыпучих сред, проводимых с одной и той же смесью при одинаковых параметрах вибрации установок. Данный результат позволил создать оригинальный расчетно-экспериментальный метод определения стохастических параметров модели смешивания из тестовых опытов по виброгрохочению сыпучих материалов.

3. Рассмотренная математическая модель позволяет рекомендовать режимные параметры вибрации смесителей с учетом свойств сыпучего материала, обеспечивающие наилучшее качество смешения сухих строительных смесей.

4. Разработанный метод описания миграции перемешиваемых компонентов по виброожиженному слою может применяться как при модернизации, так и при проектировании вибрационного смесительного оборудования.

## **3. Степень обоснованности и достоверность основных положений, выводов и заключений, содержащихся в диссертации**

Достоверность полученных в диссертации результатов обоснована корректным использованием методов математического и компьютерного моделирования, уравнений математической физики, аппарата теории цепей Маркова, использовании современных физико-механических методов анализа в испытательных лабораториях, в воспроизводимости экспериментальных данных в пределах заданной точности измерений. Научные результаты и соответствующие публикации автора, не противоречат общепринятым положениям теории смешения, что подтверждает обоснованность выводов, сделанных А.М. Фатахетдиновым.

Работа успешно прошла апробацию на международных, Всероссийских и региональных научно-технических конференциях. Основные результаты диссертации достаточно полно отражены в 10 печатных работах, включая пять статей, опубликованные в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, 2 из которых входит в издание, входящее в международную базу данных SCOPUS.

## **4. Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики**

Научная ценность диссертационного исследования состоит в синтезе модели кинетики процесса перемешивания, основанной на математическом

аппарате теории цепей Маркова и метода определения скоростей сегрегации и коэффициентов макродиффузии процесса периодического фракционирования сыпучих сред, позволяющих использовать найденные стохастические коэффициенты для расчета режимов вибрации смесителей периодического и непрерывного способа действия, обеспечивающих заданное качество продуктов смешения. Процессы периодического фракционирования и смешивания сыпучих сред, проводился с одной и той же смесью при одинаковых параметрах вибрации установок.

Значимость научных и практических результатов заключается в достижении повышенных показателей работы технологических систем, включающих процесс смешения, промышленных предприятий по переработке сыпучих материалов.

### **5. Структура и содержание работы**

Представленная на отзыв работа состоит из введения, четырех глав и заключения, включая список использованной литературы и приложений.

Во введении достаточно обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, представлены положения научная новизна, практическая значимость и сформулированы положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе произведена оценка общего уровня состояния техники и технологии перемешивания сыпучих материалов в смесителях, рабочие органы которых совершают колебания по траекториям разных форм. Уделено внимание тому факту, что смешение сыпучих материалов с конкретными свойствами должно проводиться при определенных режимах вибрации, которые обеспечивает максимальные показатели работы смесителя. Рассмотрены современные конструкции смесительного оборудования. Приведены некоторые модели процесса смешивания сыпучих материалов.

Отмечена необходимость повышения эффективности процесса смешивания, в результате чего поставлена цель и задачи исследований.

Во второй главе представлена математическая модель кинетики процесса смешения, основанная на теории цепей Маркова. По мнению автора в основу математической модели процесса смешивания сыпучих материалов в вибрационных смесителях периодического и непрерывного способов действия положен вероятностный подход и, в частности, теория цепей Маркова. Автор считает, что данный подход позволяет учитывать как многообразие свойств сыпучих материалов, так и многообразие режимов колебаний рабочих органов смесителей. Рассматривая одномерную модель периодического смешения сыпучих материалов, автор считает, что миксер представляет собой массив из ячеек идеального смешения одинаковой высоты. Состояние процесса фиксируется в дискретные моменты времени. В течение одного временного перехода разрешены переходы только в соседние друг с другом ячейки цепи. Распределение частиц ключевого компонента смеси по ячейкам представлены вектором-столбцом. Тогда два последовательных состояния системы связаны матричным равенством,

описывающим кинетику процесса смешивания. Матрица переходов зависит от текущего вектора состояния и строится по следующим правилам. Переходы из верхних ячеек цепи в нижние возможны только при условии наличия свободного объема в нижних ячейках, что делает модель нелинейной. Таким образом, на каждом переходе матрица переходов осуществляет перераспределение ключевого компонента смеси по ячейкам цепи. Предполагая, что диффузионный перенос подчинен закону Фика, вероятности диффузионных переходов рассчитываются с помощью размерного коэффициента макродиффузии и размерной скорости сегрегации ключевого компонента. Для оценки текущего состояния качества смеси автор использовал стандартное среднеквадратичное отклонение от идеального распределения компонентов смеси в ячейках цепи. Автор приводит результаты некоторых численных экспериментов с моделью периодического процесса, где показывает влияние стохастических параметров модели на кинетику процесса и качество получаемой смеси. Автор показывает, что смесь достигает наилучшего состояния перемешивания к определенному моменту времени. Если проводить процесс перемешивания бесконечно долго, то сегрегация окажет негативное воздействие на процесс, степень равномерности смеси будет низкой. Это доказывает существование оптимального значения времени перемешивания в реальном смесителе периодического действия.

Для описания процесса непрерывного смешения автор предлагает двухмерную модель, которая позволяет исследовать больше эффектов процесса и учитывать истинную картину явлений, происходящих при перемешивании сыпучих материалов в реальном промышленном аппарате. Автор считает, что процесс транспортирования материала вдоль смесителя может происходить при равных скоростях движения соответствующих слоев. Приводит алгоритм расчета процесса непрерывного смешения сыпучих сред. Для определения показателей работы вибрационного смесителя непрерывного принципа действия автор проводит экспериментальные исследования физико-механических характеристик компонентов процесса смешения. К исходным данным относятся диапазон параметров колебаний смесителя, который, по мнению автора, в первом приближении, может быть определен из расчетно-экспериментальных исследований процесса периодического смешивания той же сыпучей среды. Скорость транспортирования сыпучего материала по рабочей камере аппарата определялась из полученной экспериментально зависимости разгрузочной характеристики устройства от его производительности. Согласно габаритам камеры смешения рассчитана высота виброоживленного слоя.

Модель позволила рассчитать время пребывания материала в смесителе и степень неоднородности готовой смеси, выходящей из аппарата.

В третьей главе приведены результаты исследований, где экспериментальная часть работы выполнена на универсальной демонстрационной вибрационной установке, представляющая собой плоский

прозрачный экран, на которой можно проводить опыты, как по фракционированию частиц различной крупности, так и по их перемешиванию. Автор считает, что физическая природа миграции частиц по виброожигенному слою процессов фракционирования и перемешивания одинакова. В том и другом случае слой сыпучего материала подвергается вибровоздействию и приходит в виброожигенное состояние. Если взять одну и ту же сыпучую смесь, разместить ее на вибрирующем сите или вибрирующей поверхности, которые совершают колебания с одинаковыми амплитудами и частотами, слоем одной и той же высоты, то процессы миграции частиц по слою будут очень похожи, особенно на начальном этапе. Однако, как долго длится данный этап, автор не объясняет. Для определения стохастических параметров ячеечной модели перемешивания смесей (коэффициентов макродиффузии и скоростей сегрегации) диссертант использовал расчетно-экспериментальную методику идентификации кинетик тестовых и численных экспериментов по фракционированию сыпучих материалов. Оценка адекватности модели процесса смешивания сыпучих сред, проводилась при помощи определения среднего отклонения между модельными и экспериментальными значениями степени неоднородности частиц ключевого компонента в ячейках слоя сыпучего материала. Расхождение между расчетными и опытными данными процесса перемешивания данной смеси имеет приемлемые значения. Дальнейшие исследования проводились на универсальной установке для экспериментов по периодическому фракционированию и периодическому смешению реальных сыпучих сред. В качестве сыпучего материала, использовалась реальная цементно-песчаная смесь, которая является сухой строительной, часто применяемой строительными предприятиями. Определены режимы вибровоздействия смесителя на сыпучую смесь песка и цемента для промышленных условий, при которых степень неоднородности готового продукта процесса смешивания составила менее 5 %.

В четвертой главе приведены технические и технологические результаты диссертации. Используя расчетно-экспериментальные исследования определения технологических показателей процесса смешивания была рекомендована установка вибрационного смесителя на линии производства суперконцентратов ГКТУ- 4000 и ГКТУ-5000 предприятия «ДАСО» (город Родники, Ивановская область). Имеется акт внедрения предложения с ожидаемым экономическим эффектом.

В заключении автором изложены основные результаты диссертационной работы, а также рекомендации и перспективы их дальнейшего исследования.

В приложении представлены акт внедрения результатов исследования, программы для расчета показателей процессов периодического и непрерывного смешивания.

Автореферат и опубликованные работы диссертанта полностью отражают основное содержание диссертации

## **6. Рекомендации по дальнейшему использованию результатов и выводов диссертации**

Разработанная автором стратегия моделирования процессов периодического и непрерывного смешения и ее программно-алгоритмическое обеспечение может быть использована при расчете режимных параметров и как при модернизации работающих промышленных смесителей, так и при их проектировании. На основе разработанных моделей и тестовой диагностики, полученной на лабораторных стендах периодического грохочения натуральных сыпучих сред, предложены компьютерные методы расчета процессов смешения в вибрационных аппаратах периодического и непрерывного способов действия, позволяющие выявлять режимные и конструктивные направления совершенствования процесса.

### **Замечания по диссертации.**

1. Одной из важнейших задач при использовании теории цепей Маркова для моделирования процессов смешения является проблема определения величины дискретного шага по времени и пространству. В диссертации не показано как автор рассчитывал данные интервалы.
2. В диссертации нет описания методики определения рациональных параметров промышленного смешивания, обеспечивающих допустимое качество процесса.
3. В диссертации не показано влияние технологических и конструктивных параметров на стохастические коэффициенты модели.
4. В работе недостаточно полно представлена методика проведения промышленных экспериментальных исследований, обработка эксперимента и аппаратное обеспечение эксперимента.
5. При расчете экономического эффекта от внедрения результатов исследования не учитываются затраты на утилизацию старого смесительного оборудования.

Высказанные замечания и недостатки не снижают научной и практической значимости диссертационной работы и не ставят под сомнение достоверность и обоснованность полученных результатов.

### **Заключение**

Диссертационная работа Фатахетдинова Артема Мякутовича, выполненная на тему «Совершенствование технологии процесса вибрационного смешивания при производстве сухих строительных смесей» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена важная практическая задача повышения эффективности смешения сыпучих материалов путем определения режимов колебаний рабочих камер смесителей. Основные результаты работы диссертации обладают научной новизной и вносят существенный вклад в теорию и практику развития (или совершенствования) машин и процессов для смешивания сыпучих материалов.

Диссертационная работа соответствует п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства

Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 и паспорту специальности 05.02.13 по области исследования пп. 1. – «Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов; механизации производства в соответствии с современными требованиями внутреннего и внешнего рынка, технологии, качества, надежности, долговечности, промышленной и экологической безопасности», 3. – «Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций», 5. – «Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и процессов и оценки их экономической эффективности и ресурса». Автор диссертации Фатахетдинов Артем Мяскутович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство).

Отзыв заслушан и утвержден на заседании кафедры «Теоретическая и прикладная механика», протокол № 2 от «21» сентяб. 2021 г.

Заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ярославский государственный технический университет» доктор физ.-мат. наук, профессор

\_\_\_\_\_ / Капранова Анна Борисовна /  
«21» 09 2021 г.

«Подпись Капрановой А.Б. удостоверяю»

Начальник управления персонала  
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»

\_\_\_\_\_ / Андрейчева Мария Александровна /  
«21» 09 2021 г.

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

150999, Россия, г. Ярославль, Московский проспект, 88

Телефон/факс: +7 (4852) 44-21-99

Адрес электронной почты: [info@ystu.ru](mailto:info@ystu.ru)

