

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи



БОЙКО ИРИНА ГЕННАДЬЕВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ В СМЕСИТЕЛЯХ ВИБРАЦИОННОГО ТИПА**

Специальность: 05.20.01 - Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Соловьев Сергей Александрович

Оренбург-2016 г.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 Основные теоретические положения и технические решения для определения теплофизических свойств различного материала при интенсификации процессов	12
1.1 Способы определения теплофизических характеристик	12
1.2 Современные методы определения теплофизических характеристик.....	23
Выводы по главе.....	33
ГЛАВА 2 Теоретическое обоснование системы совместного контактного и бесконтактного температурного контроля при вибрационном смешивании	34
2.1 Физическое моделирование предлагаемого комплекса для диагностирования процесса смешивания сыпучих материалов.....	34
2.2 Математическое моделирование диагностирования процесса смешивания сыпучих материалов.....	40
Выводы по главе.....	54
ГЛАВА 3 Построение автоматизированной системы контроля температуры для конструкции смесителей периодического действия вибрационного типа	55
3.1 Бесконтактный и контактный контроль температурного нагрева подвижных смесительных элементов при традиционном смешивании и вибрационном воздействии на сыпучую среду.....	55
3.2 Основные режимные параметры используемого смесителя периодического действия вибрационного типа.....	59
3.3 Контрольно-измерительные приборы, используемые при проведении экспериментальных исследований.....	64

Выводы по главе.....	70
ГЛАВА 4 Результаты экспериментальных исследований температурного нагрева смесительных элементов	72
4.1 Применение совместного контактного и бесконтактного способа теплового контроля в конструкции смесителя вибрационного типа.....	72
4.2 Комплексное определение теплофизических характеристик сыпучего материала при динамических воздействиях.....	77
Выводы по главе.....	83
ГЛАВА 5 Перспективы применения смесительного оборудования вибрационного типа в условиях инновационного перерабатывающего производства.....	85
5.1 Техничко-экономические показатели на этапах внедрения системы контроля температуры в смесителях вибрационного типа...	85
5.2 Экономическая эффективность от внедрения системы контроля температуры на этапах конструирования и эксплуатации в комбикормовом производстве.....	90
Выводы по главе.....	99
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	101
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	103
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	118

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Интенсификация действующих производственных процессов путем выявления всех резервов, нахождения и устранения узких мест, повышения качества продукции, а также экономии материалов и энергии является важным источником производительности труда и эффективности сельского хозяйства. Это касается как отдельных установок, так и производственных комплексов и систем.

Выявление резервов производства, как правило, связано с углубленным анализом процесса и предполагает использование современных методов исследования и электронных систем обработки данных.

Многие проблемы недостаточно проработаны теоретически, так что экспериментальные исследования на лабораторных, опытных и промышленных установках играют особую роль. На создание экспериментальных установок и на проведение экспериментов здесь приходится тратить много времени и средств [38].

Повышение эффективности многих технологических процессов в различных средах с помощью динамических воздействий является наиболее перспективным направлением. Так, за основу проектирования конструкции смесителей вибрационного типа берутся различные схемы организации формирования однородности смеси, которые в первую очередь зависят и складываются от агрегатного состояния перемешиваемых материалов.

Однако существующие цифровые методы, устройства и системы на микропроцессорной базе, которые во многом позволяют одновременно провести быстрый и объективный контроль различных технологических параметров при вибрационных воздействиях, не всегда приемлемы как на стадиях проектирования, так и в условиях производственной реализации комбикормовой, пищевой и ряда других смежных отраслей перерабатывающей промышленности.

Поэтому проведение теоретических и экспериментальных исследова-

ний в области определения теплофизических характеристик сыпучего материала с возможностью управления температурным нагревом подвижных смесительных элементов как при контактном, так и при бесконтактном распознавании технического состояния по тепловым изображениям для сложного смесительного оборудования вибрационного типа в настоящее время является актуальной проблемой.

Степень разработанности темы. основополагающие методы определения динамики и математического моделирования при создании теории интенсификации процесса смешивания с практическим применением конструктивных решений представлены как российскими, так и зарубежными известными учеными, среди них: А.А. Александровский, Ф.Г. Ахмадиев, Н.И. Басов, И.И. Блехман, В.Н. Блиничев, Д.О. Бытев, Н.И. Быховский, Л.А. Вайсберг, В.Д. Варсоньев, И.Ф. Гончаревич, В.Н. Денисов, Г.Ю. Джанелидзе, И.Н. Дорохов, А.А. Дубровский, С.В. Евсеенков, А.И. Зайцев, В.Н. Иванец, Г.Е. Иванец, А.П. Иванова, В.В. Кафаров, Л.П. Карташов, Э.Э. Кольман – Иванов, В.А. Кузьмичев, Э.Э. Лавендел, А. М. Ластовцев, П.И. Леонтьев, В.А. Любартович, С.И. Любартович, Ю.И. Макаров, Л.В. Межуева, В.П. Мешалкин, В.Е. Мизонов, Н.В. Михайлов, Р.Ф. Нагаев, Е.А. Непомнящий, П.Ф. Овчинников, Г.Я. Пановко, В.Ф. Першин, Д.Н. Пирожков, П.А. Ребиндер, Ю.Т. Селиванов, С.А. Соловьев, Н.С. Сергеев, М.А. Талейсник, М.Ю. Таршис, Н.Б. Урьев, И.Я. Федоренко, К.В. Фролов, К. Бенке, Х. Накадзима, П. Леси, К. Пул, Н. Пфост, Н. Сатомо, Т. Танака, П. Тауск, К. Штанге, З. Штербачек, К. Эндо и другие.

Первостепенные подходы при развитии теории тепловых явлений и схемы технологического оборудования различного назначения в зависимости от специфики производства проанализированы в фундаментальных трудах известных российских ученых, в числе которых С.Е. Буравой, В.П. Вавилов, А.Б. Власов, В.С. Волькенштейн, А.С. Гинзбург, А.А. Гухман, Г.Н. Дульнев, Н.Н. Евтихийев, Н.П. Жуков, В.Н. Карпов, М.В.Кирпичев, Г.М. Кондратьев, Л.З. Криксунов, Н.Д. Кузнецов, В.В. Курепин, С.С. Кутаталадзе, А.В. Лыков,

Н.Ф. Майникова, Д.М. Маркович, М.А. Михеев, С.В. Мищенко, Л.А. Остроумов, Г.А. Падалко, Ю.М. Плаксин, Е.С. Платунов, В.П. Преображенский, С.П. Рудобашта, В.И. Сыроватка, В.Н. Чернышов, В.С. Чистяков, А.Ф. Чудновский, А.А. Чуриков, В.М. Фокин, Н.А. Ярышев и другие.

К числу зарубежных исследователей, которые внесли наибольший вклад в теплофизические измерения, необходимо отнести О. Кришера, Н. Эсдорна, Г. Карслоу, Д. Егера, Ли Тейлора, О. Крейта, У. Блека, М. Марича, Э.М. Сперроу, Р. Висканта, Ф. Линевега и многих других.

Таким образом, кроме традиционных аналитических методик для определения теплофизических характеристик сыпучих материалов, необходимо проводить исследования для динамических процессов с комплексным расчетом всех ТФХ в одном эксперименте и скоростной техникой тепловых измерений.

Цель работы: комплексное определение теплофизических характеристик сыпучих материалов в процессе вибрационного смешивания с внедрением одноконтурной схемы автоматизированного контактного температурного контроля подвижных смесительных элементов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы **основные задачи исследования:**

- обоснование системы контактного контроля температурного поля рабочих элементов для повышения функциональных возможностей рассматриваемой конструкции вибрационного смесителя периодического действия;
- построение теоретической модели температурного нагрева электромагнитных вибровозбудителей цилиндрической формы перфорированных лопаток с учетом тепловых изображений, полученных в процессе вибрационного смешивания;
- подтверждение результатов исследования лабораторными и производственными экспериментами с расчетом показателей экономической эффективности от использования предлагаемого специализированного стенда на основе конструкции смесителя периодического действия вибрационного

типа для приготовления премикса, БВМД в технологической линии комбикормовой промышленности и других смежных перерабатывающих отраслях.

Объект исследования: процесс вибрационного формирования однородности сыпучего материала в конструкции смесителя периодического действия вибрационного типа.

Предмет исследования: закономерности влияния теплофизических характеристик сыпучего материала на процесс вибрационного смешивания.

Научная новизна:

– разработана теоретическая модель комплексного определения теплофизических характеристик сыпучего материала (премикс, БВМД) для конструкции смесителя периодического действия вибрационного типа;

– установлен локальный температурный нагрев подвижных смесительных элементов в достоверных пределах управления, позволяющих зафиксировать тепловое поле в реальном времени;

– оптимизированы конструктивные параметры перфорированных лопаток для равномерного внедрения в сыпучую среду при нелинейном уравнении теплопроводности и изменении скорости температуры, отвечающей эксплуатационным режимам вибрационного смесителя и размерного соотношения.

Достоверность результатов работы подтверждается достаточной сходимостью теоретических результатов исследования процесса формирования смеси в конструкции смесителя периодического действия вибрационного типа с экспериментальными, полученными в лабораторных и производственных условиях, с применением современных методов и средств теплофизических измерений.

Практическое значение работы:

– разработана автоматизированная система контроля температуры для конструкции смесителей периодического действия вибрационного типа, позволяющая проводить исследования как при контактном подходе, так и при дистанционном диагностировании процесса вибрационного формирования

однородности смеси (премикс, БВМД);

– получены оптимальные теплофизические зависимости, характерные для технологической линии приготовления премикса и БВМД, учитывающие изменения значений режимных и геометрических параметров вибрационного смесителя при температурном нагреве;

– установлена наиболее эффективная схема управления процессом вибрационного смешивания при внедрении автоматизированной системы контроля температуры в конструкции смесителей периодического действия вибрационного типа.

Вклад автора в проведенное исследование. Построена теоретическая модель для системы температурного контроля при сдвиговом внедрении перфорированных лопаток с динамическим воздействием; определены зависимости теплофизических характеристик сыпучего материала от темпа нагрева; создана прикладная программа «Система вычисления теплофизических характеристик» с базовым интерфейсом для ПК, действующая в интерактивной форме с использованием полученных результатов в программе Owen Report Viewer, позволяющая просчитать теплофизические характеристики премикса из общего ряда заданных параметров, влияющих на вибро-реологические свойства конечной смеси; разработан специализированный стенд с полной аналитической обработкой экспериментальной информации для управления подвижными смесительными элементами и регистрации температурного поля с использованием термопреобразователей и тепловизора.

Апробация результатов работы

Основные теоретические положения и результаты исследований докладывались на научных семинарах и конференциях профессорско-преподавательского состава Оренбургского государственного аграрного университета (г. Оренбург, 2010 – 2015 гг.); Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава «Научное обеспечение инновационного развития АПК» (г. Санкт-Петербург,

2015 г., Санкт - Петербургский государственный аграрный университет); 14-й Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в животноводстве – инновационные технологии и модернизация в отрасли» (г. Москва, 2011 г., ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии); 15-й Международной научно-практической конференции «Система технологий и машин для животноводства на период до 2020 г. – технологические, организационно-экономические требования и методология разработки» (г. Москва, 2012 г., ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии); 16-й Международной научно-практической конференции «Совершенствование управления технологическими процессами в животноводстве – основа повышения эффективности производства и качества продукции» (г. Москва, 2013 г., ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии); 17-й Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии и технические средства производства продукции животноводства с интеллектуальными системами управления механизированными процессами» (г. Москва, 2014 г., ФГБНУ ВНИИМЖ ФАНО); 18-й Международной научно-практической конференции «Стратегия развития механизации и автоматизации животноводства на период до 2030 года» (г. Москва, 2015 г., ФГБНУ ВНИИМЖ ФАНО); 19-й Международной научно-практической конференции «Методология создания конкурентоспособных предприятий по производству продукции животноводства» (г. Москва, 2016 г., ФГБНУ ВНИИМЖ ФАНО).

Участие в конкурсе на право получения гранта губернатора Оренбургской области в сфере научной и научно-технической деятельности по одному из приоритетных направлений: «Технологии экологически безопасного ресурсосберегающего производства и переработки сельскохозяйственного сырья и продуктов питания» (г. Оренбург, 2016 г.).

По результатам исследований опубликовано 8 работ, из них 6 – в журналах, рекомендованных ВАК.

Подана заявка на свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Реализация результатов работы.

На основе проектируемого смесителя (ОАО «НМЗ – Новосергиевский механический завод», п.г.т. Новосергиевка, Оренбургская область) построена автоматизированная система контроля температуры с программно-алгоритмическим обеспечением, позволяющая отразить динамику нагрева подвижных смесительных элементов при вибрационном формировании однородности смеси. По техническому заданию в цехе приготовления премикса и БВМД птицефабрики ОАО «Спутник» (Оренбургская область, Соль-Илецкий район, п. Шахтный) произведен запланированный монтаж и всесторонняя совместная доработка режимов управления предлагаемой конструкции смесителя периодического действия вибрационного типа с общей экспериментальной отработкой на соответствие техническим условиям ГОСТ Р 51095 – 97 (премикс) и регистрацией температурного поля подвижных смесительных элементов в заданной программе Owen Report Viewer, согласованной с контрольно-измерительным прибором Овен УКТ38–Щ.4 (г. Москва).

Научные положения, выносимые на защиту:

- теоретическая модель системы контактного температурного контроля при сдвиговом внедрении перфорированных лопаток в действительном диапазоне динамических воздействий на сыпучую среду;
- специализированный стенд, способный производить полную аналитическую обработку полученной экспериментальной информации для управления режимами работы подвижных смесительных элементов и регистрировать температурное поле в заданной программе Owen Report Viewer с использованием термопреобразователей по ГОСТ 8.585 – 2001 для УКТ38–Щ.4 и тепловизора Testo 882 по ГОСТ Р 8.619 – 2006;
- результаты экспериментальных исследований в виде зависимостей теплофизических характеристик премикса в созданной прикладной программе с начальным интерфейсом для ПК, действующей в интерактивной форме с использованием результатов работы программы Owen Report Viewer.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения и постановки задач исследования, пяти глав с выводами, основных выводов с рекомендациями, списка использованной литературы и приложений. Работа изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка и 12 таблиц. Список литературы включает 150 источников, в том числе 7 на иностранном языке.

Приложения к диссертации представлены на 20 страницах.

Глава 1 Основные теоретические положения и технические решения для определения теплофизических свойств различного материала при интенсификации процессов

1.1 Способы определения теплофизических характеристик

Для приготовления однородных композиций из сыпучих материалов в комбикормовом производстве, а также в других смежных отраслях, используются различные конструкции смесителей. При этом возникают вопросы, связанные с поиском наиболее эффективного технологического оборудования, в том числе создание новых схем смесителей с применением расчетов, способов исследований и оценкой качества полученных смесей в соответствии с выбранными или вновь созданными образцами и т. д. С этой целью рассмотрим существующие методы измерения теплофизических характеристик материалов [143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150].

Исследования теплофизических свойств получили методы регулярного режима, разработанные Г.М. Кондратьевым, которые нашли отражение в работах С.Е. Буравого, Е.С. Платунова, В.В. Курепина в дальнейшем [58, 59].

При исследовании тепловых свойств в широкой области температур основополагающими являются квазистационарные методы (регулярные методы второго рода), то есть линейная теория, разработанная А.В. Лыковым.

В теоретических работах С.Е. Буравого, Е.С. Платунова, В.В. Курепина представлены методы измерения теплофизических свойств в условиях монотонного разогрева (охлаждения), которые часто являются динамическими методами, позволяющими определять теплофизические свойства образца как функции температуры, поэтому опираются на нелинейное уравнение теплопроводности, их физическую основу составляют методы регулярного режима второго рода [92 – 94].

Проанализированы первостепенные теоретические подходы, а именно начальная и регулярная стадии нестационарных тепловых процессов, где

обозначен наибольший вклад таких известных ученых, как Г.М. Кондратьев, А.Ф. Чудновский, А.В. Лыков, М. В. Кирпичев, С.С. Кутаталадзе, А.А. Гухман, В.П. Преображенский, и др., а также рассмотрены методы начальной стадии (нестационарные методы), методы регулярного режима первого рода (регулярные методы) и регулярного режима второго рода (квазистационарные методы) [94].

К числу зарубежных ученых, труды которых были использованы при исследовании теплофизических свойств различных материалов, относятся О. Кришер, Н. Эсдорн, Г. Карслоу, Д. Егер, Ли Тейлор, О. Крейт, У. Блек, М. Марич, Э.М. Сперроу, Р. Висканта и многие другие.

Согласно современным исследованиям Ю.М. Плаксина, В.В. Филатова в области определения теплофизических характеристик сыпучих материалов выстроена классификация по соответствующим признакам, с учетом фундаментальных работ А.С. Гинзбурга. В качестве классификационного признака общности теории и принципов измерений установлено четыре основные группы методов измерения теплофизических характеристик: балансные; на основе стационарного режима; на основе регулярного режима; при нестационарном режиме нагрева. В связи со спецификой тепловых измерений свойств различных материалов каждая из групп имеет ограниченное использование. На основе предложенного в работе построена классификация методов определения теплофизических характеристик [85, 90, 127].

Профессор Г. М. Кондратьев и его ученики предложили первый метод регулярного режима для измерения коэффициента температуропроводности различных материалов при помощи акалориметра, который представляет собой металлическую оболочку [58]. В металлическую оболочку на время проведения измерения помещают образцы порошковых материалов. Для определения коэффициента температуропроводности этим методом используют термостат, который позволяет поддерживать постоянную температуру, при условии, что коэффициент теплоотдачи $a \rightarrow \infty$.

Основными частями установки являются: термостат, акалориметр, дифференциальная термопара, секундомер.

В акалориметр засыпают исследуемый материал и заделывают в нем термопару, нагретую до определенной температуры. Далее материал погружают в термостат и отмечают изменение температуры во время установления регулярного режима. Эксперимент длится около 1 ч.

Методом двух точек – третьим методом регулярного режима – можно отыскать коэффициент температуропроводности материала.

Для этого метода применяются приборы, которые могут быть сферической, цилиндрической и пластинчатой формы. На рисунке 1.1 изображена схема прибора сферической формы. Основой метода при регулярном режиме является независимость температуры в двух любых точках образца материала от времени.

Опыт можно вести как в условиях естественной, так и в условиях вынужденной конвекции воздуха.

Коэффициент температуропроводности тела методом двух точек определяют по формуле

$$a = \Phi t, \quad (1.1)$$

где t – темп охлаждения, К/с; Φ – величина, учитывающая форму и размер тела.

Метод можно применять для нахождения коэффициента температуропроводности различных материалов при относительно низкой и высокой температуре.

При охлаждении (нагревании) тела в среде с постоянной температурой в случае, если коэффициент теплоотдачи будет достаточно большим по величине, то для стадии регулярного режима график охлаждения (нагревания) тела (в полулогарифмических координатах) получается в виде прямой. Показатель охлаждения (нагревания) t находится по этому графику и удовлетворяющий уравнению

$$\Delta T = Au \exp(-m\tau), \quad (1.2)$$

где ΔT – разность между температурой в какой-либо точке испытуемого тела и постоянной температурой окружающей среды, К; u – функция координат; A – постоянная, зависящая от начального распределения температуры.

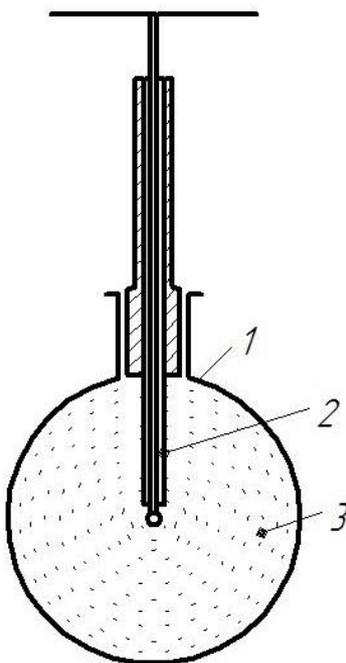


Рис. 1.1 – Схема прибора сферической формы для определения температуропроводности методом регулярного режима

Коэффициент температуропроводности исследуемого образца материала находится по формуле (1.1). Общая схема установки для определения коэффициента температуропроводности методом регулярного режима изображена на рисунке 1.1.

А. Ф. Чудновский отметил ряд методов, которые предполагают испытание материалов в специальных калориметрах [139]. Они рассчитаны на измерение либо только теплоемкости, либо теплоемкости и коэффициента теплопроводности одновременно, что является их существенным недостатком. Типичным для этой серии приборов является адиабатический калори-

метр, предложенный Н. Н. Синельниковым и В. Н. Филипповым. Он представляет собой два коаксиальных цилиндра с внешним и внутренним радиусами R_2 и R_1 , между которыми насыпается исследуемый порошок. Калориметр окружен концентрически расположенными нагревателями в форме никромовой ленты, что обеспечивает вокруг образца адиабатическую оболочку. Ввиду того, что расчет ведется для бесконечно длинного цилиндра, торцы снабжены дополнительными нагревателями. Внутренний нагреватель представляет собой молибденовую нить, проходящую по оси цилиндра, его питание подбирают так, чтобы мощность излучения нити во все время ее нагревания сохранялась постоянной ($q|_{r=R_1} = q_0 = const$). Внешний нагреватель, обладая малой тепловой инерцией, обеспечивает в течение опыта температуру оболочки, равную температуре поверхности образца, что равносильно условию $q|_{r=R_2} = 0$. Формула для коэффициента теплопроводности находится решением уравнения нестационарной теплопроводности для бесконечно длинного цилиндра при указанных двух условиях и квазистационарном режиме, предполагающем линейный ход температуры во времени.

Если в момент t_1 выключить внутренний нагреватель, образец вследствие наличия адиабатической оболочки будет продолжать нагреваться до установления равновесия, при котором примет температуру

$$T_0 = \Delta T_1(t_1, R_2) + \Delta T_2, \quad (1.3)$$

где $\Delta T_1(t_1, R_2)$ – температура внешней стенки цилиндра, ΔT_2 – прирост температуры этой стенки с момента t_1 до момента установления равновесного состояния.

За это время изменение теплосодержания цилиндра объемом $V = \pi(R_2^2 - R_1^2)l$ можно записать в форме:

$$\Delta T_2 c \rho V = 2\pi c \rho l \Delta T_1 \int_{R_1}^{R_2} r [T(t, r) - T(t_1, R_2)] dr. \quad (1.4)$$

Здесь l – высота образца, ρ – плотность образца.

Расчетная формула метода:

$$\lambda = \frac{q}{\Delta T_2} \cdot \frac{R_1}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_2^4 - R_1^4}{4} + \frac{R_1^2 R_2^2 \ln R_2}{R_1} \right). \quad (1.5)$$

Теплоемкость образца получается как частное от деления общего количества тепла q , подведенного к образцу, к общему приросту его температуры $\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2$:

$$C = \frac{q}{\Delta T}. \quad (1.6)$$

Недостатком этого метода является то, что такие измерения требуют создания вакуума в калориметре.

Использование метода регулярного режима предлагает Кулианини. Зернистый материал засыпается в пространство между двумя коаксиальными цилиндрами. Внутренний цилиндр заливается водой, которая нагревается электронагревателем. Внешний цилиндр теплоизолирован. Строя график, находят удельную теплоемкость. Но автор обходит вопрос о необходимости измерения тепловых потоков, без которых, как известно, не представляется возможным определение коэффициента теплопроводности [139].

Ряд методов, применяемых для оценки коэффициентов тепло- и теплопроводности зернистых материалов, основан на применении зондов.

Для сыпучих тел пригоден цилиндрический зонд Бутова [139]. Линейный нагреватель, внутри которого помещен зонд, питается постоянным током. Температура материала измеряется на расстоянии r от источника. Источник действует с момента включения тока t с.

Для сыпучих тел Е. Е. Вишнеvский [30] предлагает следующую модификацию своего импульсного метода, названного им способом двух струн. Учитывая, что принцип остается тем же, что и для твердых веществ, расчетные формулы остаются теми же. Схема прибора содержит кожух в виде стакана 1

с крышкой, изготовленного из теплоизоляционного материала (фарфор, кварц) (рис. 1.2).

Стакан имеет высоту 8,5 см и диаметр 6,6 см. Испытуемый материал 2, заполняющий центр стакана 1 и окруженный эталоном 5, термостатируется в течение 12 – 18 часов в сосуде Дюара. Включение источника тока 4 (0,2–0,5а) происходит в срок 10 – 15 с. Весь опыт продолжается 15 – 30 с. Термодатчики 5 и 6 располагаются внутри эталона и их показания отмечаются на приборе 7.

Оригинальной представляется методика, разработанная Л. А. Вулисом и др. [28] на основе принципа Мальгрема –Шулейкина [31] для определения коэффициента теплопроводности зернистых материалов.

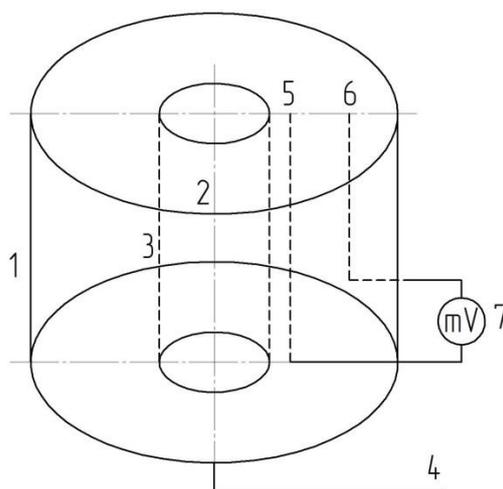


Рис. 1.2 – Схема термоизмерителя цилиндрической формы

По оси полого длинного цилиндра натянута нить-нагреватель, а внешняя поверхность поддерживается при постоянной температуре. Полость заполняется исследуемым материалом, включается источник тепла и с помощью дифференциальной термодатчики измеряется изменение разности температур в двух точках, расположенных на расстоянии Δr вдоль радиуса. Далее включается источник тепла, а ΔT продолжают регистрировать. Строя график $\Delta T = f(T)$, можно по площади этой кривой найти коэффициент теплопроводности. При-

бор, построенный на этой основе, состоит из тонкостенного металлического цилиндра (рис. 1.2) диаметром 80 см и высотой 25 см, в центре которого натянута нить – электронагреватель 1, закрытого с торцов изоляционными крышками 2 с отверстиями 3, через которые вводится спай термопар.

Методы двух температурно-временных интервалов предлагает Волькенштейн В.С. [28]. Все методы этой группы основаны на различных температурных полях, но связаны между собой единством техники измерения и общими расчетными формулами. Исследование сыпучих материалов этими методами нужно проводить таким образом, чтобы при большой толщине исследуемого слоя достаточно было ограничиться измерением только одного интервала времени, что является существенным недостатком этих методов.

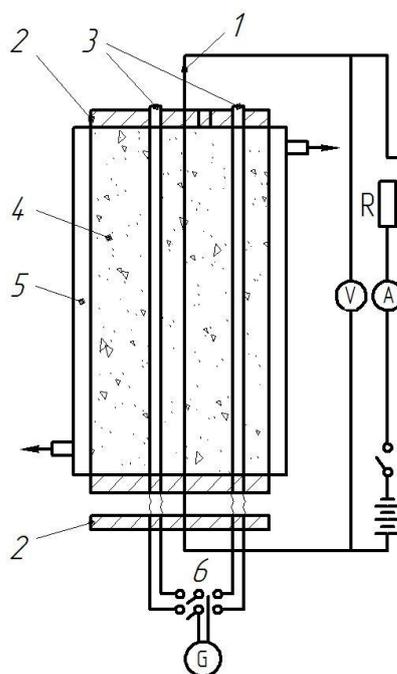


Рис. 1.3 – Схема установки Вулиса для определения коэффициента теплопроводности зернистых материалов.

Автор утверждает, что при определении характеристик порошков следует измерять и плотность материала. Найденные значения характеристик a и λ будут соответствовать определенной плотности ρ исследуемого материала.

Схема лабораторной установки для определения теплофизических характеристик сыпучих материалов показана на рисунке 1.4.

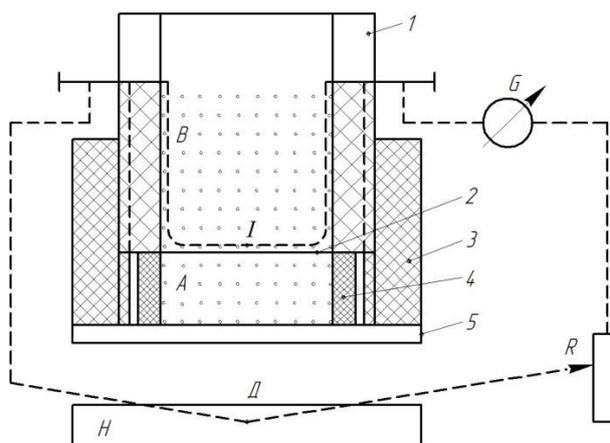


Рис. 1.4 – Схема лабораторной установки для определения теплофизических характеристик сыпучих материалов

На этом рисунке *H* – нагреватель, 1 – полый цилиндр, изготовленный из теплоизолирующего материала, 2 – тонкая стальная игла или туго натянутая струна, на которой закреплен спай *I* термопары. Игла жестко связана с основанием цилиндра. Кювета 3 с медным дном 5 навинчивается на цилиндр 1. С помощью мерного цилиндра 4 из теплоизолирующего материала задается толщина исследуемого материала.

А.В. Лыков предложил прибор для комплексного определения теплофизических характеристик при комнатных температурах (рис. 1.5) [70, 71].

Исследование сыпучих материалов проводится в цилиндрическом медном или латунном цилиндре, снабженном кожухом и съемными крышками 7, 8. Датчиками температуры являются две дифференциальные хромель-алюмелевые термопары диаметром 0,2 мм. Спаи каждой термопары зачеканивают заранее соответственно на плоскости нижнего блока и на внутренней поверхности цилиндра, используя для этой цели трубочку или иглу.

Порядок проведения эксперимента следующий. Через блоки, соединенные последовательно, пропускается вода постоянной температуры. Между пластинками, находящимися при комнатной температуре, помещают сво-

бодные спаи дифференциальной термопары, а концы ее подключаются к самописцу или гальванометру.

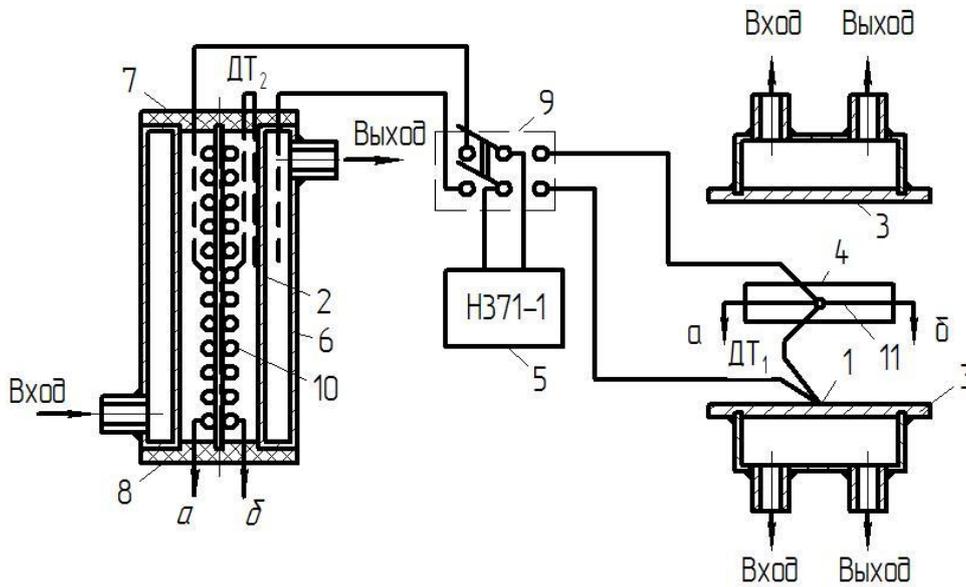


Рис. 1.5 – Принципиальная схема прибора для комплексного определения теплофизических характеристик материалов при комнатных температурах

После установления стабильной разности температур (о ее стабильности можно судить по показаниям регистрирующего прибора) образец вносится в пространство между блоками и сжимается их плоскостями. По кривой охлаждения (или нагревания) строится график

$$\ln \Delta T = \varphi(\tau), \quad (1.7)$$

где τ – время; ΔT – перепады температур в материале, из которого находится величина темпа охлаждения.

Коэффициент температуропроводности вычисляется по формуле

$$a = m_{\infty} \frac{4h^2}{\pi^2}, \quad (1.8)$$

где m_{∞} – темп регулярного режима; h – высота цилиндра.

Особенность описанной схемы определения коэффициента температуропроводности состоит в том, что испытуемый материал термостатируется при комнатной температуре. Промежуточная среда также имеет эту температуру, что очень важно при исследовании материалов с большой температуропроводностью. Надобность в герметизации образца отпадает.

При высоких температурах коэффициент температуропроводности в регулярном режиме определили с учетом краевых условий как первого, так и третьего рода [80].

В широком температурном диапазоне для нахождения зависимости $a = f(T)$ эксперимент повторяли многократно при разных температурах и малых температурных перепадах в образце.

После заполнения пространства между наружной поверхностью нагревателя и внутренней поверхностью цилиндра испытуемым материалом включают подвод воды и начинают охлаждение, результатом которого является выравнивание температуры по объему материала. Затем включают нагреватель и в процессе опыта записывают изменение во времени избыточной температуры.

Коэффициент теплопроводности рассчитывается по формуле, которая с учетом положения спаев дифференциальной термопары и значения величины удельного теплового потока может быть записана так:

$$\lambda = \frac{W}{2\pi h \Delta T_{cm}} \ln \frac{R_1}{R_2}, \quad (1.9)$$

где W – мощность нагревателя; R, h – определяющие размеры тела; ΔT_{cm} – разность температур в точках $x_1 - x_2 = R$.

Коэффициент температуропроводности рассчитывается по формуле

$$a = \frac{R^2}{\mu_1^2} m, \quad (1.10)$$

где μ_1 - первый характеристический корень уравнения:

$$J_1(\mu k)Y_0(\mu) - Y_1(\mu k)J_0(\mu) = 0, \quad (1.11)$$

где $k = \frac{R_1}{R_2}$, J_0, J_1 - функции Бесселя соответственно нулевого и

первого порядка первого рода; Y_0, Y_1 - функции Бесселя соответственно нулевого и первого порядка второго рода [69, 71].

1.2 Современные методы определения теплофизических характеристик

К современным методам определения теплофизических характеристик материалов относится комплексный метод профессоров Кемеровского государственного университета Л.А. Остроумова и И.А. Короткого, который основывается на первом буферном методе двух температурно-временных интервалов профессора В.С. Волькенштейн, относящийся к скоростным методам определения теплофизических характеристик сыпучих материалов, позволяющий в одном опыте определять теплопроводность a , теплопроводность λ , объемную теплоемкость C_v сыпучих материалов при температурах выше и ниже криоскопической точки [80].

Рассмотрим систему тел, состоящую из полуограниченного цилиндра B (теплоприемника) и пластины M (исследуемого материала) (рис. 1.6). Боковая поверхность системы имеет тепловую изоляцию, свободная поверхность – идеальный тепловой контакт с нагревателем.

В начальный момент времени свободная поверхность системы мгновенно нагревается до температуры t_n , t_0 – начальная температура системы.

Зависимость температуры t от времени τ в некоторой точке O , нахо-

дящейся в теплоприемнике B на расстоянии x от рабочей поверхности, определяется из дифференциального уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial t_i(x, \tau)}{\partial \tau} = a_i \cdot \frac{\partial^2 t_i(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (1.12)$$

где a_i – коэффициент температуропроводности, i – среда.

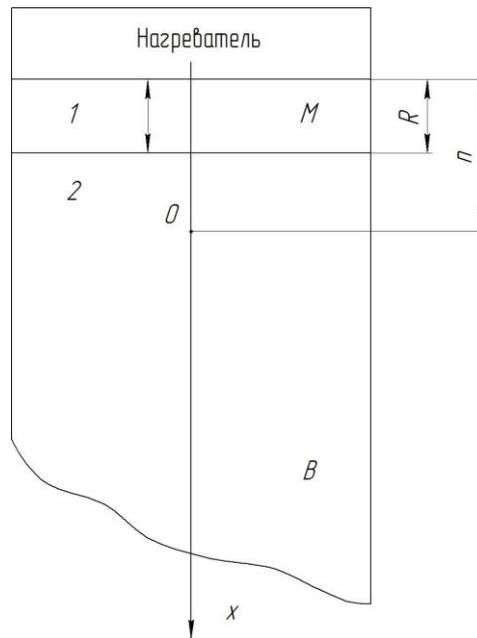


Рис. 1.6 – Принципиальная схема первого буферного метода двух температурно-временных интервалов

Для данной задачи сформулированы соответствующие начальные и граничные условия:

$$t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = 0; \quad (1.13)$$

$$t_1(0, \tau) = t_n = const; \quad (1.14)$$

$$t_2(\infty, \tau) = 0; \quad (1.15)$$

$$t_1(R, \tau) = t_2(R, \tau); \quad (1.16)$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial \tau_1(R, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial \tau_2(R, \tau)}{\partial x}, \quad (1.17)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности исследуемого материала и теплоприемника.

Решение уравнения (1.12), учитывая граничные условия (1.13) – (1.17) и интегральное преобразование Лапласа [28], выглядит следующим образом:

$$\frac{t_n - t}{t_n - t_0} = \left(1 + \frac{\lambda / (b\sqrt{a}) - 1}{\lambda / (b\sqrt{a}) + 1} \right) \times \\ \times \sum_{k=0}^m \left[\left(-\frac{\lambda / (b\sqrt{a}) - 1}{\lambda / (b\sqrt{a}) + 1} \right)^k \operatorname{erfc} \left(\frac{h}{2\sqrt{a\tau}} \left(\frac{h_B}{h} \sqrt{\frac{a}{a_B}} + 1 + 2k \right) \right) \right], \quad (1.18)$$

где t – температура точки О буферного слоя; λ – теплопроводность исследуемого материала; a – температуропроводность исследуемого материала; h – толщина исследуемого материала; h_B – толщина буферного слоя; a_B – температуропроводность теплоприемника; $b = \lambda_B / \sqrt{a_B}$ – постоянная теплоприемника; B – теплопроводность теплоприемника; m – число первых элементов ряда (обычно для получения результатов приемлемой точности бывает достаточно $m = 3 - 5$).

Теплофизические характеристики сыпучих материалов первым буферным методом двух температурно-временных интервалов определяются следующим образом.

Исследуемый образец 7 (рис. 1.7) размещается между теплоприемником 10 и нагревателем 4 лабораторной установки. Теплоприемник изготовлен из оргстекла, боковая поверхность его теплоизолирована пенопластом ПС-4, толщина теплоизоляции 30 мм. Нагреватель состоит из медного ТЭНа и термостатирующего устройства, позволяющего поддерживать постоянную температуру с точностью $\pm 0,1$ °С. Рабочая поверхность нагревается, равномерно

прогрета, кроме того, нагреватель обладает малой тепловой инерционностью – повышение температуры на 10°C от исходного уровня происходит за 8 – 10 с. Диаметр нагревателя соответствует диаметру теплоприемника.

В ходе теплотехнического эксперимента измерение температур производится хромель-копелевыми термоэлектрическими преобразователями (термопарами) 5, одна размещена на рабочей поверхности нагревателя, другая – в теплоприемнике, точке О (рис. 1.6). Толщиной буферного слоя названо расстояние между рабочей поверхностью теплоприемника и термопарой. Толщина должна быть намного меньше высоты теплоприемника H ($H \gg h_B$, в данной установке $h_B = 5$ мм, $H = 200$ мм).

Измерение температур производится до тех пор, пока температура свободного торца теплоприемника остается неизменной. Показания термопар фиксируются измерительным стендом 6, ядром которого является плата расширения ЭДС термопар, устанавливаемая в разъем ISA IBM совместимого компьютера [86].

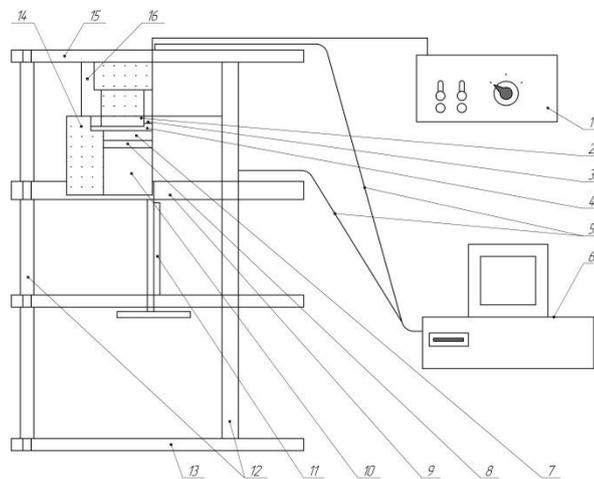


Рис. 1.7 – Схема лабораторного стенда для определения теплофизических характеристик первым буферным методом двух температурно-временных интервалов

В результате теплотехнического эксперимента получены термограммы

(рис. 1.8) – температурные зависимости от времени для нагревателя (линия 1) t_n , для разности температур между буферным слоем и рабочей поверхностью нагревателя (линия 2) $(t_n - t)$, для свободной поверхности теплоприемника (линия 3) [86].

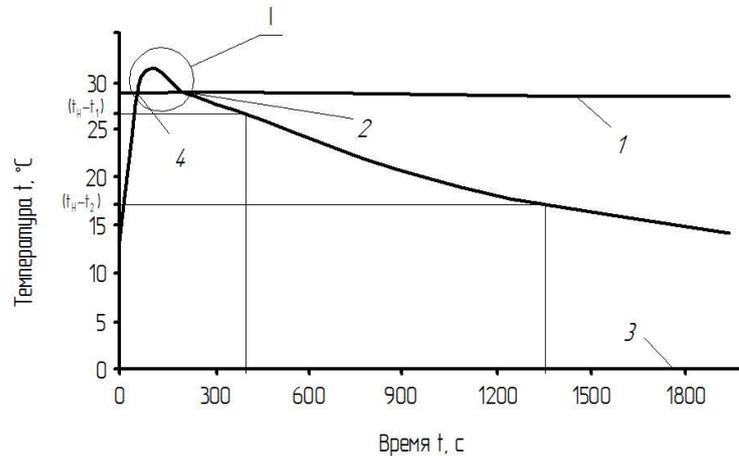


Рис. 1.8 – Результаты теплотехнического эксперимента (термограммы)

Таким образом, экспериментально установив зависимости изменения температуры от времени, можно решить уравнение (1.17), определив неизвестные переменные λ , a . Однако предварительно необходимо найти величины a_B , b . Для этого требуется получить термограммы какого-либо вещества с известными теплофизическими характеристиками. Затем, произвольно выбрав два момента времени τ_1 и τ_2 на кривой 2 (см. рис. 1.8), найти значения $(t_n - t_1)$ и $(t_n - t_2)$ и подставить их в уравнение (1.17). Полученная система из двух уравнений легко решается численными методами. Определенные величины a_B , b являются собственными неизменными характеристиками теплоприемника. Определение теплопроводности λ и температуропроводности a исследуемых материалов производится аналогично, только в этом случае постоянные теплоприемника a_B , b являются известными величинами. Объемная теплоемкость исследуемого материала находится по формуле

$$c_v = \frac{\lambda}{a}. \quad (1.19)$$

Линия 4 построена аналитически по формуле (1.18) и по определенным значениям λ и a . В зоне регулярного режима теоретическая кривая практически совпадает с кривой, полученной экспериментально.

По мнению авторов, данный метод имеет следующие преимущества:

- первый буферный метод двух температурно-временных интервалов позволяет определять теплофизические характеристики с очень высокой степенью точности;

- этот метод является комплексным и скоростным, дает высокую воспроизводимость полученных результатов;

- погрешность при определении коэффициента теплопроводности составляет 4–6 %, коэффициента температуропроводности – 6 – 7 %;

- лабораторная установка компактна и изготовлена из доступных материалов, а предлагаемая методика позволяет максимально автоматизировать процесс определения теплофизических характеристик.

Предложенная методика имеет ряд недостатков.

Первым недостатком является то, что моменты времени τ_1 и τ_2 должны быть достаточно удалены друг от друга.

Вторым недостатком является необходимость обеспечить хороший тепловой контакт между поверхностями нагревателя и исследуемым материалом, между исследуемым материалом и теплоприемником для получения достоверных результатов.

И последним недостатком можно назвать появление «температурной петли» (зона I, рис. 1.8), которая возникает при кратковременном повышении заданной температуры рабочей поверхности, в результате разогрева нагревателя, поэтому нужно следить за тем, чтобы тепловое возмущение от нагревателя не достигало буферной зоны.

В.В. Филатовым создана экспериментальная установка для экспе-

риментального исследования теплофизических свойств зернового сырья (рис. 1.9) [127].

Основной элемент установки представляет собой кожухотрубный вертикальный одноходовой теплообменник типа «труба в трубе», состоящий из двух коаксиальных цилиндров: внутреннего 1 и внешнего 2. В качестве датчиков температуры используется батарея дифференциальных хромель-алюмелевых ТХА термопар 8 градуировки ХА94, с диапазоном измерения температур от -50°C до $+1000^{\circ}\text{C}$, ГОСТ 6616 – 94. Перед каждой серией опытов термопары градуируются путем термостатирования в диапазоне температур $0 - 150^{\circ}\text{C}$. Погрешность измерения температуры в диапазоне $0 - 100^{\circ}\text{C}$ не превышает $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, ГОСТ Р8.585 – 2001.

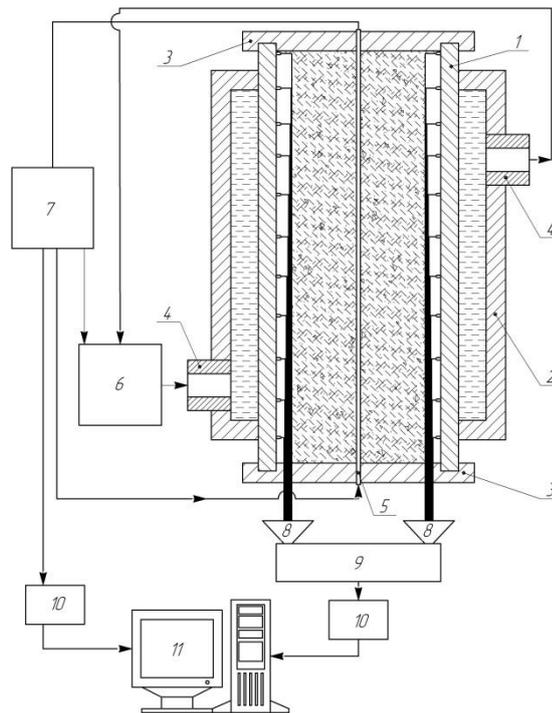


Рис. 1.9 – Схема экспериментальной установки для комплексного исследования теплофизических характеристик зернового сырья: 1 – внутренний цилиндр; 2 – внешний цилиндр; 3 – съемные торцевые заглушки; 4 – патрубки; 5 – малоинерционный нагреватель; 6 – термостат; 7 – ИРТ-5900; 8 – батарея диффе-

ренциальных хромель-алюмелевых ТХА-термопар; 9 – ИТ-2; 10 – RS232; 11 – ПК [127].

Внутренний цилиндр 1 закрывается съемными торцевыми заглушками 3, через которые осуществляется ввод батареи дифференциальных хромель-алюмелевых ТХА термопар 8, а также центрирование малоинерционного нагревателя 5, расположенного по оси цилиндров 1 и 2. Корольки батареи дифференциальных хромель-алюмелевых ТХА термопар 8 равномерно закреплены по всей внутренней поверхности цилиндра 1, что позволяет фиксировать распределение теплового поля как в осевом, так и в радиальном направлении. Размеры внутреннего цилиндра 1 удовлетворяются соотношению $\frac{h}{d} \gg 3$, где высота цилиндра $h=200$ мм, диаметр цилиндра $d=20$ мм. Патрубки 4 внешнего цилиндра 2 подсоединены к термостату 6. В межтрубном пространстве между внутренним 1 и внешним 2 цилиндрами циркулирует теплоноситель – проточная вода, обеспечивая охлаждение внутреннего цилиндра 1, в который засыпается исследуемый сыпучий зернистый материал. Измеритель температуры многоканальный ИТ-2 9 предназначен для автоматического измерения и регистрации температуры ($^{\circ}\text{C}$) по 96 каналам при помощи подключаемых к прибору батареи дифференциальных хромель-алюмелевых ТХА (ХА94) термопар 8 с последующей передачей данных через интерфейс RS232 10 на персональный компьютер (ПК) 11. Результаты измерения (в мВ или $^{\circ}\text{C}$) записываются в файл и выводятся на монитор ПК в виде таблицы или графической зависимости. Измеритель-регулятор технологический ИРТ-5900 7 предназначен для измерения и регулирования температуры малоинерционного нагревателя 5, значение которой преобразуется в унифицированный сигнал в диапазоне 0–5 мА или 4–20 мА. ИРТ–5900 комплектуется платой токового выхода (ПВИ), а также является микропро-

цессорным, полностью программируемым прибором с символьно – цифровой индикацией и встроенным интерфейсом RS232/RS485. Имеется возможность перенастройки на другие типы входных сигналов как с компьютера, так и с управляющей клавиатуры на лицевой панели. Прибор ИРТ 5900 конструктивно выполнен в соответствии с Евростандартом DIN43700 [127] .

Методика проведения исследования теплофизических характеристик зернового сырья осуществляется следующим образом. Сняв верхнюю торцевую заглушку, засыпают в полость между наружной поверхностью нагревателя и внутренней поверхностью цилиндра сыпучий зернистый материал. Охлаждая внешнюю поверхность цилиндра проточной водой, добиваются выравнивания температуры по объему исследуемого материала. После этого включается источник постоянной мощности – нагреватель. Изменение разности температуры регистрируется батареей дифференциальных хромель-алюмелевых ТХА (ХА94) термопар с последующей передачей данных через интерфейс RS232 (10) на персональный компьютер (ПК). Стационарный режим наступает при $F_0 > 1$ [127].

Зная температуру в любой момент времени в стационарном состоянии, строится графическая зависимость. В графическом представлении эта зависимость – прямая линия, тангенс угла которой определяется коэффициентом температуропроводности.

Используя в качестве классификационного признака общность теории и принципы измерений, можно выделить 4 основные группы методов измерений теплофизических характеристик: балансные; на основе стационарного режима; на основе регулярного режима; при нестационарном режиме нагрева. Каждая из этих групп имеет ограниченное применение в силу специфических тепловых измерений свойств различных по своей природе материалов.

Подробная классификация стационарного и нестационарного режимов

представлена на рисунке 1.10.

Таким образом, исходя из подробного теоретического и конструктивного анализа литературных источников, была построена классификация известных методов (способов) определения теплофизических характеристик, позволяющих определить метод регулярного режима второго рода, с учетом фундаментальных работ профессора А.В. Лыкова, профессора А.Ф. Чудновского, который наблюдается в рассматриваемом специализированном комплексе [70, 71,139].

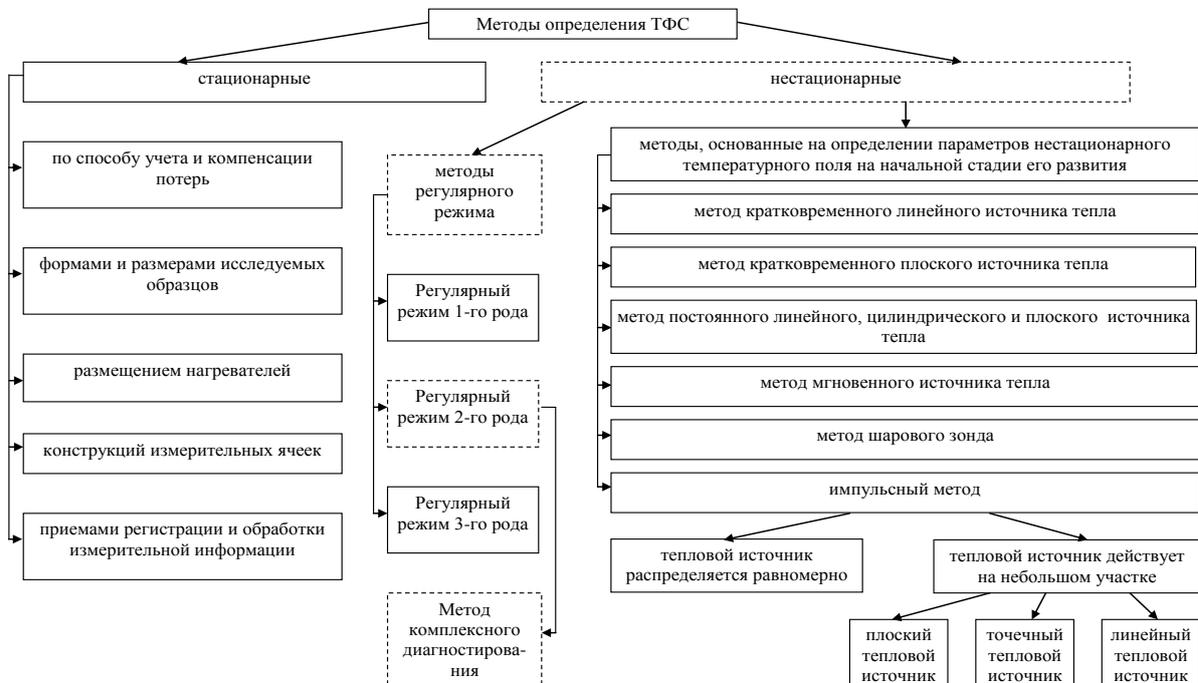


Рис. 1.10 – Классификация методов определения теплофизических свойств по общности теории и принципам измерений

Выводы по главе

Современные исследования для повышения эффективности смешивания и известные методы диагностирования тепловых процессов позволяют определить наиболее значимое направление – механика сыпучих сред при динамических воздействиях, исходя из следующих подходов.

1. В комбикормовой, пищевой, а также в перерабатывающей промышленности возникла необходимость в создании экспресс-методов для измерения тепловых свойств сыпучих материалов. Так, из стационарных методов наиболее практичными являются метод шара и цилиндра, из квазистационарных методов – шаровой способ с линейным ходом изменения температуры в среде, окружающей рассматриваемый материал, но каждая из классификационных групп имеет ограниченную направленность в силу специфики применения.

2. При этом известные методы измерения теплофизических свойств в условиях монотонного разогрева (охлаждения) в процессе вибрационного смешивания являются динамическими методами, позволяющими определять теплофизические свойства образца как функции температуры и опираются на нелинейное уравнение теплопроводности, физическую основу которых составляют линейные методы регулярного режима второго рода.

3. Представить анализируемую систему организации направленного движения сыпучего материала следует с использованием контактного и бесконтактного подхода (метод комплексного диагностирования) для обоснования теплопереноса в рабочей емкости смесителя вибрационного типа с варьированием режимных и конструктивных параметров подвижных смесительных элементов – перфорированной лопатки при определении теплофизических характеристик среды в допустимых частотных диапазонах, позволяющих подобрать требуемые технические характеристики смесительного оборудования для обеспечения заданного качества конечной смеси.

ГЛАВА 2 Теоретическое обоснование системы совместного контактного и бесконтактного температурного контроля при вибрационном смешивании

2.1 Физическое моделирование предлагаемого комплекса для диагностирования процесса смешивания сыпучих материалов

В процессах измельчения, приготовления смесей, уплотнения, разделения сыпучих материалов по крупности и удельному весу, гранулирования, очистки и т.д. широко используются технологические вибрационные машины. Это связано со следующим, а именно, в результате силового воздействия рабочего органа в обрабатываемой вибросмесителем среде возникают два вида движения: общее, представляющее собой смещение среды как некоторого тела, и относительное движение бесконечно малых элементов среды – «физических» материальных точек, которое приводит к равновесному разрушению надмолекулярных связей структуры среды, изменению ее реологических характеристик – виброрелаксации, виброползучести, сегрегации, адгезии, вязкости, модуля сдвига и т.п. [27]. Виброрелаксация и виброползучесть являются следствием саморазогрева, так как ползучесть и релаксация протекают значительно активнее при повышенных температурах [25, 29].

Исследования по смешению различных сыпучих материалов направлены прежде всего на установление кинетических зависимостей этого процесса, характеризующих изменение показателей однородности смеси во времени, влияние нагрева рабочих органов на сыпучую смесь не учитывается [73].

В современном перерабатывающем производстве, как зарубежном, так и отечественном в зависимости от конструктивных особенностей рабочих органов смесителей вибрационного типа технологический процесс осуществляется по следующим принципам: разбивание ударом при воздействии на частицу корма быстровращающихся рабочих органов; скалывание при воздействии на частицу двух поверхностей, движущихся с различными

скоростями; истирание при воздействии на частицу двух поверхностей, одна из которых подвижна, а другая неподвижна.

Машины, действие которых основано на использовании двух и более принципов, являются универсальными.

Для проведения физического моделирования конструкция смесителя выбрана по следующим:

– достижение поставленной цели требовало исследования реального технологического процесса, тогда как лабораторная установка только моделирует реальный процесс, и адекватность модели для проверки;

– расположение конструктивных элементов рабочих органов – перфорированных лопаток выбранного смесителя лучше всего отражает изменение теплофизических характеристик.

Вызвано это тем, что за счет интенсивного воздействия контактной (защитной) поверхности бронированного электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы в разделенном слое сыпучего материала имеется температурный нагрев, наиболее высокий по сравнению с неразделенным слоем [98].

Таким образом, внутри разделенного слоя теплофизические характеристики совершают относительно определенные траектории, что зафиксировано тепловизором Testo 882 [113].

Эти случайные «хаотические» траектории вызваны воздействием различных приложенных сил. Источниками этих сил являются перфорированные лопатки, воздушный поток и другие конструктивные составляющие смесителя. Перед лабораторными экспериментами смеситель вибрационного типа прошел необходимую проверку на соответствие требованиям технических условий эксплуатации [98].

Зерновые корма по содержанию влаги делятся на сухие (до 14%), средней сухости (14 – 15,5%), влажные (15,5 – 17%) и сырые (свыше 17%). Сухие и средней сухости зерновые корма могут храниться длительное время и сравнительно легко смешиваются [111].

Таким образом, физико-механические свойства премикса значительно влияют на показатели рабочего процесса вибрационного смешивания: энергоёмкость и производительность. Эти показатели существенно меняются в зависимости от культуры, сорта, партии и района произрастания. Поэтому исследования технологического процесса вибрационного смешивания необходимо проводить в одинаковых условиях на премиксе определенной партии.

Как известно, интенсивность переноса энергии теплового излучения в слое сыпучего материала, скорость нагрева и реологические свойства определяются его теплофизическими характеристиками. Для определения кинетики интенсивного нагрева при вибрационном воздействии необходимо знать изменение таких теплофизических характеристик, как: температуропроводности – (a) , теплопроводности – (λ) и удельной теплоемкости – (c) в зависимости от температуры и влажности материала [100].

Знание тепловых свойств необходимо также и для рационального и эффективного использования материалов при проектировании машин и аппаратов, а также при разработке различных технологических процессов.

В литературе имеются сведения о ряде методов для исследования теплофизических характеристик [28]. Эти методы можно классифицировать по ряду признаков:

- общности теории;
- сходству режимов работы;
- количеству получаемой из одного опыта экспериментальной информации;
- температурному интервалу испытаний;
- характеру исследуемых материалов;
- принципам измерений температуры и количества тепла т.д.

Используя в качестве классификационного признака общность теории и принципов измерений, можно выделить 4 основные группы методов измерений теплофизических характеристик:

балансные;
на основе стационарного режима;
на основе регулярного режима;
при нестационарном режиме нагрева.

Каждая из этих групп имеет, как правило, ограниченное применение в силу специфических тепловых измерений свойств различных по своей природе материалов.

В основу физического моделирования предлагаемого метода диагностирования процесса смешивания была положена работа В.В. Филатова [114], в которой автором предложена экспериментальная установка для комплексного исследования теплофизических характеристик свойств зернистых материалов в стационарном режиме. В результате определены такие теплофизические характеристики, как: температуропроводность – (a) , теплопроводность – (λ) и удельная теплоемкость – (c) в зависимости от температуры и влажности материала в стационарном режиме [124, 125, 126, 127, 128, 129, 130].

В предлагаемом методе диагностирования процесса смешивания сыпучих материалов для определения теплофизических характеристик, с целью нахождения интенсивности нагрева материала, применяется комплексный метод стационарного и нестационарного режимов [9, 13].

Одновременное действие тепловых источников и вибрационного воздействия приводит тело в стационарное состояние, в режиме которого обычно определяется коэффициент теплопроводности. Во всех случаях стационарному состоянию предшествует нестационарный режим, который может быть использован для определения второй теплофизической характеристики – коэффициента температуропроводности. Создается, таким образом, возможность осуществить комплексное определение теплофизических свойств в течение одного непрерывно протекающего эксперимента [10, 127]. Между тем рассматриваемая возможность используется недостаточно широко.

В рабочей зоне смесителя при вибрационных воздействиях в процессе

перемешивания сыпучего материала возникает температурное поле, которое оказывает влияние на интенсивность нагрева смеси, что ведет в свою очередь к изменению ее реологических свойств, и, как следствие, оказывает влияние на качество рассматриваемого материала (премикса, БВМД). Поэтому изучался температурный нагрев смеси от рабочих органов – перфорированных лопаток с дальнейшей обработкой результатов исследований в лабораторных и производственных условиях с помощью тепловизора (testo 882), устройства для измерения и контроля температуры УКТ38-Щ4, преобразователя интерфейса АС4, АС2 и ПК, технический результат достигался путем контактного и дистанционного диагностирования процесса смешивания [11, 12, 14, 15, 29].

Для того чтобы представить действительную картину предложенного метода, был использован цифровой фотоаппарат SAMSUNG. Это позволило зафиксировать все этапы диагностирования процесса смешивания сыпучего материала (премикса, БВМД) в смесителе периодического действия вибрационного типа [98].



Рис. 2.1 Схема расстановки приборов

В настоящее время исследователи, занимающиеся изучением состояния процесса вибрационного смешивания, используют диффузионную модель, которая учитывает коэффициенты продольного D_L и радиального D_R смешивания сыпучего материала в конструкциях смесителей, зависящие от многих факторов, в первую очередь от свойств перемешиваемых компонентов и характеристик смесителя, могут быть определены только экспериментальным путем на изготовленном образце [73].

Таким образом, с учетом практического анализа, предлагаемого способа контактного и бесконтактного температурного контроля процесса вибрационного формирования однородности смешивания, представленного его реальной физической моделью (рис. 2.1), установлено, что при наложении вибрационных воздействий в определенных частотах среда из исходных частиц сыпучего материала приобретает эффект диффузии, то есть происходит взаимное проникновение перемешиваемых компонентов из слоя в слой. Одновременно прослеживается продольное и поперечное перемешивание, которое может быть представлено моделью, описываемой нелинейным уравнением:

$$\frac{\partial \Theta(R, \varphi, t)}{\partial t} = a \left[D_L \frac{\partial^2 \Theta(R, \varphi, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta(R, \varphi, t)}{\partial R} + \frac{D_R}{R^2} \frac{\partial^2 \Theta(R, \varphi, t)}{\partial \varphi^2} \right], \quad (2.1)$$

где D_L – коэффициент продольного перемешивания;

D_R – коэффициент поперечного перемешивания;

R – радиус поперечного сечения аппарата;

c – концентрация;

t – время;

x – координата;

W – линейная скорость потока.

Учитывая полученные результаты исследования, которые нашли достаточно полное подтверждение при физическом моделировании, есть основание принять их за достоверные и положить в основу теоретического моделирования предлагаемого способа контактного и бесконтактного контроля процесса вибрационного смешивания.

2.2 Математическое моделирование диагностирования процесса смешивания сыпучих материалов

Для эффективного анализа механизма диагностирования процесса вибрационного смешивания сыпучих материалов необходимо выявить взаимосвязи между факторами, определяющими ход процесса, который был основан на физическом моделировании, и представить их в количественной форме – в виде математической модели [2, 3, 23, 24, 26, 57, 67, 87, 134, 135].

В таком сложном материале как премикс или БВМД теплопередача уже не ограничивается одной теплопроводностью, а складывается из трех одновременно действующих процессов – теплопроводности, излучения и конвекции. Учитывая наличие многофазности в сыпучем объекте (премикс, БВМД), легко понять, что теплообмен в нем осуществляется посредством [125]:

- а) теплопроводности вдоль отдельной частицы – элемента твердого скелета материала;
- б) передачи тепла благодаря теплопроводности от одной твердой частицы к соседней в местах их непосредственного контакта (кондуктивной теплопроводности);
- в) молекулярной теплопроводности в среде, заполняющей промежутки между частицами;
- г) теплопередачи на границах твердых частиц со средой;

- д) излучения от частицы к частице;
- е) конвекции газа и влаги, содержащихся между частицами.

Для понимания процесса теплопередачи рассмотрим понятие «теплофизические характеристики». Смысл этого термина заключается в комплексе параметров, характеризующих одновременно реакцию материала на процессы тепло- и массообмена [125]. К ним относят термические характеристики:

- коэффициент теплопроводности λ ,
- коэффициент температуропроводности a ,
- объемную теплоемкость C ,
- теплоусвояемость $b = \sqrt{\lambda C}$

и массообменные характеристики:

- коэффициент влагопроводности K ,
- коэффициент термовлагопроводности δ_T ,
- коэффициент массоемкости δ_M и др.

В диссертации изучается лишь комплекс термических характеристик, т.е. величин λ , a , C , b . Это обуславливается тем, что сыпучая среда (премикс, БВМД) имеет сложную структуру, которая характеризуется протеканием одновременно действующих органически взаимосвязанных процессов тепловлагообмена. Исследование тепловых процессов в таких материалах осуществляется по двум направлениям [125].

1. С учетом, решением и анализом системы уравнений тепло- и массообмена; для этого необходимо знать термические и массообменные характеристики материала. Этот подход находит все больше применения, однако практическая реализация его связана со значительными трудностями: необходимостью учета большого числа характеристик, меняющихся в широких пределах в зависимости от структуры материала и условий опыта. В настоящее время сложный характер этих зависимостей выяснен далеко неполно. В тех же случаях, когда установлены точные количественные связи между комплексом термических характеристик и свойствами и структурой материала, возникают осложнения при

решении нелинейных задач теплопроводности. Как правило, для доведения решения до результативного конца приходится принимать термические характеристики вещества в определенных пределах постоянными.

2. На основе представления структуры материала как квазиоднородного тела. Тогда задача отыскания температурного поля сводится к решению одного уравнения теплопроводности, которое в связи с действием внутренних источников осложнено наличием переменных тепловых характеристик. В таком случае учитываются лишь термические характеристики материала λ , a , C , b , которые отражают влияние всех возможных в материале процессов, таких как конвекция, излучение и массообмен. Поэтому их уже нецелесообразно называть термическими характеристиками, вполне оправданным для них является термин теплофизические характеристики [94].

Таким образом, чтобы оценить тепловые свойства сыпучих материалов и понять основные термические процессы, протекающие в них при самых различных режимах и условиях, необходимо и достаточно знание четырех параметров λ , a , C , b , понимаемых как эффективные характеристики всей совокупности теплообменных и массообменных процессов в сыпучем материале [86, 92].

Составление, анализ и решение уравнения, учитывающего все виды теплопередачи, встречает большие затруднения математического и физического характера. В общем виде это уравнение для нестационарного режима при одномерном распространении тепла вдоль координаты x выглядит следующим образом:

$$-C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x}, \quad (2.2)$$

т. е. теплосодержание в материале равно производной от общего теплового потока q , равного сумме трех потоков q_T , q_K и q_P , обусловленных соответственно теплопроводностью, конвекцией и излучением:

$$q = q_T + q_K + q_P. \quad (2.3)$$

Рассмотрим по аналогии с коэффициентом кондуктивной теплопроводности коэффициенты конвективной и радиационной теплопроводности λ_K и λ_P .

Тогда

$$q_K = \lambda_K \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{и} \quad q_P = \lambda_P \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (2.4)$$

Величины λ_K и λ_P являются сложными функциями температуры. Вид этих функций зависит от величины температурного градиента в материале, характера его изменения, типа сложения частиц материала и может быть раскрыт лишь в простейших случаях на основе опытных данных. Можно считать, что в образце малого объема и в образце, открытом с обоих торцов ($x = \pm\infty$), при одномерном тепловом потоке и при малых значениях температурного градиента $\frac{\partial T}{\partial x}$ величина λ_K будет небольшой. Возрастание $\frac{\partial T}{\partial x}$ приведет к росту значений λ_K , при этом, чем интенсивнее будет увеличиваться градиент температуры, тем сильнее будет нарастать коэффициент λ_K , вернее всего, по показательному закону. В емкости, закрытой с одного или двух концов, картина осложняется, и λ_K нельзя представить в виде показательной функции от $\frac{\partial T}{\partial x}$.

Уравнение (2.2) может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned}
C \frac{\partial T}{\partial t} = & \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \\
& + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{k,x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{k,y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{k,z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \\
& + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{p,x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{p,y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{p,z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right].
\end{aligned} \tag{2.5}$$

Для одномерного случая уравнение (2.5) переходит в более простое:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{k,x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{p,x} \frac{\partial T}{\partial x} \right). \tag{2.6}$$

Решение этих уравнений даже в простейших случаях очень сложно, поскольку они содержат большое число неизвестных и трудно учитываемых параметров. Поэтому сложную среду приходится рассматривать как некоторое квазиоднородное вещество, уравнение теплопроводности для которого выводится с учетом реальных специфических особенностей сложного объекта путем введения в рассмотрение: 1) действующих внутренних источников тепла и 2) эффективного характера теплофизических характеристик материала. Представленное означает, что к неметаллическим материалам формально применимы те же уравнения теплопроводности, что и к твердым телам, но с учетом усложнений, вносимых этими обстоятельствами [139].

1) Уравнение теплопроводности будет содержать члены, отображающие наличие дополнительных притоков тепла за счет действия внутренних источников тепла, обусловленных наличием различных процессов, которые проходят внутри смесителя при перемешивании сыпучего материала (премикса, БВМД).

2) Теплофизические характеристики будут не постоянными, а

функциями от температуры, времени. Причем эти функции должны отражать истинные зависимости между теплофизическими характеристиками, свойствами и состоянием вещества, имеющими место в реальных условиях. Переменный характер этих характеристик связан с наличием в сложной среде используемого материала процессов испарения, конвекции и переноса вещества.

Рассмотрим физический смысл теплофизических характеристик. Коэффициент теплопроводности численно равен количеству тепла, проходящему в стационарном состоянии в единицу времени через две противоположные грани единицы объема материала, на которых поддерживается разность температур в 1°C . Таким образом, эта величина характеризует степень проводимости тепла веществом. Объемная теплоемкость численно равна количеству тепла, необходимому на нагревание или охлаждение единицы объема на 1°C . Следовательно, эта величина характеризует интенсивность изменения температуры тела при его нагревании или охлаждении. Температуропроводность материала оценивают с точки зрения быстроты выравнивания температуры и степени теплоаккумуляции [70].

Рассмотрим изменяющееся во времени температурное поле внутри образца материала, вырезанного по изотермической поверхности. Повышение температуры в таком образце в данный момент времени связано с накоплением подводимого к нему тепла и будет тем больше, чем меньше теплоемкость единицы объема образца. Скорость прогрева материала, мерой которой является его коэффициент температуропроводности, должна быть поэтому обратно пропорциональна C . С другой стороны, она обусловлена интенсивностью передачи тепла при данной разности температур от соседнего слоя к рассматриваемому. Следовательно, коэффициент температуропроводности a должен быть прямо пропорционален коэффициенту теплопроводности λ . Поэтому справедливо следующее равенство:

$$a = D_0 \frac{\lambda}{C}, \quad (2.7)$$

здесь D_0 – коэффициент, численная величина которого зависит от выбора единиц для λ , a и C . Полагая, имеем

$$a = \frac{\lambda}{C}. \quad (2.8)$$

Если γ – плотность материала, а c – удельная теплоемкость его, то $C = c\gamma$ и

$$a = \frac{\lambda}{c\gamma}. \quad (2.9)$$

Это уравнение связывает воедино физические параметры материала – его теплофизические характеристики. Именно эти характеристики (λ , a и C) порознь, в совокупности и в различных комбинациях входят в расчетные формулы температурного поля, тепловых потоков, теплоаккумуляции и тепловых потерь.

Поэтому анализируемое температурное поле смесительных элементов в данном случае необходимо представить, исходя из температуры в нескольких характерных (эталонных) точках, где точность измерения в определенной степени влияет на достоверность физического моделирования, причем наибольшее значение имеет также и способ регистрации изменяющихся температур [58, 59].

Следовательно, исходя из вышеперечисленных теоретических рекомендаций и современных контрольно-измерительных приборов, разработана тепловая схема для зоны активного внедрения перфорированных лопаток, функционально выполненных из несущего горизонтального гидроцилин-

дра 11, выдвигающего с помощью штока 14 и специального шарнирного соединения 18 на определенные углы корпус вертикального гидроцилиндра 17, шток 21 которого обеспечивает соответствующую глубину внедрения перфорированной лопатки 24, задающей управляемые вибрационные воздействия на смешиваемую сыпучую среду рассматриваемого специализированного стенда (рис.2.2) [98].

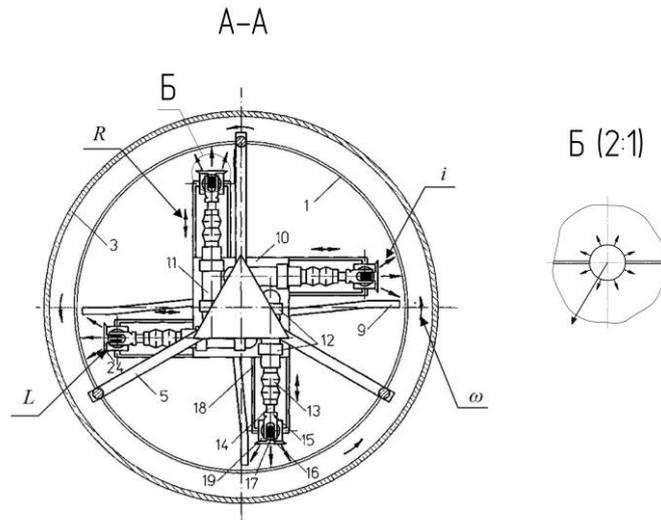


Рис. 2.2 – Тепловая схема в зоне активного внедрения перфорированных лопаток

В основу построения математической модели диагностирования процесса смешивания сыпучего материала (премикса, БВМД) в вибрационном смесителе периодического действия положены уравнения теплопроводности для полого цилиндра, когда внутри него действует источник постоянной мощности, а наружные поверхности поддерживаются при постоянной температуре [71].

Вибрационное формирование однородности смеси зависит от конструкции рабочего органа – перфорированных лопаток, совершающих локальные, однотипные, низкочастотные вибрационные колебания.

Найдем стационарное поле тепловых потоков в системе нагреватель (рабочий орган) – сыпучий материал, при условии, что тепловые потери в материал происходят только в области нагревателя.

Рассмотрим корпус смесителя, имеющий форму цилиндра, радиусом R .

Начальное температурное распределение – равномерное и соответствует температуре окружающей среды $\Theta_0 = const$. В смесителе находится сыпучая смесь, которая имеет постоянную температуру [95].

В некоторый момент времени $t_0 > 0$ в смесь начинает погружаться рабочий орган (цилиндрической формы) радиусом r и обмениваться теплом со средой постоянной температуры.

Тогда температурное поле в любой момент времени в данной системе будет определяться решением краевой задачи, с учетом двухпараметрического уравнения Колмогорова – Фоккера – Планка [98]

$$\frac{dc}{dt} = -W \frac{dc}{dx} + D_L \frac{d^2c}{dx^2} + \frac{D_R}{R} \frac{d}{dR} \left(R \frac{dc}{dR} \right), \quad (2.10)$$

следующим выражением:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Theta(R, \varphi, t)}{\partial t} = a \left[D_L \frac{\partial^2 \Theta(R, \varphi, t)}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Theta(R, \varphi, t)}{\partial R} + \frac{D_R}{R^2} \frac{\partial^2 \Theta(R, \varphi, t)}{\partial \varphi^2} \right], R > r, 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}, t > 0 \\ \Theta(R, \varphi, 0) = \Theta_0, R > r, 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}, \\ \frac{\partial \Theta(R, \varphi, t)}{\partial \varphi} = 0, R > r, \varphi = 0, t > 0, \\ \frac{\partial \Theta(R, \varphi, t)}{\partial \varphi} = 0, R > r, \varphi = \frac{\pi}{2}, t > 0, \\ \lambda \frac{\partial \Theta(r, \varphi, t)}{\partial R} = \bar{q}_0, 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}, t > 0, \\ \pi r \bar{q}_0 = q_0, \end{array} \right. \quad (2.11)$$

где Θ – температура, К;

t – время, с;

\bar{q}_0 – удельный тепловой поток, Вт/м²;

a – температуропроводность, м²/с;

λ – теплопроводность, Вт/(м·К);

D_L – коэффициент продольного перемешивания, м/с;

D_R – коэффициент поперечного перемешивания, м/с;

R – радиус поперечного сечения аппарата, м;

r – радиус нагревателя, м.

Краевая задача (2.11) запишется в виде

$$\frac{1}{a} \frac{\partial \Theta(R, t)}{\partial t} = \frac{D_L}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{\partial \Theta(R, t)}{\partial R} \right). \quad (2.12)$$

И частное решение дифференциального уравнения (2.12)

$$\Theta_L(R, p) = AI_0 \left[\sqrt{\frac{p}{a} R} \right] + BK_0 \left[\sqrt{\frac{p}{a} R} \right]. \quad (2.13)$$

Тогда находим выражение для поля тепловых потоков:

$$\bar{q}(R) = \frac{q_0}{2\pi R \lambda} \quad (2.14)$$

и распределение температуры в материале относительно температуры рабочего органа:

$$\Theta(R, t) = \Theta_H(t) - \frac{q_0}{2\pi \lambda} \ln \left[\frac{R}{r} \right]. \quad (2.15)$$

Одновременное механическое и вибрационное воздействие и воздействие тепловых источников на смесь в смесителе через некоторое время t приводит смесь в так называемое стационарное (однородное, с равномерно распределенной температурой) состояние, в режиме которого обычно определяется коэффициент теплопроводности [71]. Во всех случаях стационарному состоянию предшествует нестационарный режим, который может быть использован для определения второй теплофизической характеристики – ко-

эффициента теплопроводности. Создается таким образом возможность осуществить комплексное определение теплофизических свойств в течение одного непрерывно протекающего эксперимента [71].

Для вычисления теплофизических характеристик воспользуемся выражением, представляющим изменение температуры в цилиндре в результате нагрева тепловым потоком, вида [71]:

$$\frac{\Theta}{K_i} = 2F_0 - \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \Phi \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \exp(-\mu_n^2 F_0) = f \left(\frac{r}{R}; F_0 \right), \quad (2.16)$$

где $\Theta = \frac{\Theta(r, t) - \Theta_0}{\Theta_0}$, $\Theta(r, t)$ – температура в произвольной точке материала,

Θ_0 – начальная температура материала; $K_i = \frac{qR}{\lambda T_0}$ – критерий Кирпичева;

$F_0 = \frac{at}{R^2}$ – число Фурье; μ_n – корни характеристического уравнения

$J_1(\mu) = 0$, J_1 – функция Бесселя первого порядка первого рода; коэффициен-

ты $A_n = \frac{2}{\mu_n^2 J_0(\mu_n)}$, $\Phi \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) = J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right)$.

Регуляризация изменения температуры имеет место тогда, когда сумма ряда в выражении (2.16) становится пренебрежимо малой по сравнению с квазистационарной составляющей этого выражения:

$$\frac{\Theta}{K_i} = 2F_0 - \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2 = f_1 \left(\frac{r}{R}; F_0 \right). \quad (2.17)$$

Замена формулы (2.16) выражением (2.17) связана с оценкой величины (коэффициентом иррегулярности):

$$\varepsilon = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} A_n \Phi\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) \exp(-\mu_n^2 F_0)}{f\left(\frac{r}{R}; F_0\right)} \cdot 100\%, \quad (2.18)$$

которая при некотором $F_0 \geq F_{0_1}$ может быть сколь угодно малой [71].

Непосредственно из выражения (2.17) получим формулы для определения теплофизических характеристик в режиме изменения температуры. Для коэффициента теплопроводности

$$\lambda = \frac{qR}{2\Delta\Theta} \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{R^2} \right), \quad (2.19)$$

где $\Delta\Theta = \Theta_2(r_2, t) - \Theta_1(r_1, t)$ – разность между температурой какой-либо точки внутри смесителя и температурой точки на поверхности смесителя в один и тот же момент времени. Если $r_2 = R$ и $r_1 = 0$, то

$$\lambda = \frac{qR}{2\Delta\Theta}. \quad (2.20)$$

Для предлагаемого смесителя формула расчета коэффициента теплопроводности с учетом его размеров имеет вид:

$$\lambda = k \frac{q}{\Delta\Theta}, \quad (2.21)$$

где $k = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2R} = 0,3534$ м.

Дифференцируя (2.17) по времени, получаем

$$b = \frac{d\Theta(r, t)}{dt} = \frac{2aq}{\lambda R} = const, \quad (2.22)$$

где b – скорость нагревания материала.

Сравнивая формулы (2.19) и (2.22), находим выражение для расчета коэффициента температуропроводности:

$$a = \frac{b}{4\Delta\Theta} (r_2^2 - r_1^2), \quad (2.23)$$

или

$$a = \frac{r_2^2 - r_1^2}{4\Delta t}, \quad (2.24)$$

где $\Delta t = t_2 - t_1$ – время запаздывания (время, в течение которого температура в некоторой точке тела становится равной температуре в другой точке этого тела).

Знание теплового потока позволяет в квазистационарном режиме найти удельную теплоемкость непосредственно из соотношения, определяющего эту величину, т.е.

$$c = \frac{q}{b\gamma R}, \quad (2.25)$$

где γ – плотность материала.

Кроме того, формула, связывающая все теплофизические характеристики, имеет вид

$$c = \frac{\lambda}{a\gamma}. \quad (2.26)$$

Следовательно, возможно одновременное и независимое определение теплофизических характеристик и проверка результатов на основе выражений (2.25), (2.26).

Исходя из полученных результатов моделирования, представляем структуру алгоритма проведения диагностирования процесса смешивания сыпучего материала при вибрационном воздействии (рис. 2.3).

Таким образом, построенные теоретические модели позволили определить характер предлагаемого метода диагностирования процесса смешивания

сыпучих материалов (премикс, БВМД) в вибрационном смесителе периодического действия. При этом получены аналитические выражения для вычисления теплопроводности, температуропроводности и удельной теплоемкости, которые оказывают влияние на интенсивность нагрева сыпучих материалов (премикс, БВМД) [29, 37, 54, 73, 90, 91, 99, 101, 111, 132, 137, 142] .

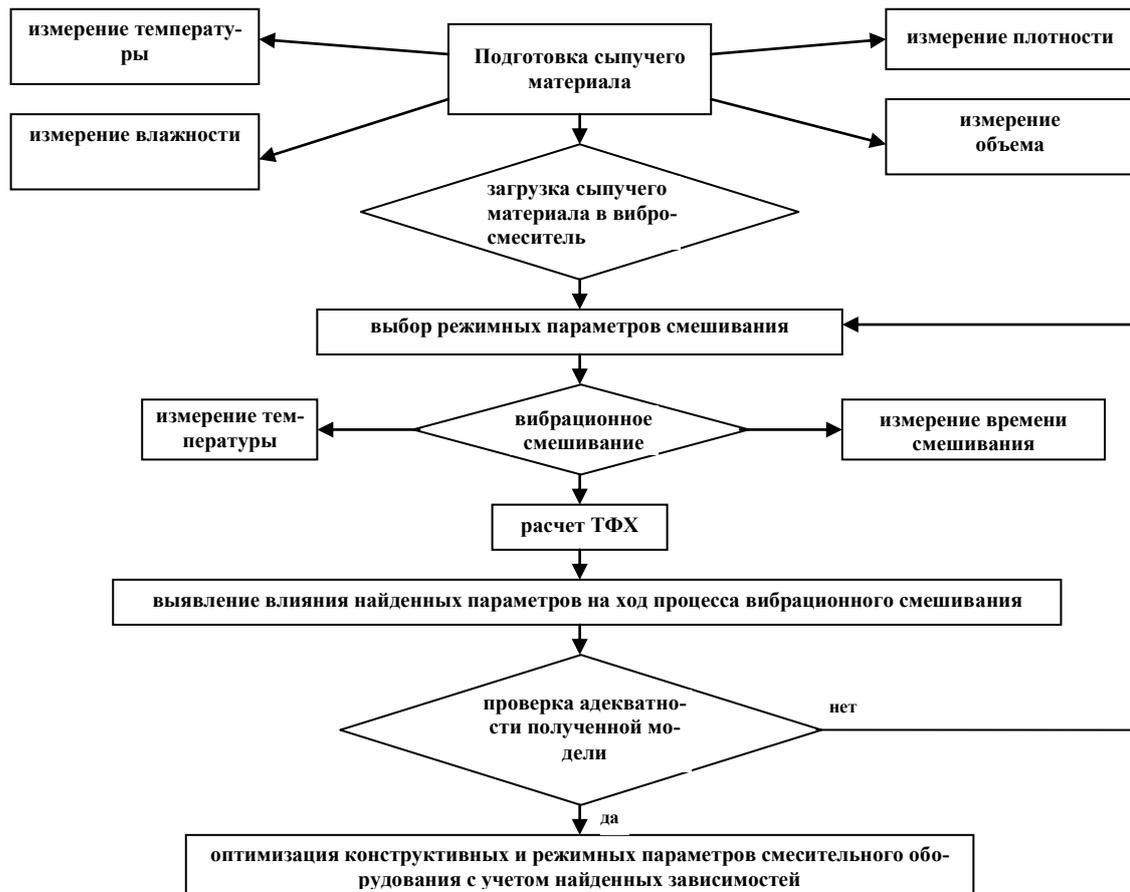


Рис. 2.3 – Алгоритм проведения диагностирования процесса смешивания сыпучего материала при вибрационном воздействии

Выводы по главе.

Для диагностирования рассматриваемого процесса смешивания сыпучих материалов необходимо учитывать следующие выводы.

1. Целесообразно использовать комплексный метод исследования теплофизических характеристик, который позволяет в результате одного эксперимента определить три теплофизические характеристики материала (премикса) при установленных режимах смесителя.

2. Теоретическая модель процесса вибрационного смешивания сыпучих материалов основана на двухпараметрическом уравнении диффузии, отражает взаимное проникновение перемешиваемых компонентов из слоя в слой при динамическом воздействии с использованием нелинейного уравнения теплопроводности для модернизированной конструкции смесителя и дополнительным устройством контроля температуры, определяющим темп нагрева подвижного смесительного элемента – перфорированной лопатки в сыпучей среде.

3. Для применяемого метода регулярного режима второго рода представлена краевая задача, соответствующая предлагаемому технологическому процессу смешивания сыпучих материалов в смесителях периодического действия вибрационного типа, позволяющая определять теплофизические характеристики материала как функции температуры.

ГЛАВА 3 Построение автоматизированной системы контроля температуры для конструкции смесителей периодического действия вибрационного типа

3.1 Бесконтактный и контактный контроль температурного нагрева подвижных смесительных элементов при традиционном смешивании и вибрационном воздействии на сыпучую среду

В настоящее время складывается определенная тенденция при постоянном совершенствовании смесительного оборудования вибрационного типа, а именно, конструктивное исполнение требует от большинства исследователей в области диагностики как в бесконтактном, так и в данном случае, для совместного диагностирования с регистрацией предельного нагрева электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы и одновременном фиксированием выходных параметров смесительных элементов.

Как известно, при вибрационном формировании однородности смеси сыпучего материала определяется не только стремление ряда авторов сократить энергоемкость процесса, но и контролировать параметры состояния рабочего органа в режиме автоматизированного управления.

Получили сигнал с термопар при теплофизических измерениях бронированного электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы в условиях теплоотвода и применения различного вида сыпучего материала [2, 8, 12, 15, 16, 36, 66, 136].

В данном случае процесс вибрационного формирования проводился в конструкции смесителя периодического действия вибрационного типа, патент № 2256492 [81], по условно разделенным участкам информативности при активном внедрении электромагнитных вибровозбудителей в режиме нагрева (охлаждения) и остывания: без премикса, с применением премикса, подаваемого при вибрационном смешивании в зону активного внедрения

перфорированной лопатки, фиксируемого с помощью серийно выпускаемого тепловизора марки Тесто 882 [113].

В качестве смесительного элемента применялся бронированный электромагнитный вибровозбудитель цилиндрической формы с перфорированной лопаткой, где фиксировали режимы вибрационного смешивания: скорость вращения емкости, подача, глубина внедрения и т.д.

Нагрев торцевой поверхности смесительного элемента контактной поверхности образующих – в фазе активного внедрения, зоны температурной стабильности, а также унифицированные сигналы регистрировались с помощью устройства контроля температуры УКТ38–Щ4 [117], установленного на приборной стойке, в результате сигналы усиливались, при этом оцифровывались посредством АЦП E-440 (L-CARD) и записывались в компьютер для последующей обработки.

В процессе проведения теплофизических измерений при периодическом смешивании измерялся температурный нагрев относительно каждой части бронированного электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы, а именно, по длине всей образующих, включая верхние (границы) торцы и нижние (торцы) и т.д.

Изменение величины температурного нагрева в условиях теплопередачи в лабораторных условиях представлены на рисунке 3.1.

На термограмме показаны точки нагрева бронированного электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы до начала вибрационного смешивания и после достижения однородности $\approx 95\%$ по задней грани поверхности образующих в результате проведения теплофизических измерений [4, 93, 94].

Эталонные точки нагрева были определены термопреобразователями, так видно, что при внедрении контактная поверхность бронированного электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы нагревается относительно нижней торцевой части образующих наиболее медленно, однако верхняя

торцевая часть нагретого вибровозбудителя имеет наименьший нагрев по радиусу закругления.

В режиме остывания получены промежуточные результаты, то есть при точечном нагреве по задней грани поверхности цилиндрических образующих в результате проведенной тепловизионной съемки наружной поверхности емкости смесителя вибрационного типа с учетом теплопередачи.

Исходный вид контактной поверхности при теплопередаче в обрабатываемом сыпучем материале и в нижней части бронированного электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы особенно заметны при остывании и в большей степени заметны по эталонным точкам термопреобразователей [53].

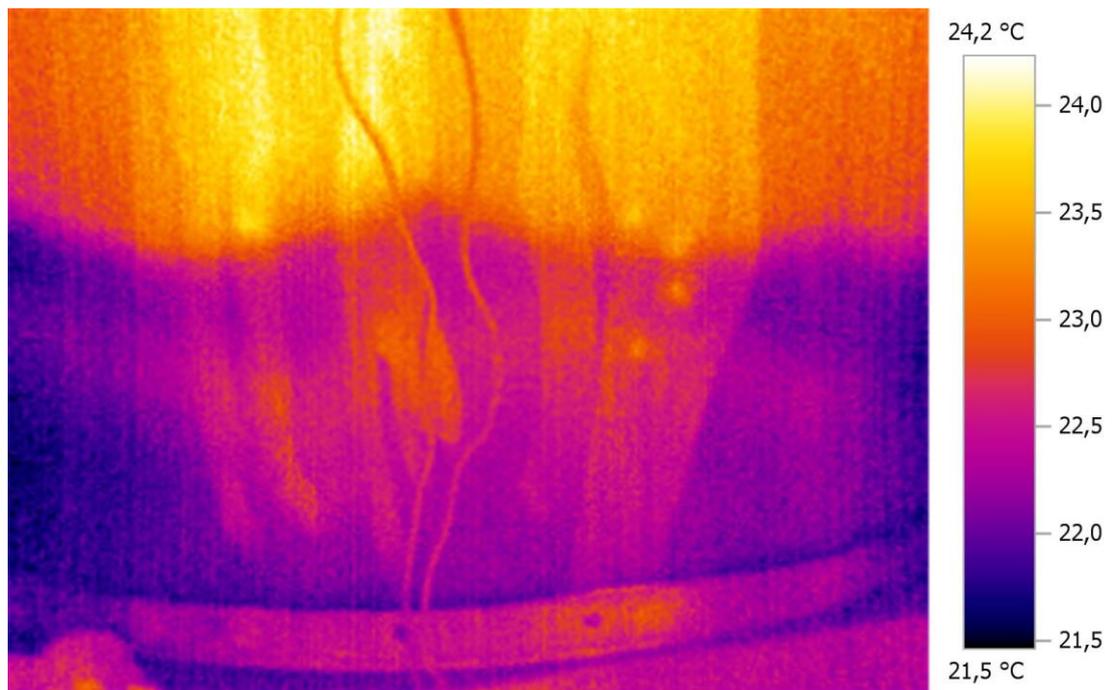


Рис. 3.1 – Термограмма точечного нагрева сыпучей среды

Наличие точек нагрева сыпучего материала свидетельствует о том, что разделенный слой имеет температурный градиент по направлению траектории выдвигания штока горизонтального гидроцилиндра и соответствен-

но вертикального, относительно нормали точечного (поверхностного) контактного нагрева.

Вызвано это за счет интенсивного воздействия в нижней части торцевой поверхности бронированного электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы прилегающей (контактируемой) в разделенном слое сыпучего материала, что позволяет в дальнейшем установить теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость.

Основной целью проведения экспериментальных исследований является повышение эффективности работы смесителя вибрационного типа посредством определения теплофизических характеристик сыпучего материала.

Как известно, исследование процесса вибрационного формирования сыпучего материала в схемах смесителя вибрационного типа влияет на повышение энергетических и технологических параметров.

В результате измерение температуры осуществляется контактным и бесконтактным способами. Контактным способом температура измеряется с помощью термоэлектрических преобразователей (далее – термопреобразователи) ТХК 9206, бесконтактным – тепловизором Testo 882 [9, 10, 15].

При проведении физического моделирования с учетом необходимых экспериментальных данных была разработана конструкция стенда для определения взаимного влияния в фазе активного внедрения бронированного электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы перфорированных лопаток.

При этом за счет интенсивного воздействия контактной (защитной) поверхности бронированного электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы в разделенном слое сыпучего материала имеется температурный нагрев, относительно высокий по сравнению с разделенным слоем.

3.2 Основные режимные параметры используемого смесителя периодического действия вибрационного типа

Диагностирование процесса вибрационного смешивания проводилось на экспериментальной установке (рис. 3.2), разработанной под руководством профессора Соловьева Сергея Александровича, для проведения физического и теоретического моделирования при изучении принципиально нового способа формирования однородности смеси [98]. Она относится к известному и широко распространенному классу вибрационных смесителей принудительного действия, хорошо зарекомендовавшему себя при использовании на различных производствах, во многих отраслях перерабатывающей промышленности.

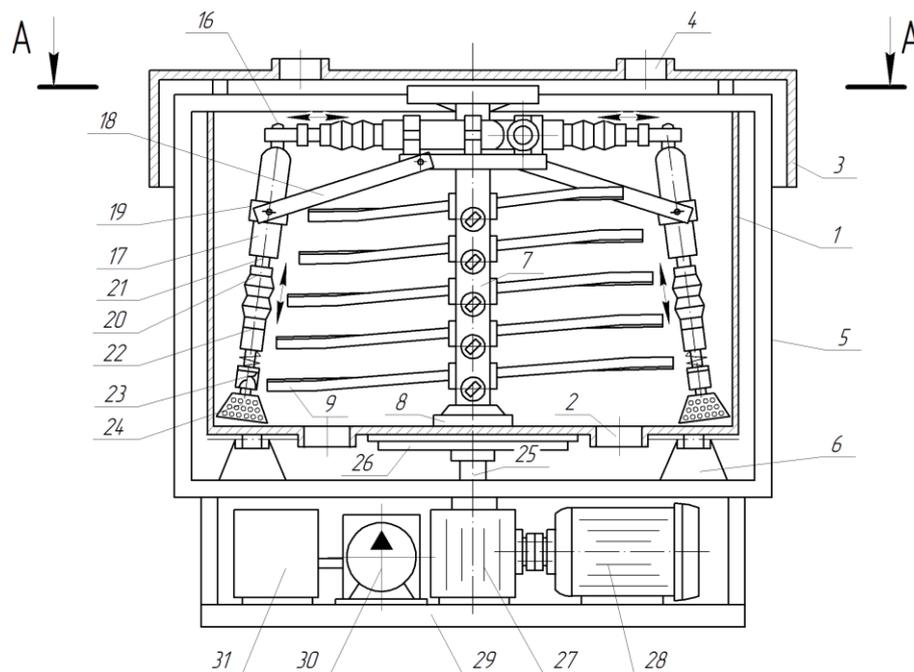


Рис. 3.2 – Схема экспериментальной установки смесителя периодического действия вибрационного типа [Патент № 2256492 от 20.07.2005]

В рабочей камере конструкции смесителя (рис. 3.2) установлены дополнительные внутренние элементы в виде мобильных перфорированных лопаток, обеспечивающих быстрое и целенаправленное возникновение мест-

ных вихревых потоков частиц исходных компонентов в пространственном движении. Эти управляемые движения частиц сыпучего материала относительно друг друга по сложным траекториям способствуют более эффективному и качественному вибрационному смешиванию различных компонентов с разной объемной массой и получению однородности смеси за короткий промежуток времени.

Предлагаемая конструкция смесителя периодического действия вибрационного типа (рис. 3.2) состоит из следующих функциональных узлов и деталей: емкость 1 с выгрузными горловинами 2, съемной крышкой 3 с загрузочными горловинами 4, смонтирована на сварной опорной раме 5 и поддерживающих роликах 6, к верхней части которой крепится жестко один конец центральной полой стойки 7, другой конец стойки 7 опирается на внутреннюю скользящую вставку 8, в нижней части емкости 1 к центральной полой стойке 7 присоединены съемные делители 9 и установлена площадка крепления 10 четырех несущих горизонтальных гидроцилиндров 11, зафиксированных в разъемных захватах 12, перекрывающих емкость 1 за счет закрытых гофрированными кожухами 13 штоков 14 с ввернутыми вилками 15, к которым присоединены проушины 16 четырех корпусов вертикальных гидроцилиндров 17 и четырех подвижных шарнирных соединений 18, закрепленных одной стороной к площадке крепления 10 (четыре несущих горизонтальных гидроцилиндров 11), другой стороной прикрепленных к разъемным захватам 19 вертикальных гидроцилиндров 17, опускающих в емкость 1 закрытые гофрированными кожухами 20 штоки 21, на которых закреплены защищенные герметичными чехлами четыре вибратора 22, с присоединенными подпружиненными сферическими соединениями 23 и четырьмя перфорированными лопатками 24.

Привод емкости 1 смесителя содержит вертикальный вал 25, установленный внутри центральной полой стойки 7, закрепленный в верхней части сварной опорной рамы 5 и во фланце 26 под днищем емкости 1 в подшипниках (не показаны), соединенный с редуктором 27, который приводится во

вращение электродвигателем 28, расположенным на неподвижной станине 29, а также гидросистему перфорированных лопаток, гидронасос 30, гидрораспределители (не показаны) горизонтальных 11 и вертикальных 17 гидроцилиндров, систему трубопроводов и гибких рукавов (не показаны), соединительную гидроарматуру (не показана), бак с рабочей жидкостью 31, манометр, фильтр, предохранительный клапан (не показаны).

Работает конструкция следующим образом: в емкость 1 смесителя через загрузочные горловины 4, расположенные на съемной крышке 3, подаются для смешивания компоненты в заданных пропорциях, затем включается привод смесителя 28, при вращении емкости 1 материал набегает на делители и постепенно (в зависимости от оборотов двигателя 28 – по тахометру) расслаивается по сложной траектории.

Одновременно начинается работа гидросистемы, штоки 14 четырех несущих горизонтальных гидроцилиндров 11 на изменяемую дискретную величину радиусов выдвигают с помощью четырех подвижных шарнирных соединений 18 четыре корпуса вертикальных гидроцилиндров 17, штоки 21, которые внедряют в материал на изменяемую дискретную величину – глубину четыре вибратора 22 с присоединенными подпружиненными сферическими соединениями 23 и четырьмя перфорированными лопатками 24.

На четыре вибратора 22 посредством экранированного кабеля (не показан), закрепленного на четырех несущих горизонтальных гидроцилиндрах 11 и вертикальных гидроцилиндрах 17, пропущенного внутри защитных гофрированных кожухов 13 и 20 (не показано), штоков 14 и 21, подается пониженное переменное напряжение, приводящее настолько в подвижное состояние колебательную систему (подпружиненные сферические соединения 23 и перфорированные лопатки 24), что непосредственно у нескольких (в зависимости от внутренней конструкции), вибрирующих непрерывными пульсирующими движениями, поверхностей перфорированных лопаток 24 частицы материала приобретают энергию и передают ее вглубь создаваемого взаимодействующего слоя и из слоя в слой. При соударении частицы мате-

риала приводят среду к виброкипению и перемешиванию, достигая высокой степени однородности, готовая смесь отводится в выгрузные горловины 2.

Основное достоинство предлагаемого смесителя периодического действия вибрационного типа (рис. 3.2) заключается в том, что в конструкции использован наиболее прогрессивный способ построения процесса смешивания сыпучих материалов, в результате которого частицы исходных компонентов смеси находятся в виброожигенном состоянии, а шум и вибрация, возникающие при работе смесителя, не превышают допустимых норм ГОСТ: 12.1.003-83; 12.1.012-90, в отличие от традиционного формирования однородности смеси [5, 6, 23, 25, 38, 44, 45, 46, 47, 55, 56, 68, 74, 75, 78, 84, 88, 89, 98, 106, 107, 112, 120, 121, 122, 123, 131].

При классическом способе построения процесса смешивания вибрационные воздействия накладываются на корпус смесителя, а не на перемешиваемую среду, что наиболее эффективно и было использовано в предлагаемом смесителе, который имеет целый ряд существенных преимуществ по сравнению с конструкциями смесителей данного типа:

- во-первых, весь сыпучий материал в течение всего времени обработки находится в движении без застойных зон и интенсивно перемешивается за счет циркуляции всей генеральной совокупности, осложненной послойным разделением и проникновением с непрерывным принудительным управляемым вибрационным воздействием в разных точках емкости смесителя;
- во-вторых, среда получает вибрационные импульсы от перфорированных лопаток в режиме резонансных колебаний, где собственная частота механической колебательной системы (подпружиненные сферические соединения и перфорированные лопатки) устанавливается равной частоте вибраторов (методом подбора на вибростенде), эта конструкция характеризуется малым потреблением энергии и обеспечивает максимальную пространственную амплитуду движений инерционных перемешивающих элементов;
- в-третьих, подводимая внутренняя управляемая энергия в заданных режимах равномерно распределяется по поперечному сечению и высоте емкости смесителя и нужным образом влияет на поле скоростей создаваемых

взаимодействующих слоев, обеспечивая высокую интенсивность смешивания;

- в-четвертых, унифицированность элементов внутреннего устройства позволяет оптимизировать процесс смешивания в соответствии с предъявляемыми требованиями к качеству смеси;
- в-пятых, очистка материала от механических включений или примесей.

Таблица 3.1 – Техническая характеристика предлагаемого смесителя вибрационного типа

Показатели	Значения
Производительность, <i>т/ч</i>	5
Вместимость, <i>м³</i>	2,3
Степень однородности, %	95
Время смешивания, <i>мин</i>	3-6
Установочная мощность, <i>кВт</i>	4,5
Масса смесителя, <i>кг</i>	249
Частота колебаний, <i>Гц</i>	8 – 40,59
Амплитуда, <i>м</i>	$5 - 25,519 \cdot 10^{-3}$
Свободное сечение перфорированных лопаток, %	5 – 15
Угловая скорость емкости смесителя, <i>рад/с</i>	3,14 – 6,28
Диаметр емкости смесителя, <i>м</i>	1,44
Высота емкости смесителя, <i>м</i>	1,4

При всех вышеперечисленных преимуществах необходимо в особенности отметить, что вредным фактором, возникающим при работе смесителя, является выделение пыли из обрабатываемых материалов, то есть смеситель следует эксплуатировать с соблюдением требований ГОСТ 12.3.002-75, а именно: горловины загрузки и выгрузки должны быть герметично соеди-

нены с трубопроводами.

Электрооборудование, установленное на предлагаемом смесителе, выполнено в соответствии с требованиями ПЭУ для работы в зонах класса В -11а, где степень защиты системы управления и оболочек электродвигателей не ниже IP54 ГОСТ 14254-96 [98].

Технологические режимы работы смесителя представлены в таблице 3.1.

3.3 Контрольно-измерительные приборы, используемые при проведении экспериментальных исследований

При исследовании тепловых процессов в сыпучей среде необходимо учитывать изменение температурного поля – совокупность значений его температуры в любой момент времени, тем не менее как в лабораторных, так и в производственных условиях на подготовительных этапах проведения соответствующих испытаний невозможно полностью воспроизвести температурное поле объекта [62, 64, 69, 83, 105, 110].

Поэтому для измерения температурного нагрева электромагнитных вибровозбудителей цилиндрической формы использовался восьмиканальный прибор ОВЕН УКТ38-Щ4 – устройство контроля температуры предназначено для контроля производственных технологических процессов в различных отраслях промышленности [60].

Устойчивость к климатическим воздействиям при эксплуатации УКТ38-Щ4 соответствует группе исполнения В4 по ГОСТ 12997-84, а устойчивость к механическим воздействиям при эксплуатации УКТ38-Щ4.ТП соответствует группе исполнения N1 по ГОСТ 12997-84.

Обработка сигналов преобразователей термоэлектрических (термопар), поступающих на входы, осуществляется по заданным для каждого из них номинальным статическим характеристикам (НСХ) преобразования.

Преобразование их сигналов в температуру производится по НСХ, приведенным в ГОСТ Р 8.585-2001 [33], ее отображение осуществляется также в градусах Цельсия.

В процессе вибрационного смешивании необходимо рассмотреть траектории перемещения и наложения вибрационных воздействий на сыпучий материал по рабочим зонам емкости смесителя, то есть зона начального внедрения, зона нерегулярного режима и зона температурной стабильности для нескольких перфорированных лопаток.

При этом для измерения влажности смеси использовался влагомер «Фауна-М», предназначенный для экспресс-анализа влажности непосредственно на месте отбора проб в сыпучей смеси при дополнительной градуировке, разработке и аттестации методик выполнения измерений (МВИ) [7].

Влагомер реализует диэлькометрический (емкостной) метод измерения влажности и представляет собой микропроцессорный прибор, обеспечивающий вывод на жидкокристаллический знаковый индикатор процентного содержания влажности и названия контролируемых культур, выбор контролируемой зерновой или масличной культуры, автоматическое отключение процесса измерения и подачу сигнала на замену разряженной батареи питания [95].

Влагомер имеет возможность увеличения числа контролируемых культур до 20 или замену на другие виды культур.

Влагомеры имеют следующие сервисные функции:

- автоматическое отключение электропитания после 7 с индицирования данных на дисплее;
- корректировку результатов измерений (смещение градуировки) для каждой шкалы;

– автоматическая термокомпенсация температуры.

Конструктивно влагомер выполнен в виде переносного прибора со встроенным датчиком. Внутри корпуса расположен микропроцессор и элементы измерительного преобразователя. На передней панели находятся знаковый индикатор и кнопка включения и выбора культур. В нижней части влагомера расположен специальный отсек для батарей питания [7].

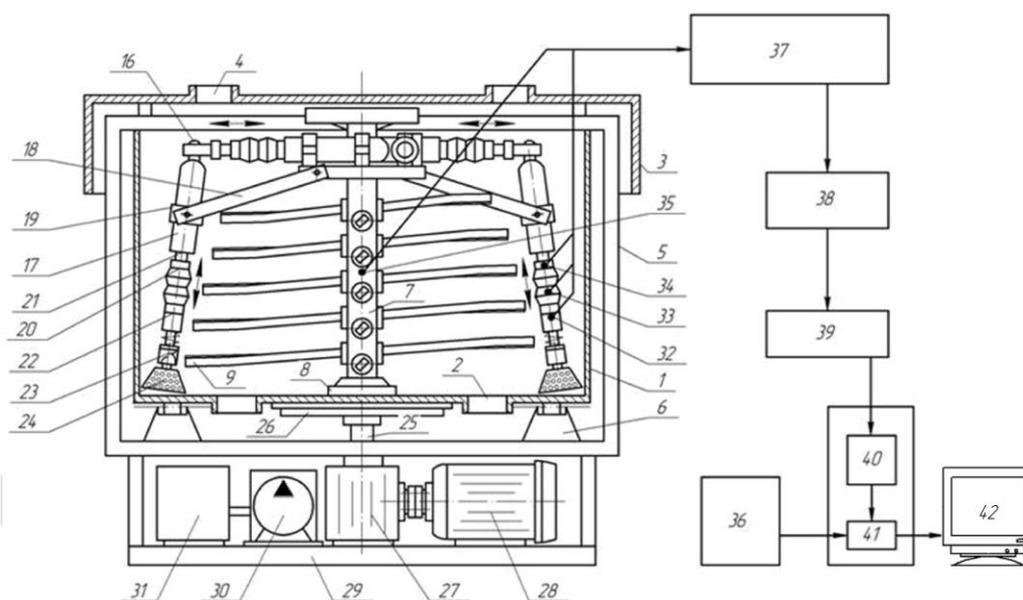


Рис.3.3 – Специализированный стенд; 1 – емкость; 2 – горловины загрузки; 3 – съемная крышка; 4 – горловины выгрузки; 5 – опорная рама; 6 – поддерживающие ролики; 7 – центральная полая стойка; 8 – скользящая вставка; 9 – съемные делители; 10 – площадка крепления; 11 – горизонтальные гидроцилиндры; 12 – разъемные захваты; 13 – гофрированные кожухи; 14, 21 – штоки горизонтальных и вертикальных гидроцилиндров; 15 – вилки горизонтальных гидроцилиндров; 16 – проушины вертикальных гидроцилиндров; 17 – вертикальные гидроцилиндры; 18 – шарнирные соединения; 19 – разъемные захваты; 20 – гофрированные кожухи; 22 – вибровозбудители; 23 – пружинные сферические соединения; 24 – перфорированные лопатки; 25 – вертикальный вал; 26 – фланец; 27 – редуктор; 28 – электродвигатель; 29 – неподвижная станина; 30 – насос; гидрораспределители (не показаны); система трубопроводов и гибких рукавов (не показана); соединительная гидроарматура (не показана); 31 – бак с рабочей жидкостью; манометр; фильтр; предохранительный клапан (не показаны); 32-35 – термопреобразователи; 36 – тепловизор; 37 – устройство для измерения и контроля температуры; 38-39 – преобразователи интерфейса; 40 – USB-контроллер; 41 – центральный процессор; 42 – дисплей компьютера.

Для определения частоты вращения емкости смесителя использовался тахометр электронный ТЭ30-5Р, предназначенный для измерения частоты вращения валов агрегатов со следующими рабочими диапазонами:

I – от 30 до 300 об/мин;

II - от 300 до 3000 об/мин;

III - от 3000 до 30000 об/мин.

Для проверки качества смешивания – однородности – в конструкции смесителя применялись весы лабораторные модели ВЛТК – 500, которые предназначены для определения массы при производственных технических анализах в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства [98].

Таким образом, с учетом вышеперечисленных теоретических рекомендаций и современных контрольно-измерительных приборов был разработан современный стенд (рис. 3.3), который позволяет провести полную аналитическую обработку полученной информации, то есть зафиксировать температурные отклики в нескольких заданных точках контактной поверхности электромагнитных вибровозбудителей цилиндрической формы перфорированных лопаток в режиме нагревания и остывания [11, 13] .

Во время работы прибор УКТ38-Щ4.ТП выполняет следующие основные функции, контролируя с помощью первичных термоэлектрических преобразователей:

- физические параметры объектов в восьми каналах измерения и отображает значения этих параметров на встроенном цифровом светодиодном индикаторе;

- отображает на встроенном цифровом светодиодном индикаторе заданные пользователем значения параметров контроля;

- передает компьютеру значения контролируемых термопар.

Для измерения температуры к прибору УКТ38 – Щ4 подключались преобразователи термоэлектрические (термопары) ДТПК014-00.20/2 ГОСТ 6616-94 и ТХК 9206 (рис.3.4) [8, 38, 39].

Преобразователи термоэлектрические предназначены для непрерывного измерения температуры жидких, паро- и газообразных сред, сыпучих материалов и твердых тел, не агрессивных к материалу защитной арматуры преобразователя ГЗ.16.1.1.100 – защитная гильза,

в различных отраслях промышленности и народного хозяйства. Термопреобразователи ДТП выпускаются в соответствии с ТУ 4211-022-46526536-2009.

Прибор одновременно может работать с датчиками, обрабатывающими физические параметры различной размерности, также предусмотрена возможность сдвига десятичной точки при выводе измеренной величины на цифровой индикатор [117].

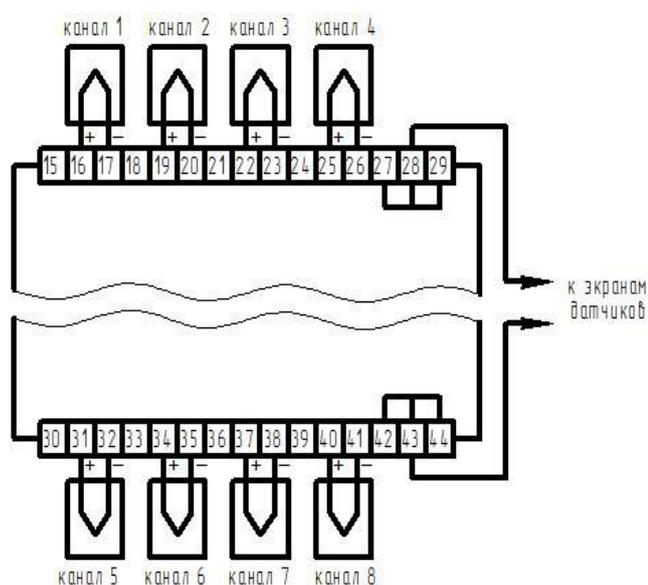


Рис. 3.4 – Схема подключения термопреобразователей к УКТ38-Щ4.ТП

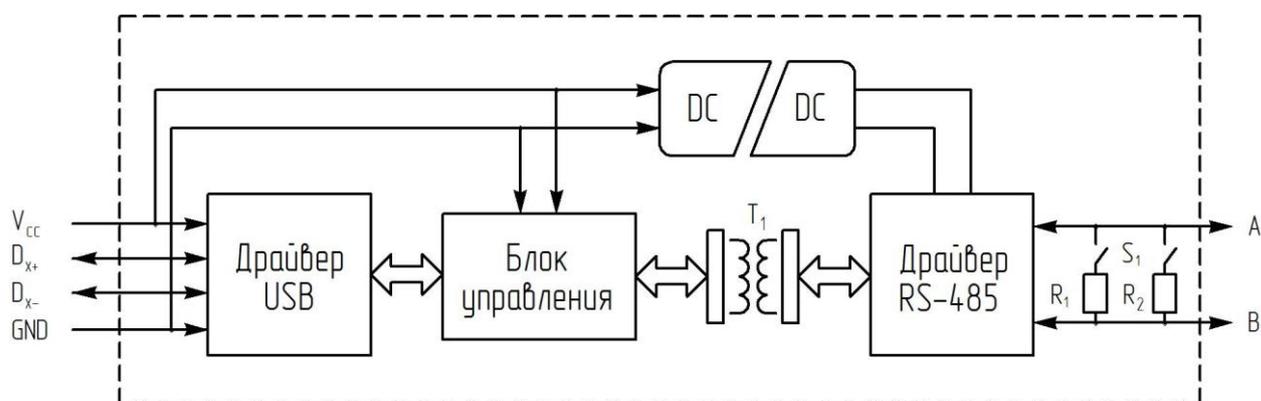


Рис.3.5 – Функциональная схема подключения адаптера интерфейсов AC2 и AC4

Обработка значений, полученных в точках от разных термопар, выполняется последовательно одним и тем же узлом – центральным микропроцессором. Время, затраченное прибором на обработку показаний (продолжительность цикла опроса термопар), зависит от количества включенных в работу термопар.

Передача обработанных значений от прибора УКТ38-Щ4.ТП в персональный компьютер осуществляется с помощью преобразователей интерфейсов АС2-М и АС4 (рис.3.5) [117].

В результате интенсивность нагрева с учетом полученной информации о вибрации осуществляется преобразователями пьезоэлектрическими виброизмерительными: ДН-3-М1ТУ 25-7705.009-88; ДН-4-М1ТУ 25-7705.0020-88; в дальнейшем – вибропреобразователи ДН-3М-1 и ДН-4М-1. В отличие от традиционной схемы смешивания прибор ВШВ-003-М2 предназначен для измерения вибрационных эффектов в диапазоне частот от 2Гц до 8кГц, в свободном и диффузионном полях применяется принцип преобразования механических колебаний исследуемых объектов в пропорциональные им электрические сигналы, которые затем усиливаются, преобразуются и измеряются измерительным трактом (прибором измерительным), в качестве преобразователей механических колебаний в электрические сигналы используются преобразователи ДН-3М-1 и ДН-4М-1[97, 100, 102, 109].

Полученные результаты можно представить в виде краевых условий для температурного поля среды при известном распределении температуры (начальное условие) и закон взаимодействия с окружающей средой (граничное условие) [70, 71].

Выводы по главе

Одним из главных преимуществ представленного специализированного стенда является управляемость процессом вибрационного смешивания, поэтому для обеспечения точного и надежного режима работы смесителя применяется автоматизированная система температурного контроля для изменения диапазона нагрева подвижных смесительных элементов – перфорированных лопаток.

Таким образом, предлагается модернизированная конструкция, которая позволяет интенсифицировать процесс вибрационного формирования однородности смеси в автоматически заданном режиме управления, синхронизируемым с гидравлическим приводом и контрольно-измерительным прибором с термопреобразователями, участвующим в структуре задающего устройства, где алгоритм контроля динамического нагрева должен отвечать следующим требованиям.

1. Для повышения эффективности и снижения энергоемкости смесительного оборудования при вибрационном воздействии следует руководствоваться измерением и отображением диагностической информации, полученной контактным и бесконтактным способом в реальном режиме времени, с расчётом теплофизических и виброреологических характеристик сыпучего материала и последующим сохранением и статистической обработкой результатов в соответствующих программах.

2. Вибрационные эффекты, наблюдаемые в рассматриваемой конструкции, при формировании однородности смеси вызывают определенные сложности в физическом моделировании, так как невозможно одновременно установить взаимодействие основных геометрических и технологических параметров смесителя вибрационного типа с теплофизическими и виброреологическими характеристиками исходного материала.

3. С применением регистрирующих устройств нового поколения возможно получить температурные зависимости для комплексного определения

теплофизических характеристик сыпучего материала при необходимых допущениях, а также для корректного отображения наблюдаемых тепловых явлений в предлагаемом специализированном стенде, следует производить полную аналитическую обработку полученной экспериментальной информации за счет управления режимами работы подвижных элементов (перфорированных лопаток) смесителя периодического действия вибрационного типа и зафиксировать температурное поле в заданной программе с использованием нескольких термопреобразователей и тепловизора.

ГЛАВА 4 Результаты экспериментальных исследований температурного нагрева смесительных элементов

4.1 Применение совместного контактного и бесконтактного способа теплового контроля в конструкции смесителя вибрационного типа

Как известно, для расчета теплофизических характеристик сыпучих материалов необходимо использовать как аналитические методики, так и экспериментальные способы теплофизических исследований в лабораторных условиях, где техника измерений и методика обработки экспериментальных данных были достаточно простыми, а методики комплексными, т.е. позволяющие определять все теплофизические характеристики в одном эксперименте [28, 80]. Следует отметить, что существует множество методик теплового контроля [72], где в основном используется не только определение комплекса теплофизических характеристик, но и температурно-временных характеристик структурных превращений в различных материалах, измеряемых в диапазоне исследуемых температур.

При проведении экспериментальных исследований использовался премикс ГОСТ Р 51095-97 [34]. Точность проведения серии экспериментов обеспечивалась загрузкой одинаковой по весу навесок и применением необходимого контрольно-измерительного оборудования для теплового измерения от электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы постоянной мощности с одновременным фиксированием температурных откликов в нескольких заданных точках контактной поверхности в режиме нагревания и остывания; визуальный анализ полученных термограмм продолжался дальнейшей обработкой результатов с помощью программы Statistica 6.0 [77, 79, 92, 96].

Техническое описание данного типа оборудования подробно представлено [см.гл.3. п. 3.3].



Рис. 4.1 – Настройка и поверка контрольно-измерительных приборов

При измерении температурного нагрева электромагнитных вибровозбудителей использовался восьмиканальный регистрирующий прибор УКТ38-Щ4, где съем полученной информации осуществлялся унифицированным сигналом от термопреобразователей.

Первоначально исследовалось температурное поле контактной поверхности электромагнитного вибровозбудителя в зависимости от времени работы смешивания сыпучих материалов, изменение температуры по времени в заданных точках верхней, нижней торцевой части (с соответствующим отступом) и в среднем сечении образующих корпуса цилиндрической формы при различных режимах смешивания и исходном тепловом состоянии [27].

Экспериментальные графики строились в координатах: температура контактной поверхности и продолжительность вибрационного смешивания до динамического равновесия в цикле. При этом на оси ординат откладыва-

лись значения начальной температуры до внедрения перфорированных лопаток в среду (рис 4.2).

Получены графические зависимости температуры от времени термопреобразователя в точке n_4 по отношению к точкам n_1 , n_2 , n_3 , установленных на электромагнитных вибровозбудителях – перфорированных лопатках – в конструкции смесителя периодического действия вибрационного типа.

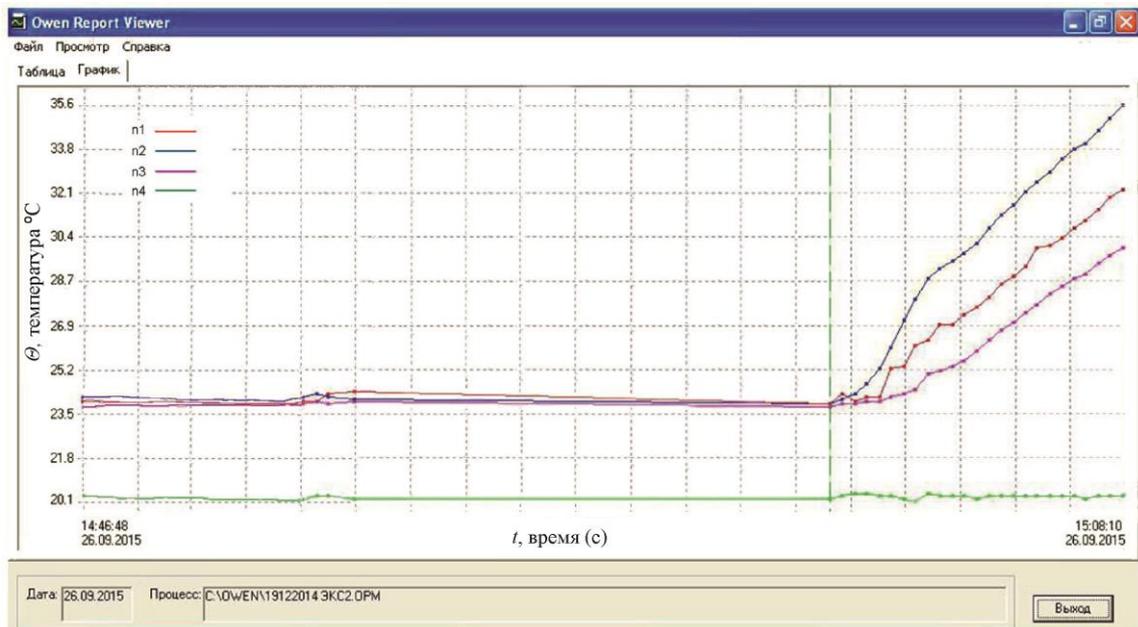


Рис. 4.2 – Экспериментальные зависимости температуры, $^{\circ}\text{C}$, от времени вибровоздействия, с, до внедрения перфорированной лопатки в сыпучую среду в окне программы Owen Report Viewer

В результате вызвано это тем, что за счет интенсивного воздействия контактной поверхности электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы в разделенном слое сыпучего материала происходит температурный нагрев, наиболее высокий по сравнению с i -ым разделенным слоем в начальной фазе активного внедрения в сыпучий материал.

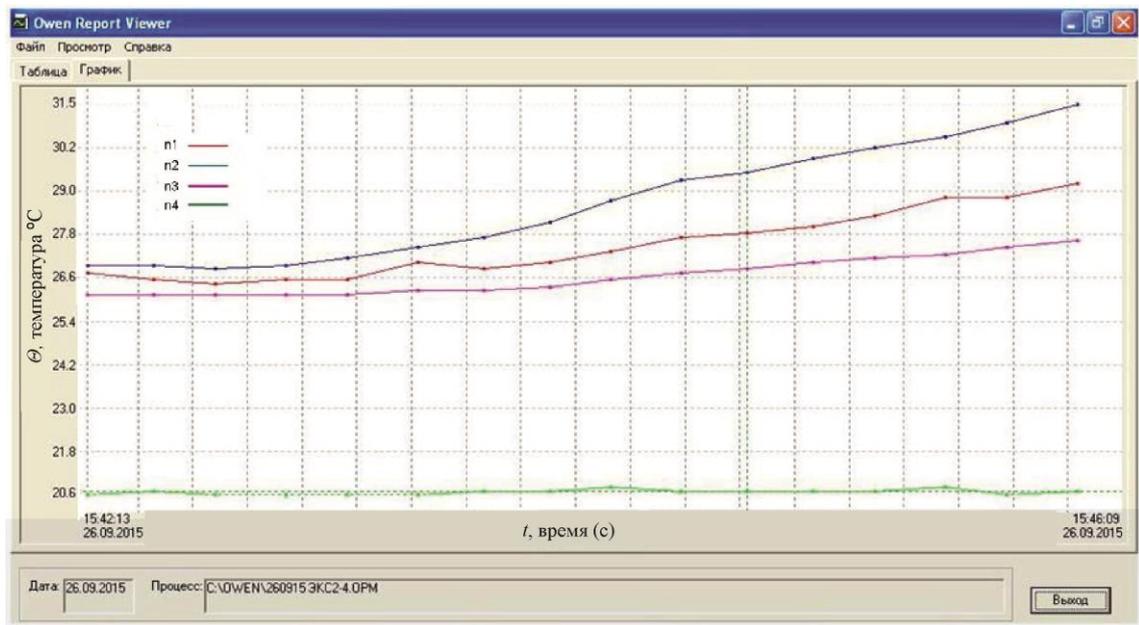


Рис. 4.3 – Экспериментальные зависимости температуры, $^{\circ}\text{C}$, от времени вибровоздействия, с, в фазе активного внедрения перфорированной лопатки в окне программы Owen Report Viewer

При сдвиговом внедрении перфорированных лопаток в активной фазе показано распределение температурного нагрева в среднем сечении электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы от установленного термопреобразователя n_2 с помощью унифицированного сигнала, передаваемого по измерительному тракту в регистрирующее устройство УКТ 38 Щ.4 с дальнейшей обработкой программой Owen Report Viewer на нетбуке Aser.

Как известно, тепловизионная техника служит для измерения температуры объектов бесконтактным способом, однако при этом следует помнить, что тепловизор фиксирует не само температурное поле, а лишь тепловой поток в ИК- области, излучаемый поверхностью тела. Определение поля температур и построение термограмм производится программным обеспечением, «защитым» в память тепловизора. Программное обеспечение прибора зачастую не учитывает многие физические эффекты (анизотропию), возникающие при

излучении, поглощении и отражении теплового излучения, что неминуемо сказывается на результатах измерения температуры [65, 113] .

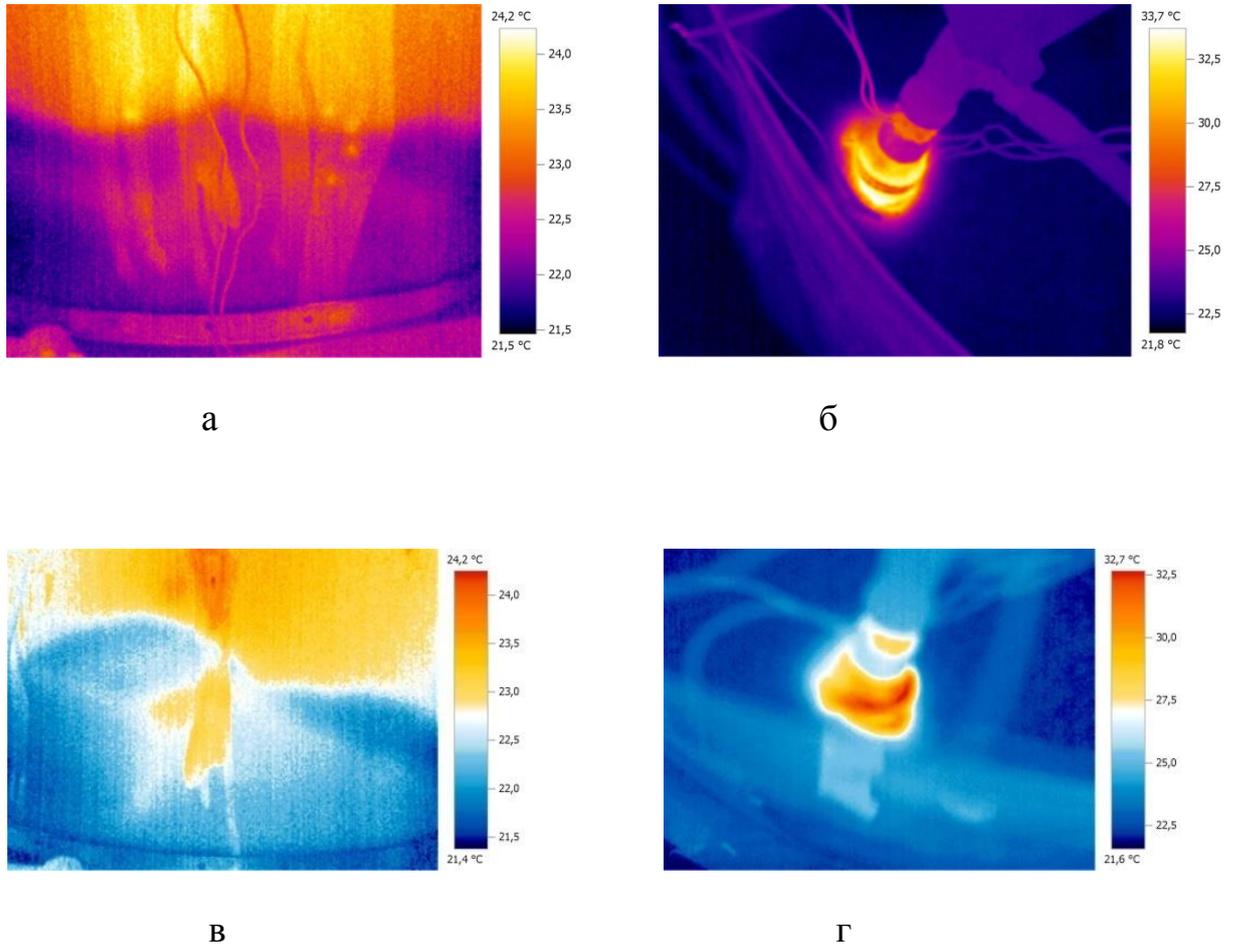


Рис.4.4 – Результаты тепловизионной диагностики (а, б, в, г)

Для исследования тепловых процессов в сыпучем материале необходимо представить изменение его температурного поля [48]. Реально в эксперименте невозможно полностью воспроизвести температурное поле объекта исследования. Однако температурное поле можно смоделировать, измеряя температуры в нескольких характерных (эталонных) точках. Точность измерения температуры в значительной степени определяет достоверность теплотехнического эксперимента, большое значение имеет также и способ регистрации изменяющихся температур [32, 50, 51, 114, 115, 116].

При исследовании тепловых процессов в объектах небольших размеров, а также в объектах, где поле температур которых неоднородно, удобнее всего использовать термоэлектрические преобразователи (термопары). Датчики, изготовленные на основе этих преобразователей, могут быть достаточно малых размеров (до сотых долей миллиметра), соответственно погрешности измерения температуры, обусловленные размерами датчиков, будут минимальны [17, 18, 39, 61].

Общая картина температурного поля по участкам информативности представлена на термограммах рисунка 4.4.

В результате дистанционной диагностики получили тепловизионные снимки (термограммы) процесса вибрационного смешивания в вибрационном смесителе, которые после обработки в программе testo тепловизора 882 подтвердили результаты, полученные контактным путем с помощью термоэлектрических преобразователей [33, 35].

4.2 Комплексное определение теплофизических характеристик сыпучего материала при динамических воздействиях

Коэффициент теплопроводности характеризует способность тела проводить тепло. Согласно работам профессора А.Ф. Чудновского коэффициент теплопроводности характеризует теплопередачу от более нагретого тела к менее нагретому [139].

А.С. Гинзбург считает, что для дисперсных материалов коэффициент теплопроводности является величиной условной (вводится понятие эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эф}$, в отличие от истинного λ) [30, 31]. Так как для материалов разной структуры механизм передачи тепла различен, численно коэффициент теплопроводности равен количеству тепла, проходящего каждую секунду через единицу площади изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице. Коэффициент теплопроводности

зависит от давления (при сублимации), температуры и влажности, а для дисперсных материалов – от размеров частиц, пористости, насыпной плотности, дополнительного конвективного переноса тепла и лучистого теплообмена в порах.

Таким образом, исходя из сложившихся теоретических подходов, определяем коэффициент теплопроводности в зависимости от размеров смесителя, мощности нагревателя и разности температур в точке на поверхности и точке внутри емкости смесителя.

В результате эксперимента, зафиксированного регистрирующим устройством УКТ 38 Щ.4, с применением созданной прикладной программы «Система вычисления теплофизических характеристик премикса», написанной на языке Delphi 6.0 (Приложение 1, 2), для теоретических расчетов с использованием теоретических формул (2.22 – 2.27) главы 2 получены следующие значения теплофизических характеристик: при изменении температуры смесительных элементов в пределах от 23⁰С до 36⁰С теплопроводность изменялась от 4,1 до 1,26 Вт/(м·К), температуропроводность – от 10,87 до 0,17 м²/с, теплоемкость – от 8,1 до 2,88 Дж/(кг·К). Это свидетельствует о незначительном нагреве рабочих элементов, что подтверждается термограммой о распределении температурного поля, полученной с помощью тепловизора.

Точность экспериментального исследования достигалась путем сравнения с данными, полученными при визуализации тепловизионным методом. Используя представленные вычисления, построены зависимости теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости (рис. 4.5 – 4.7).

В ходе проведения эксперимента исследовалось влияние температурного нагрева электромагнитных вибровозбудителей цилиндрической формы в емкости смесителя вибрационного действия; продолжительности вибрационного смешивания до динамического равновесия; влажности и теплопроводности сыпучего материала [4, 19, 26, 40, 41, 42, 43] .

Для моделирования влияния температурного нагрева при теплопередачи от смесительных элементов в сыпучую перемешиваемую среду использовались методы планирования эксперимента [1].

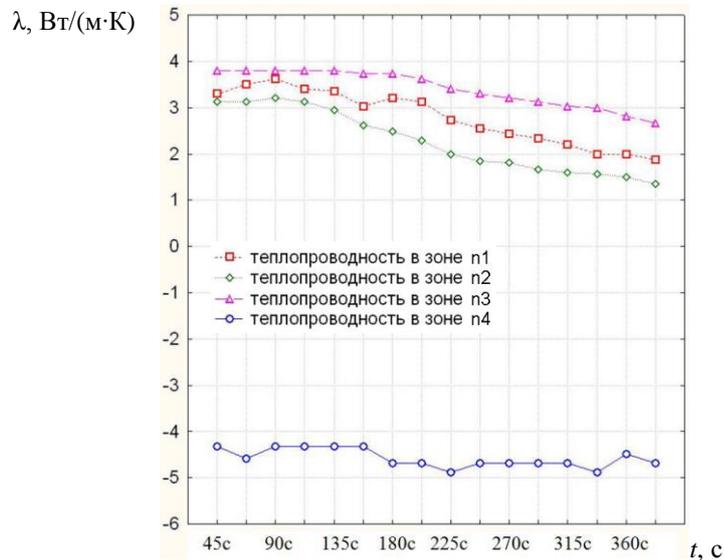


Рис 4.5 – Зависимость теплопроводности λ , Вт/(м·К) от продолжительности смешивания t , с

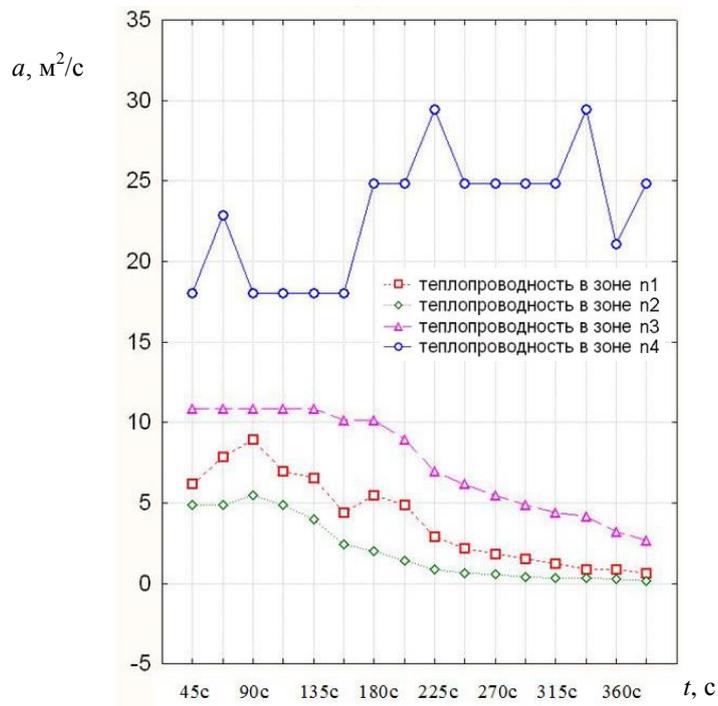


Рис 4.6 – Зависимость температуропроводности a , м²/с от продолжительности смешивания t , с

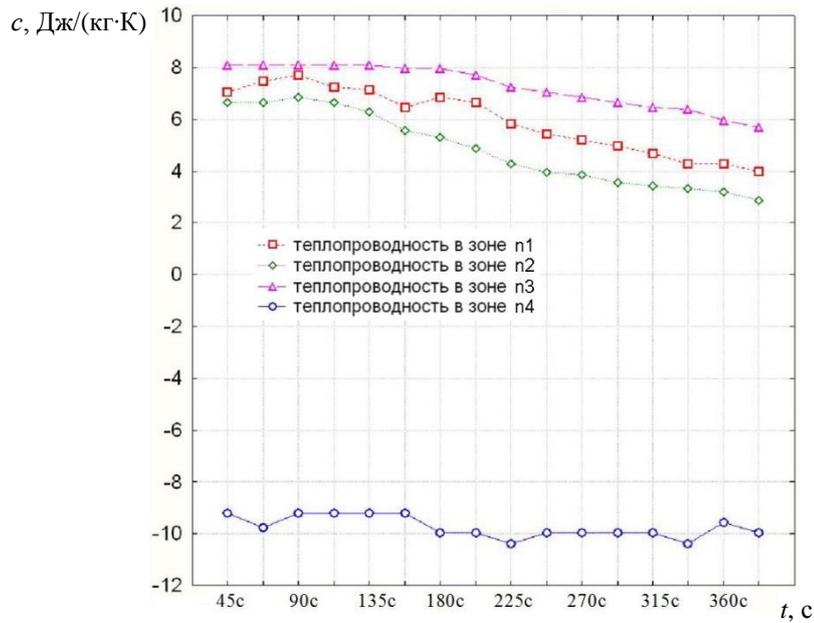


Рис 4.7 – Зависимость теплоемкости c , Дж/(кг·К) от продолжительности перемешивания t , с

Для построения квадратичной модели зависимости показателя Y от исследуемых факторов применялся ортогональный центральный композиционный план второго порядка с ядром 2^4 [133].

В таблице 4.1 приведены уровни факторов варьирования. В качестве варьируемых количественных факторов с учетом факторного анализа выбраны следующие параметры: температура $\Theta = 296 - 309$, К; время смешивания $t = 90 - 360$, с; влажность $\omega = 4,3 - 6,6$, %; теплопроводность $\lambda = 4,1 - 1,26$, Вт/(м·К).

Таблица 4.1 – Условия проведения эксперимента

Факторы	Кодовое обозначение	Уровни факторов					
		-1,414	-1	0	1	1,414	Δ
Температура, К	X_1	5	10	30	50	54	29,8
Время воздействия, С	X_2	90	180	270	360	384	256,8
Влажность, %	X_3	5	8	15	25	30	16,6
Теплопроводность, Вт/(м·К)	X_4	4,1	3,6	2,29	1,35	1,26	2,52

Для того чтобы достоверно оценить зоны повышенного нагрева при динамическом воздействии перфорированных лопаток на перемешиваемую среду, то есть определить совместное влияние физико-механических свойств сыпучего материала, геометрических, технологических и энергетических параметров на работу предлагаемого смесителя вибрационного типа, был применен соответствующий показатель – коэффициент интенсивности нагрева, который можно представить, исходя из следующего выражения:

$$Y = \frac{c\gamma V\Theta}{t}, \quad (4.1)$$

где c – теплоемкость, Дж/(кг·К);

t – продолжительность вибрационного смешивания до динамического равновесия, с;

γ – плотность сыпучего материала, кг/м³;

V – объем, м³;

Θ – температура материала, К.

Для обработки экспериментальных данных использованы методы регрессионного анализа, определяющие функциональную зависимость между переменными факторами $\Theta(X_1)$, $t(X_2)$, $\omega(X_3)$, $\lambda(X_4)$ и откликами Y . Значения факторов в эксперименте представлены в приложении 3. Проведенная статистическая обработка с применением пакета Statistica 6.0 позволила получить регрессионное уравнение, объединяющее коэффициент интенсивности нагрева процесса смешивания с температурой, К; временем смешивания, с; влажностью, % и теплопроводностью, Вт/(м·К):

$$Y = -202,403 + 0,609X_1 - 0,048X_2 + 4,874X_3 + 2,22X_4. \quad (4.2)$$

На основе проведенного анализа, полученного уравнения регрессии (4.2) и построенных поверхностей откликов на (Приложение 4) для сыпучей

смеси следует, что на коэффициент интенсивности нагрева Y оказывает наибольшее влияние влажность и теплопроводность, а температура имеет отрицательную корреляцию.

Для проверки значимости регрессии используется разложение дисперсии (разброса) результативного признака на факторную и остаточную дисперсии, т.е. объясненную (за счет независимых факторов) часть дисперсии и часть, оставшуюся необъясненной в рамках данной модели.

Мерой значимости регрессии служит значение т.н. F -критерия – отношения факторной дисперсии к остаточной.

Чем лучше регрессионная модель, тем выше доля факторной и ниже доля остаточной дисперсии.

Для каждого значения F можно вычислить соответствующую вероятность. Если значение этой вероятности меньше принятого уровня значимости p или вероятности ошибки (в программе Statistica это 5% или 0,05), гипотеза об отсутствии линейной связи между результативным и факторными признаками отклоняется и регрессия признается значимой [133].

Значение коэффициента множественной корреляции R равно 0,86 (см. Приложение 5). Соответствующий коэффициент детерминации R_2 равен 0,75, т.е. учтенные в модели факторные признаки объясняют результативный признак на 75%. Если вероятность p меньше выбранного уровня значимости (по умолчанию 5% или 0,05), соответствующий коэффициент регрессии является статистически значимым.

Значение F -критерия равно 13,96, а соответствующий ему уровень значимости p практически равен нулю $p = 0,000018$, т.е. заведомо меньше 0,05. Таким образом, данная модель статистически значима.

Модель адекватна истинной зависимости и с достоверностью 0,95 она может использоваться для анализа и прогноза зависимости теплопроводности от температуры, времени воздействия, влажности материала [108].

Выводы по главе

Следует отметить, что конструктивные особенности вибрационного смесителя принципиально отличаются от традиционных смесителей вибрационного типа непрерывного и периодического действия по многим функциональным параметрам рабочих органов – перфорированных лопаток, которые выполняют локальные, целенаправленные воздействия на частицы исходного материала, а это способствует быстрому вибрационному формированию однородности смеси. Однако с использованием разработанной методики возможно установить экспериментальные зависимости и действительные значения температурного нагрева смесительных элементов совместно со средствами фиксирования температурного поля поверхности электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы на основе следующего.

1. Разработанный способ позволяет с достаточной точностью определить температурный нагрев поверхности электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы на основе совместного контактного и бесконтактного измерения температуры, а также рассчитать коэффициент интенсивного нагрева, с учетом теоретической и экспериментальной составляющей для теплового поля рабочей поверхности подвижных смесительных элементов в реальных условиях при эксплуатации.

2. Установлено, что конструктивное исполнение для неподвижной фиксации термопреобразователей позволяет в поперечных сечениях электромагнитного вибровозбудителя цилиндрической формы регистрировать температурный нагрев электромагнитных вибровозбудителей непрерывно изменяющийся во времени по заданной траектории движения рабочих штоков горизонтальных и вертикальных гидроцилиндров.

3. Максимальная средняя (и начальная) температура нагрева электромагнитных вибровозбудителей перфорированных лопаток значительно выше, чем температура, зафиксированная центральной термопарой, расположенной по оси цилиндрической формы смесителя, также из результатов исследова-

ния следует, что в среднем сечении электромагнитных вибровозбудителей цилиндрической формы с учетом теплоотвода в окружающую среду, в емкости смесителя, в отдельных периодах и за весь цикл вибрационного формирования однородности смеси температура незначительно выше, чем температура сыпучего материала, т.е. в рассматриваемой конструкции периодического действия вибрационного типа можно увеличить мощность вибровозбудителей, что приведет к уменьшению времени перемешивания сыпучего материала и уменьшению энергозатрат.

Глава 5 Перспективы применения смесительного оборудования вибрационного типа в условиях инновационного перерабатывающего производства

5.1 Техничко-экономические показатели на этапах внедрения системы контроля температуры в смесителях вибрационного типа

Одной из первостепенных задач в представленной главе является определение критерия оценки экономической эффективности на каждом этапе рассматриваемого процесса приготовления комбикорма, премикса и БВМД с учетом внедрения инновационных подходов, основанных на принципах использования дистанционных и контактных электротехнических средств контроля, с различными функциональными схемами и элементной базой, выпускаемыми отечественными и зарубежными производителями [103, 104].

Для интенсивного и высокорентабельного комбикормового производства в Оренбургском государственном аграрном университете разработана модульная система под руководством профессора Соловьева С.А., входящая в технологическую линию «дозирование – смешивание», которая комплектуется объемным дозирующим устройством с подвижным конусным побудителем и конструкцией смесителя вибрационного типа периодического действия [82].

Следует отметить, что из-за повышенных требований в области промышленной безопасности, в большинстве зависящего от условий эксплуатации смесительного оборудования вибрационного типа необходимо в технологической линии «дозирование – смешивание» использовать предлагаемую систему автоматизированного контроля температуры с надлежащей компоновкой, обеспечивающей комплексную регистрацию теплофизических характеристик сыпучего материала на основе адаптированного программного обеспечения, исходя из следующих функций:

– установление данных о техническом состоянии объекта управления – электромагнитные вибровозбудители цилиндрической формы перфорированных лопаток;

– анализ полученных результатов и оперативное воздействие при внезапных изменениях, возникающих в системе управления рабочим контуром подвижных смесительных элементов;

– повышение эффективности работы оператора ПЭВМ за счет наглядного представления полученных данных с ВКУ – видеоконтрольное устройство тепловизора на экране монитора, с сокращением работы оператора, рецепта комбикорма, премикса и БВМД.

Таким образом, на подготовительном этапе следует определить величину затрат, исходя из общей калькуляции по известной методике, включающей 10 % транспортных расходов, при построении автоматизированной системы контроля температуры с программно-алгоритмическим обеспечением, позволяющим устанавливать динамический нагрев подвижных смесительных элементов при вибрационном формировании однородности смеси (приводится в табл. 5.1) [138].

Таблица 5.1. Стоимость приборного оснащения

Наименование товара	Ед. измерения	Кол-во	Цена за единицу (руб.)	Суммарные затраты (руб.)
1	2	3	4	5
Влагомер Фауна-М	шт.	1	8100	8100
Тепловизор Testo 882	шт.	1	320000	320000
Нетбук Samsung	шт.	1	14000	14000
Штатив Wako KH-990	шт.	1	3156	3156
Прибор УКТ38-Щ4	шт.	1	4956	4956

Продолжение табл. 5.1

1	2	3	4	5
Преобразователь интерфейса АС-4	шт.	1	1829	1829
Преобразователь интерфейса АС2-М	шт.	1	1829	1829
Преобразователь термоэлектрический ДТПК014-00.20/2	шт.	3	548	1644
Преобразователь термоэлектрический ТХК 9206	шт.	1	4240	4240
Преобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный ДН-3-М1ТУ25-7705.0019-88	шт.	1	9752	9752
Преобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный ДН-4-М1ТУ25-7705.0020-88	шт.	1	9752	9752
Гильза защитная для преобразователей ГЗ.16.1.1.100	шт.	1	693	693
Реле времени ВЛ-29У3	шт.	1	4571	4571
Прибор ВШВ-003-М2	шт.	1	35549	35549
Тахометр ТЭ30-5Р	шт.	1	4990	4990
Весы ВЛТК-500Мг	шт.	1	2000	2000
Пробоотборник для отбора сыпучего материала заданной глубины	шт.	1	2300	2300
Анализатор ситовой вибрационный А-20	шт.	1	72912	72912
Колба коническая с делениями КН-3-50-22	шт.	4	54	216
Итого				502489

С учётом транспортных расходов:

$$502489 + 0,1 \cdot 502489 = 552737,9 \text{ руб.} \quad (5.1)$$

В результате, для конкретной технологической линии комбикормового предприятия дневная заработная плата определяется делением размера оклада на среднее количество рабочих дней в месяце, равное 25, получена трудоёмкость в человеко-днях каждого этапа для группы специалистов, отвечающих за этот этап разработки [49].

Затем на каждом этапе внедрения системы автоматизированного контроля температуры, исходя из количества дней, которые следует потратить на каждый из трех этапов разработки при выполнении определенного вида работ: выбор комплекса технических средств и объема, монтаж электрооборудования в соответствии с проектом, пуско-наладочные работы, обследование, комплексное выполнение работ со сдачей системы дистанционного диагностирования, необходимо установить затраты по заработной плате как произведение трудоемкости на сумму дневной заработной платы для каждого работника на все время разработки.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 5.2. с учетом категорий, графиков выхода на работу исполнителей, должностного оклада, премий, входящих в фонд заработной платы [52].

Затраты определяются расчетом по отдельным статьям расходов с дальнейшим их суммированием по форме, то есть затраты по отдельным статьям расходов разработки проектной документации с выполнением требований.

Заработная плата при монтаже контрольно-измерительного оборудования и обслуживании, ремонте КИП, автоматики, а также тепловизионной съемки с программой обработки полученных данных начисляется следующим образом.

Таблица 5.2 – Расчет основной заработной платы

Наименование этапов работ	Исполнитель	Оклад (руб.)	Дневная зар. плата (руб.)	Трудоемкость (в человеко-днях)	Затраты по зарплате (руб.)
1. Этап при монтаже контрольно-измерительного оборудования	Инженер по наладке и испытаниям (I–III категории)	32500	1300	5	6500
2. Обслуживание, ремонт КИП и автоматики современного комбикормового производства	Слесарь по КИПиА (4–5 разряд) График 2/2/4	21750	1359	2	2718
3. Тепловизионная съемка, термограммы и фотографии, программы для обработки данных	Оператор для тепловизионного обследования График почасовой	2500	2500	1	2500
ИТОГО:					11718

На статью «Расчет дополнительной заработной платы» относятся выплаты, предусмотренные законодательством о труде за неотработанное по уважительным причинам время, оплата очередных и дополнительных отпусков и т.п. (принимается в размере 20 % от суммы основной заработной платы):

$$11718 \cdot 0,2 = 2343,6 \text{ руб.} \quad (5.1)$$

Затраты по статье «Расчёт отчислений на социальные нужды» определяются в процентном отношении от суммы основной и дополнительной заработной платы (35,8%):

$$(11718 + 2343,6) \cdot 0,358 = 5034,0528 \text{ руб.} \quad (5.2)$$

К статье «Расчёт накладных расходов» относят расходы по управлению научно-исследовательской организацией, выполняющей данную разработку, а также расходы по содержанию и ремонту зданий, сооружений, оборудования, коммунальные услуги и т. п.

Накладные расходы принимаются в размере 25% от суммы основной заработной платы:

$$5034,0528 \cdot 0,25 = 1258,5132 \text{ руб.} \quad (5.3)$$

Калькуляция стоимости разработки приведена в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Калькуляция стоимости разработки

№п/п	Наименование статьи расхода	Затраты (в руб.)
1.	Материалы, покупные изделия, полуфабрикаты	552737.9
2.	Основная заработная плата	11718
3.	Дополнительная заработная плата	2343.6
4.	Отчисления на социальные нужды	5034.0528
5.	Накладные расходы	1258.5132
6.	Полная себестоимость	573092.066

5.2 Экономическая эффективность от внедрения системы контроля температуры на этапах конструирования и эксплуатации в комбикормовом производстве

В современном птицеводстве для приготовления комбикорма, премикса и БВМД применяются, главным образом, различные конструкции смесителей непрерывного действия. Одновременно серийно выпускаются и традиционные смесители порционного смешивания следующих марок: УЗ-ДСП-0,02; УЗ-ДСП-0,05; УЗ-ДСП - 0,1; УЗ-ДСП -0,2 (г. Воронеж) [103, 104].

Так, в Оренбургском государственном аграрном университете под руководством профессора Соловьева С.А. разработан и изготовлен смеситель периодического действия вибрационного типа, исходя из конструкции модернизированного смесителя периодического действия вибрационного типа, которую следует внедрить в технологическую линию комбикормового производства при изготовлении премикса, БВМД, а также в другие смежные отрасли перерабатывающей промышленности [81].

Технические решения для вибрационного смесителя при расчете экономической эффективности составляют 17 % от масштаба внедрения предлагаемой системы управления рабочего органа – перфорированной лопатки, в установленных диапазонах температурного нагрева электромагнитных вибровозбудителей цилиндрической формы, с учетом комплексного определения теплофизических характеристик сыпучего материала.

Для определения эксплуатационных затрат использовались не только известные методики, но учитывалась рыночная стоимость смесительного оборудования (в ценах 2014 г.), при этом рассматривались и современные нормативы по технологическому проектированию предприятий для производства комбикормов (РД-АПК 1.10.17.01-15) [76].

Следует отметить, что при расчете тарифная ставка обслуживающего персонала принимается исходя из минимальной часовой тарифной ставки рабочего первого разряда, которая составляет с изменениями на 1 января 2015 г. 32,670 руб, стоимость электроэнергии 2,69 руб за 1 кВт/ч.

Таким образом, рассматриваемая операция является наиболее энергоемкой, вместе с тем существующие конструкции смесителей в базовом комбикормовом производстве малопродуктивны и не обеспечивают требуемого качества смеси. Поэтому с целью выбора наиболее рационального варианта конструкции смесителя и его эксплуатационных характеристик для комбикормового производства необходимо определить экономическую эффективность от внедрения смесителя периодического действия вибрационного

типа с точки зрения соотношения производительности и точности смешивания.

При этом учитывается и отсутствие технических данных по ряду конструктивных особенностей смесителей периодического действия вибрационного типа в современной практике проектирования и использования аналогичных схем смесителей [140, 141].

Оценка экономической эффективности проводилась на основе сравнения показателей проектируемого варианта и исходного, то есть подсчитывались удельные эксплуатационные затраты в расчете на 1 т корма, приходящиеся на каждый из смесителей [118, 119]. Эксплуатационные затраты S включают в себя оплату труда с отчислениями на социальные нужды, амортизационные отчисления, затраты на ремонт и техническое обслуживание, стоимость израсходованной электроэнергии:

$$S = Q_T + A + R + \Gamma \text{ руб.} \quad (5.4)$$

$$S_1 = 43,47 + 14 + 10 + 14,5 = 82 \text{ руб.} \quad (5.5)$$

$$S_2 = 26,3 + 9 + 6,4 + 7,5 = 49 \text{ руб.} \quad (5.6)$$

По следующей формуле определим оплату труда:

$$Q_T = \frac{\sum P_j L_j \epsilon}{W} \text{ руб.,} \quad (5.7)$$

где P_j – часовая тарифная ставка j -го разряда (оплата производится по 5-му разряду $P_5 = 32,67$ руб.);

L_j – количество работников, оплачиваемых по j -му разряду ($L_5 = 3$ чел.: оператор ПВЭМ – 1, рабочий – 1, слесарь электрик – 1);

ϵ – коэффициент начислений на зарплату ($\epsilon = 2$);

W – производительность т/ч.

Производительность W_1 смесителя УЗ-ДСП-0,4 определяется по формуле:

$$W_1 = k \cdot V_{\sigma} \cdot \rho \cdot \varphi_n / t_u, \quad (5.8)$$

где k – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств смеси ($k = 1 \div 4$);

V_{σ} – вместимость смесителя ($V_{\sigma} = 1,1 \text{ м}^3$);

ρ – плотность смеси премикса ($\rho = 750 \text{ кг/м}^3$);

φ_n – коэффициент заполнения ($\varphi_n = 0,7 - 0,8$);

t_u – время полного цикла приготовления смеси премикса ($t_u = 180 \text{ с}$).

Производительность w_2 предлагаемого смесителя периодического действия вибрационного типа можно рассчитать по следующей формуле:

$$W_2 = k \cdot \varphi_n \cdot \rho \cdot V / t_u, \quad (5.9)$$

где k – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств смеси ($k = 1 \div 4$);

φ_n – коэффициент наполнения емкости ($\varphi_n = 0,5 \div 0,8$);

ρ – плотность корма премикса ($\rho = 750 \text{ кг/м}^3$);

V_{σ} – вместимость смесителя ($V_{\sigma} = 2,3 \text{ м}^3$);

t_u – время полного цикла приготовления смеси ($t_u = 180 \text{ с}$).

После проведенных экспериментов установлено, что при внедрении предлагаемой конструкции смесителя периодического действия вибрационного типа возможно получение более качественной смеси из компонентов премикса за три – шесть минут его работы:

$$W_1 = 1 \cdot 0,7 \cdot 750 \cdot 0,8 / 180 = 2,3 \text{ т/ч}, \quad (5.10)$$

$$W_2 = 1 \cdot 0,7 \cdot 750 \cdot 1,1 / 180 = 3,8 \text{ т/ч}, \quad (5.11)$$

$$Q_{T1} = \frac{(32,67 + \frac{32,67 \cdot 2}{100}) \cdot 3}{2,3} = 43,47 \text{ руб./т.}, \quad (5.12)$$

$$Q_{T2} = \frac{(32,67 + \frac{32,67 \cdot 2}{100}) \cdot 3}{3,8} = 26,3 \text{ руб./т.} \quad (5.13)$$

Определим амортизационные отчисления по формуле:

$$A = \frac{B \cdot a}{100 \cdot t_{\phi} \cdot W}, \quad (5.14)$$

где a – норма амортизации ($a = 14\%$); t_{ϕ} – фактическая годовая загрузка машины ($t_{\phi} = 1700$ ч).

$$A_1 = \frac{391400 \cdot 14}{100 \cdot 1700 \cdot 2,3} = 14 \text{ руб./т.}, \quad (5.15)$$

$$A_2 = \frac{415000 \cdot 14}{100 \cdot 1700 \cdot 3,8} = 9 \text{ руб./т.} \quad (5.16)$$

Определим затраты на ремонт и техническое обслуживание по формуле:

$$R = \frac{B \cdot r}{100 \cdot t_{\phi} \cdot W}, \quad (5.17)$$

где r – норма отчислений на ремонт и техническое обслуживание ($r = 10\%$).

$$R_1 = \frac{391400 \cdot 10}{100 \cdot 1700 \cdot 2,3} = 10 \text{ руб./т.}, \quad (5.18)$$

$$R_2 = \frac{415000 \cdot 10}{100 \cdot 1700 \cdot 3,8} = 6,4 \text{ руб./т.} \quad (5.19)$$

Затраты на электроэнергию определяем по формуле:

$$G = P_{уст} \cdot k_c \cdot T_p \cdot W \cdot k_3, \quad (5.20)$$

$$G_1 = 6,1 \cdot 0,960,4 \cdot 2,69 \cdot 2,3 = 14,5 \text{ руб./т}, \quad (5.21)$$

$$G_2 = 4,05 \cdot 0,90,2 \cdot 2,69 \cdot 3,8 = 7,5 \text{ руб./т}. \quad (5.22)$$

где $P_{уст}$ – номинальная мощность электродвигателя ($P_{уст} = 6,1$ кВт);

k_c – коэффициент спроса, учитывающий три коэффициента в среднем ($k_3 = 1,1$; $k_n = 0,87$; $\eta_3 = 0,9$);

k_3 – коэффициент, который учитывает стоимость электроэнергии для промышленного производства (1кВт=2,69руб);

T_p – время смешивания 1т корма, ч;

k_3 – средний коэффициент загрузки за время T_p , отн.ед;

k_n – коэффициент каталожной неувязки, равный отношению потребной мощности рабочей машины к номинальной мощности электродвигателя, отн.ед.;

η_3 – КПД электродвигателя (по каталогу);

$P_{уст}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт,
($P_{уст} = 4,05$ кВт);

k_c – коэффициент спроса, учитывающий три коэффициента в среднем ($k_3 = 0,87$; $k_n = 0,9$; $\eta_3 = 0,94$);

T_p – время смешивания 1т корма, ч;

k_3 – средний коэффициент загрузки за время T_p , отн.ед;

k_n – коэффициент каталожной неувязки, равный отношению потребной мощности рабочей машины к номинальной мощности электродвигателя отн.ед;

η_3 – КПД электродвигателя (по каталогу);

$T_{p1} = 0,4$ ч;

$T_{p2} = 0,2$ ч.

Подсчитаем изменения в стоимости получаемой продукции в расчете на 1т смеси премикса:

$$\pm D_{y\partial} = C_2 P_2 - C_1 P_1, \quad (5.23)$$

где C_2 и C_1 – цена единицы продукции в проектируемом и исходном варианте;

P_2 и P_1 – выход продукции в натуральном выражении в расчете на единицу объема в тех же вариантах.

$$D_{y\partial} = 350 \cdot \frac{0,002 \cdot 250000}{277} - 350 \cdot \frac{0,0019 \cdot 250000}{277} = 31,6 \text{ руб./т}, \quad (5.24)$$

$$P = \frac{G \cdot n}{Q}, \quad (5.25)$$

где G – вес 1 головы, кг, ($G = 1,9$ кг);

n – годовой оборот голов (250000 гол);

Q – количество потребленного премикса в год (277т).

Определим удельные капитальные вложения по формуле:

$$K_{y\partial} = \frac{B}{t_{\phi} \cdot W}, \quad (5.26)$$

$$K_{y\partial 1} = \frac{391400}{1700 \cdot 2,3} = 100,1 \text{ руб./т}, \quad (5.27)$$

$$K_{y\partial 2} = \frac{415000}{1700 \cdot 3,8} = 64,3 \text{ руб./т}. \quad (5.28)$$

По проектируемому и исходному варианту подсчитаем удельные приведенные затраты:

$$I = S + E_n \cdot K_{y\partial} \text{ руб./т}, \quad (5.29)$$

где E_n – нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений ($E_n = 0,15$).

$$I_1 = 82 + 0,15 \cdot 100,1 = 97 \text{ руб./т.} \quad (5.30)$$

$$I_2 = 49 + 0,15 \cdot 64,3 = 59 \text{ руб./т.} \quad (5.31)$$

В связи с имеющимися изменениями в количестве получаемой продукции:

$$I_1 = S_1 + E_n \cdot K_{y\partial 1} \pm D_{y\partial}, \quad (5.32)$$

$$I_1 = 82 + 0,15 \cdot 100,1 + 31,6 = 128,6 \text{ руб./т.} \quad (5.33)$$

Рассчитаем годовую экономию эксплуатационных затрат по формуле:

$$\mathcal{E}_T = (S_1 - S_2) \cdot Q, \quad (5.34)$$

$$\mathcal{E}_T = (82 - 49) \cdot 277 = 9125 \text{ руб.}, \quad (5.35)$$

где Q – количество потребленного премикса в год (277т);

S_1, S_2 – удельные эксплуатационные затраты в расчете на 1т смеси.

Определим срок окупаемости дополнительных капитальных вложений по формуле:

$$T = \frac{\Delta k}{\mathcal{E}_T}, \quad (5.36)$$

$$T = \frac{415000 - 391400}{9125} = 2,6 \approx 3 \text{ г.}, \quad (5.37)$$

где Δk – коэффициент, учитывающий разницу между показателями капитальных вложений проектного и исходного варианта, а также с учетом дополнительных капитальных вложений на систему контроля температуры, руб;

\mathcal{E}_T – годовая экономия эксплуатационных затрат, руб.

Ожидаемый годовой экономический эффект подсчитаем по следующей формуле:

$$Г_{э} = (I_1 - I_2) \cdot W_{ф2} \text{ руб.}, \quad (5.38)$$

$$Г_{э} = (128,6 - 59) \cdot 3,8 \cdot 1700 = 449616 \text{ руб.}, \quad (5.39)$$

где $W_{ф2}$ – фактический годовой объем произведенной продукции на проектном варианте конструкции смесителя периодического действия вибрационного типа, т/год.

В результате получены сравнительные показатели экономической эффективности от внедрения предлагаемого смесителя вибрационного типа и рассматриваемого смесителя периодического действия типа УЗ-ДСП-0,4 (табл. 5.4).

Таблица 5.4 – Результаты сравнительной оценки и экономической эффективности

Показатели	Ед. изм.	Исходный вариант	Проектный вариант
1. Капитальные вложения	руб.	391400	415000
2. Часовая производительность	т/ч	2,3	3,8
3. Эксплуатационные затраты на 1т корма	руб.	82	49
4. Годовая экономия эксплуатационных затрат	руб.	—	9125
5. Удельные приведенные затраты	руб./т	128,6	59
6. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений	лет	—	3
7. Годовой экономический эффект	руб.	—	449616

Таким образом, ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения конструкции смесителя периодического действия вибрационного типа в технологическую линию приготовления премиксов на птицефабрике ОАО «Спутник» Оренбургской области составит 449616 руб, срок окупаемости дополнительных капитальных вложений составит 3 года, кредит в банках РФ для предприятий не более 3 лет.

Выводы по главе

В большинстве технологических линий на предприятиях комбикормовой, пищевой промышленности задачи управления и контроля главным образом сводятся к бесперебойной работе исполнительных механизмов в определенной последовательности, т.е. к включению и отключению привода смесительного оборудования и т.д. При этом основные технические недостатки в конструкциях смесителей вибрационного типа приводят к потере устойчивости в работе всей технологической линии «дозирование – смешивание», возникающей из-за нерационального конструктивного исполнения смесителя, так и свойств сыпучего материала.

На основании полученных результатов исследований можно сделать следующие выводы.

1. При изготовлении премикса, различного по физико-механическому составу, рекомендуется применять вибрационный смеситель периодического действия, который наиболее эффективен по удельным затратам.

2. Для выполнения технологического регламента по продолжительности вибрационного формирования однородности смеси и обеспечения эффективности использования смесительного оборудования вибрационного типа экономически целесообразно использовать метод контактного и бесконтактного диагностирования динамических процессов, входящих в вибрационно-электромеханическую систему, составляющую основную часть техно-

логического оборудования перерабатывающего производства.

3. Оценка экономической эффективности проводилась на основе анализа экспериментальных данных исследования, которая показала значительное снижение эксплуатационных затрат от внедрения современного смесителя вибрационного типа в комбикормовое производство, в отличие от традиционной конструкции смесителя периодического действия типа УЗ-ДСП, применяемой в технологической линии приготовления премиксов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На основе анализа существующих способов и устройств тепловых измерений представлено принципиально новое техническое решение для контактного определения температурного нагрева подвижных смесительных элементов с учетом теплофизических характеристик сыпучего материала и полученных термограмм для конструкции смесителя периодического действия вибрационного действия.

2. Разработана теоретическая модель способа контактного определения теплофизических характеристик, который относится к методам регулярного режима второго рода, позволяющий определять теплофизические характеристики материала как функции температуры с учетом нелинейного уравнения теплопроводности.

3. Получены аналитические зависимости для вычисления действительных значений теплофизических характеристик сыпучих материалов, учитывающие изменение температуры и влажности, при этом обеспечивается высокая точность сходимости результатов вычислительных экспериментов по аналитическим моделям с экспериментальными данными.

4. При проведении экспериментальных исследований получено регрессионное уравнение, в котором в качестве критерия оптимизации применен коэффициент интенсивности нагрева γ , определяющий функциональную зависимость между переменными факторами (температура, время вибрационного воздействия, влажность, теплопроводность) в установленном пределе вибрационного формирования однородности смеси: температура $\Theta = 23 - 36$ °С; время воздействия $t = 90 - 360$ с; влажность $\omega = 4,3 - 6,6$ %; теплопроводность $\lambda = 4,1 - 1,26$ Вт/м·К.

5. Установлены оптимальные значения конструктивных, технологических параметров и режимов работы смесителя при минимальной энергоемкости процесса вибрационного смешивания при изменении температуры смесительных элементов в пределах от 23°С до 36°С теплопроводность изменя-

лась от 4,1 Вт/мК до 1,26 Вт/мК, что свидетельствует о незначительной теплоотдаче с рабочих элементов.

6. Применение конструкции смесителя периодического действия вибрационного типа в комбикормовом производстве позволяет получить годовой экономический эффект в размере 449616 руб.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
2. Ахмадиев Ф.Г. Математическое моделирование кинетики технологических процессов переработки дисперсных сред / Ф.Г. Ахмадиев // Известия КГАСУ. – 2011. – № 3 (17). – С. 258.
3. Ахназарова С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1985. – 205 с.
4. Байда Е.И. Сравнительный анализ моделей конвективной теплоотдачи / Е.И. Байда // Электротехника і Електромеханіка. – 2011. – №2. – С. 14 – 17.
5. Бакин И.А. Модель структуры потоков в центробежном смесителе дисперсных материалов / И.А. Бакин, А.И. Саблинский, О.С. Карнадуд // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – № 3. – С. 12 – 14.
6. Баскаков А. П. Процессы тепло - и массопереноса в кипящем слое / А.П. Баскаков, В.В. Берг, А.Ф. Рыжков. – М.: Металлургия, 1979. – 248с.
7. Берлинер М.А. Измерение влажности / М.А. Берлинер. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1973. – 400 с.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для электротехн., энергет. приборостроит. спец. вузов / Л.А. Бессонов – 8-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1984. – 559 с.
9. Бойко И.Г. Метод дистанционного диагностирования процесса смешивания дисперсных материалов в конструкции смесителей периодического действия / И.Г. Бойко, В.А. Пушко // Сб. научных трудов ГНУ ВНИИМЖ. – Том 22. – Ч. 3. – Подольск: ГНУ ВНИИМЖ Россельхозакадемии, 2011. – С. 57 – 63.
10. Бойко И.Г. Теоретическое обоснование метода дистанционного ди-

агностирования процесса смешивания дисперсных материалов в конструкции смесителей периодического действия вибрационного типа / И.Г. Бойко, В.А. Пушко // Известия ОГАУ. – 2012. – № 2. – С. 69 – 71.

11. Бойко И.Г. Особенности и перспективы применения тепловизионной диагностики смесительного оборудования вибрационного типа / И.Г. Бойко, В.А. Пушко // Вестник ВНИИМЖ. – 2012. – № 3 (7). – С. 146 – 149.

12. Бойко И.Г. Контроль и управление объемным дозированием в процессе вибрационного формирования однородности сыпучего материала / И.Г. Бойко, В.А. Пушко // Вестник ВНИИМЖ. – 2014. – № 1 (13). – С. 118 – 121.

13. Бойко И.Г. Построение автоматизированной системы контроля температуры для конструкции смесителей вибрационного типа / И.Г. Бойко, В.А. Пушко // Вестник ВНИИМЖ. – 2014. – № 4 (16). – С. 243 – 245.

14. Бойко И.Г. Построение автоматизированной системы контроля температуры для конструкции смесителей вибрационного типа / И.Г. Бойко, С.А. Соловьев, В.А. Пушко, А.В. Салтанов // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 122, Ч. 4. – С. 109 – 113.

15. Бойко И.Г. Перспективы инновационного применения тепловизионного диагностирования смесительного оборудования периодического действия традиционного и вибрационного типа / И.Г. Бойко, В.А. Пушко // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования: сборник трудов международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава «АПК России: прошлое, настоящее, будущее». – Ч. I. – СПб.: СПбГАУ, 2015. – С. 556 – 560.

16. Бородин И.Ф. Автоматизация технологических процессов / И.Ф. Бородин, Ю.А. Судник. – М.: КолосС, 2007.

17. Бохан Н.И. Средства автоматики и телемеханики / Н.И. Бохан, И.Ф. Бородин, Ю.В. Дробышев. – М.: Агропромиздат, 1992.

18. Бохан Н.И. Приборы и измерения в сельскохозяйственном производстве / Н.И. Бохан, В.А. Дайнеко, В.К. Бензарь. – М.: Горки, 1988. – 88с.

19. Братыгин А.Л. Обработка и анализ результатов тепловизионного обследования объектов энергетики / А.Л. Братыгин, Ю.В. Матвеев // Энергетик – 2006. – № 6. – С. 46.
20. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля / В.П. Вавилов. – М.: Машиностроение, 1991. – 240 с.
21. Вавилов В.П. Тепловизоры и их применения / В.П. Вавилов, А.Г. Климов – М.: Интел универсал, 2002. – 88 с.
22. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов – М.: ИД Спектр, 2009.
23. Вайсберг Л.А. Механика сыпучих сред при вибрационных воздействиях: методы описания и математического моделирования / Л.А. Вайсберг, И.В. Демидов, К.С. Иванов // Обогащение руд. – 2015. – № 4. С. 21 – 31.
24. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пос. для втузов / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2007.
25. Вибрация в технике: справочник. В 6-ти т. / ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавендела, 1981. – 509 с.
26. Виштак Т.В. Динамические режимы электромагнитного вибратора / Т.В. Виштак, И.П. Кондратенко, А.П. Ращепкин // Техн. Електродинаміка. – 2011. – №3.
27. Власов А.Б. Повышение достоверности технического диагностирования энергетического оборудования в системах энергообеспечения АПК методом тепловизионной диагностики: дис... д-ра техн. наук / А.Б. Власов. – Санкт-Петербург – Пушкин, 2005. – 336 с.
28. Волькенштейн В.С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов / В.С. Волькенштейн. – Л.: Энергия, 1971. – 143 с.
29. Виброреология / П.Ф. Овчинников. – Киев: Наук. думка, 1983. – 272 с.

30. Гинзбург А.С. Теплофизические свойства зерна, муки, крупы / А.С. Гинзбург, М.А. Громов. – М.: Колос, 1984. – 304 с.
31. Гинзбург А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справочник / А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская. – М.: Агропромиздат, 1990. – 258 с.
32. Гордов А.Н. Основы пирометрии / А.Н. Гордов. – М.: Металлургия, 1971. – 477с.
33. ГОСТ Р.8.585-2001. «ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования».
34. ГОСТ Р 51095-97 (Премиксы). Технические условия.
35. ГОСТ Р 8. 619-2006. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки.
36. ГОСТ 21.404-85. Автоматизация технологических процессов.
37. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-, массообмена / А.А. Гухман. – Изд. 2–е, переработ. и доп. – М.: Высш. школа, 1974. – 328с.
38. Денисов В.Н. Развитие теории и разработка вибрационных электромеханических систем сельскохозяйственного назначения: автореф. дис... д-ра техн. наук / В.Н. Денисов. – Москва, 2012. – 40 с.
39. Жагров А.С., Луценко В.Ю., Оселедчик Ю.С. Экспериментальное исследование датчика температуры с коммутационным преобразованием ТЕРМО – ЭДС / А.С. Жагров, В.Ю. Луценко, Ю.С. Оселедчик // Український метрологічний журнал. – 2008. – №4. С. 29 – 36.
40. Жуков Н.П. Теоретические положения метода неразрушающего теплофизического контроля / Н.П. Жуков// Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством. Пятая международная теплофизическая школа. – Тамбов, 2004. – С. 115 – 117.
41. Жуков, Н.П. Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий / Н.П. Жуков, Н.Ф. Майникова. – М.: Издательство «Машиностроение – 1», 2004. – 288 с.

42. Завидей В.И. Оптические измерения по собственному излучению при тепловом контроле элементов энергоустановок / В.И. Завидей, С.В. Милованов, М.А. Вихров, В.А. Головичер // Энергетик. – 2008. – № 8. – С. 47.

43. Завидей В.И. Оптические методы измерения при контроле элементов систем охлаждения турбогенераторов / В.И. Завидей, С.В. Милованов, М.А. Вихров, В.А. Головичер // Энергетик. – 2008. – № 5. – С. 45.

44. Евсеенков С.В. Основы расчета процесса смешивания компонентов сыпучих кормов: автореф. дис... д-ра техн. наук / С.В. Евсеенков. – Челябинск, 1993. – 41 с.

45. Иванец В.Н. Разработка и исследование сеточного дозатора сыпучих материалов / В.Н. Иванец, А.А. Крохалев, А.С., Морозов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – № 11. – С. 75 – 77.

46. Иванец В.Н. Интенсификация процессов гомогенизации и диспергирования при получении сухих, увлажненных и жидких комбинированных продуктов / В.Н. Иванец, И.А. Бакин, Г.Е. Иванец // ISSN 2074-9414. Техника и технология пищевых производств. – 2012. – № 3. – С.1 – 12.

47. Иванова А.П. Научно-технические аспекты повышения эффективности работы вибросмесителей: автореф. дис... д-ра техн. наук / А.П. Иванова. – Оренбург, 2005. – 38 с.

48. Иванов Г.М. Теплотехнические измерения и приборы / Г.М. Иванов, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 232 с.

49. Ивасенко А. Г. Управление проектами: учебное пособие / А. Г. Ивасенко, Я. И. Никонова, М. В. Каркавин. – Ростов н/Д. : Феникс, 2009. – 330 с.

50. Измерительные приборы в промышленности: каталог-справочник. – Санкт-Петербург: Издательство «Крисмас+», 2000. – № 7.

51. Измерение электрических и неэлектрических величин: учеб. пособие для вузов / Н.Н. Евтихийев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скугоров / под общ. ред. Н.Н. Евтихьева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

52. Инновационный менеджмент: учебное пособие / ред. Л. Н. Оголева. – М. : ИНФРА- М, 2008. – 238 с.
53. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу. Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
54. Карташов Л.П. Системный синтез технологических объектов АПК / Л.П. Карташов, В.Ю. Полищук. – Екатеринбург: УрОРАН, 1998. – 185с.
55. Карташов Л.П. Смешивание в кормопроизводстве / Л.П. Карташов, А.П. Иванова, Л.В. Межуева, В.В. Гунько. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2007. – 202 с.
56. Каталымов А.В. Дозирование сыпучих и вязких материалов / А.В. Каталымов, В.А. Любартович. – Л.: Химия, 1990.
57. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Перов В.Л. Математические основы автоматизированного проектирования химических производств / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, В.Л. Перов. – М.: Химия, 1979. – 320 с.
58. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим / Г.М. Кондратьев. – М.: Гостехиздат, 1954. – 408 с.
59. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения / Г.М. Кондратьев. – М.- Л.: Машгиз, 1956. – 253 с.
60. Контрольно-измерительные приборы и средства автоматизации: каталог продукции компании ОВЕН. – 2014.
61. Короткий И.А. Измерительный комплекс для регистрации температурных изменений в пищевых продуктах и материалах / И.А. Короткий, М.И. Ибрагимов, В.П. Дороганов, Е.А. Николаец // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2011. – № 1. – С. 19 – 21.
62. Коротков П.А. Динамические контактные измерения тепловых величин / П.А. Коротков, Г.Е. Лондон. – Л.: Машиностроение, 1974. – 222 с.
63. Котов Р.А. Обоснование параметров вибрационного смесителя сыпучих кормов с гибким рабочим органом: дис... канд. техн. наук / Р.А. Котов. – Барнаул, 2015. – 131 с.
64. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники /

Л.З. Криксунов. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.

65. Криксунов Л.З. Тепловизоры: справочник / Л.З. Криксунов, Г.А. Падалко. – К.: Техніка, 1987. – 166 с.

66. Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 414 с.

67. Либерман З.М. Сб. трудов ВИАСМ. Вып. 1. – М.: Стройиздат, 1967. – С. 159.

68. Линенко А.В. Линейные асинхронные электроприводы сложного колебательного движения для рабочих органов технологических машин АПК: автореф. дис... д-ра техн. наук / А.В. Линенко. – Уфа, 2014. – 36 с.

69. Линивег Ф. Измерения в технике: справочник / Ф. Линивег. – М.: Изд-во Металлургия, 1980. – 543 с.

70. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

71. Лыков А.В. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.

72. Майникова Н.Ф. Методика теплофизического контроля полимерных материалов / Н.Ф. Майникова, А.С. Чех, С.С. Никулин // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством. Пятая международная теплофизическая школа. – Тамбов, 2004. – С. 140 – 142.

73. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров – М.: Машиностроение, 1973. – 215 с.

74. Межуева Л.В. Биотехнологические аспекты производства влажных смесей: учебное пособие / Л.В. Межуева, А.П. Иванова, В.В. Гунько. – М.: Издательство ЛКИ, 2007. – 152 с.

75. Межуева Л.В. Механико-технологическое обоснование процесса смесеприготовления: автореф. дис... д-ра техн. наук / Л.В. Межуева. – Оренбург, 2008. – 18 с.

76. Методические рекомендации по технологическому проектированию предприятий по производству комбикормов РД-АПК 1.10.17.01-15 /

МСХ РФ. – М., 2015. – С. 40 – 42.

77. Нестерук Д.А. Тепловой контроль и диагностика: учебное пособие для подготовки специалистов I, II, III уровня / Д.А. Нестерук, В.П. Вавилов. – Томск, 2007. – 104 с.

78. Николаев В.Н. Вибрационный смеситель сыпучих кормов / В.Н. Николаев, Э.Н. Гайнуллин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2013. – №6. – С. 10 – 11.

79. Основы технической теплофизики / В.М. Фокин, Г.П. Бойков, Ю.В. Видин. – М.: Издательство Машиностроение -1, 2004. – 172 с.

80. Остроумов Л.А. Метод двух температурно-временных интервалов для определения теплофизических характеристик твердообразных, жидких и сыпучих пищевых продуктов и материалов / Л.А. Остроумов, И.А. Короткий, М.И. Ибрагимов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2007. – № 1. – С. 69 – 71.

81. Патент № 2256492 Российская Федерация, (51) МПК В 01 F 11/ 00 Вибрационный смеситель периодического действия / С.А. Соловьев, В.А. Пушко, А.В. Салтанов; Оренбургский государственный аграрный университет (RU). № 2003123756/15; заявл. 28.07.03,опубл.20.07.2005.Бюл. № 20.

82. Патент № 2318585 Российская Федерация, (51) МПК В 01 F 11/ 00 Вибрационный смеситель периодического действия с дозатором объемного типа / С.А. Соловьев, В.А. Пушко; Оренбургский государственный аграрный университет (RU). № 2006108151/15; заявл. 15.03.06, опубл. 10.03.2008. Бюл. № 7.

83. Патент № 2342983 Российская Федерация, (51) МПК В 01 F 3/00 Специализированный исследовательский комплекс для дистанционного диагностирования процесса смешивания дисперсных материалов в конструкции смесителей периодического действия / С.А. Соловьев, В.А. Пушко, Е.В. Яковлева, О.Г. Мясникова; Оренбургский государственный аграрный университет (RU). № 2006147340/13; заявл. 29.12.06, опубл. 10.01.2009. Бюл. № 1.

84. Патент № 2305591 Российская Федерация, (51) МПК В01/Ф 11/00 Вибрационный смеситель сыпучих материалов / Н.С. Сергеев, В.Н. Николаев, С.А. Букрин; ФГОУ ВПО «Челябинский государственный агроинженерный университет» (RU). № 2006110684/15; заявл. 03.04.2006, опубл. 10.09.2007. Бюл. № 25.

85. Патент № 2372795 Российская Федерация, (51) МПК А23L/18 Установка для термообработки пищевого материала / А.А. Андреева, А.Ф. Доронин, И.Н.Елькин, Н.В. Елькин, В.В. Кирдяшкин; ГОУ ВПО «Московский государственный университет пищевых производств» (RU). № 2008145707/13; заявл. 20.11.2008, опубл. 20.11.2009.

86. Патент № 2329492 Российская Федерация, (51) МПК G01N25/18 Способ комплексного определения теплофизических характеристик материалов и устройство для его осуществления/ И.А. Короткий, Н.А. Бахтин, М.И. Ибрагимов, Е.А. Николаева; ГОУ ВПО Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (RU). № 2006119890/28; заявл. 06.06.2006, опубл. 27.12.2007.

87. Пикулин В. П. Практический курс по уравнениям математической физики / В. П. Пикулин, С. И. Похожаев. – 2-е изд., стереотип. – М.: МЦНМО, 2004. – 208 с.

88. Пирожков Д.Н. Методика расчета вибрационного дозатора на основе гидродинамической модели сыпучего материала / Д.Н. Пирожков // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – № 11. – С. 73 – 75.

89. Пирожков Д.Н. Механико-технологические основы создания кормоприготовительных машин с вибрируемым зернистым слоем: автореф. дис... д-ра техн. наук / Д.Н. Пирожков. – Барнаул, 2012. – 34 с.

90. Плаксин Ю.М. Научно-технические основы пищевой технологии при ИК-энергоподводе: дис... д-ра техн. наук / Ю.М. Плаксин. – М.: МГУПП, – 1993.

91. Плаксин, Ю.М. Основы теории инфракрасного нагрева: монография / Ю.М. Плаксин, В.В. Филатов и др.; под общей редакцией В.В. Филатова. –

М.: МГУПП, 2007. – 168 с.

92. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме / Е.С. Платунов. – Л.: Энергия, 1973. – 143 с.

93. Платунов Е.С. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов и др. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

94. Платунов Е.С. Теплофизические измерения: учеб. пособие / Е.С. Платунов, И.В. Баранов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин; под ред. Е.С. Платунова. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2010. – 738 с.

95. Попов В.П. Решение задачи о прохождении температурного поля в основании ограниченного цилиндра / В.П. Попов, К.В. Попова // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством. Пятая международная теплофизическая школа. – Тамбов, 2004. – С. 144 – 145.

96. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В.П. Преображенский. – 3-е изд. – М.: Энергия, 1978. – 702 с.

97. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: справочник. В 2-х кн. Кн.1 / под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1978. – 448 с.

98. Пушко В.А. Разработка и оптимизация параметров вибрационного смесителя с порционной загрузкой компонентов корма: дис... канд. техн. наук / В.А. Пушко. – Оренбург, 2004. – 190 с.

99. Рабинович Ф.И. Кондуктометрический метод дисперсионного анализа / Рабинович Ф.И. – М.: Химия, 1970. – С. 176.

100. Реометрия пищевого сырья и продуктов: справочник / под ред. Ю.А. Мачихина. – М.: Агропромиздат, 1990. – 271 с.

101. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.

102. Рудобашта С.П. Продольное перемешивание твердой фазы и тепломассобмен в непрерывнодействующем аппарате с псевдосжиженным слоем / С.П. Рудобашта и др. // Промышленная теплотехника. – 2002. – Т.24. – № 1. – С. 39 – 44.

103. Руководство по технологии комбикормов, белково-витаминно-минеральных концентратов и премиксов. Т.1 / под ред. В.А. Афанасьева.– Воронеж, 2008. – 195 с.

104. Руководство по технологии комбикормов, белково-витаминно-минеральных концентратов и премиксов. Т.2 / под ред. В.А. Афанасьева. – Воронеж, 2008. – 289 с.

105. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Основы градиентной теплотометрии / С.З.Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков. – СПб.: Из-во Политехн.ун-та, 2012. – 215 с.

106. Сергеев Н.С. Обоснование основных параметров аэродинамического смесителя сыпучих кормов / Н.С. Сергеев, В.Н. Николаев, Е.В. Зязев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2014. – № 6. – С. 13 – 16.

107. Сергеев Н.С. Обоснование параметров вибрационного смесителя сыпучих кормов с активными перемешивающими элементами / Н.С. Сергеев, В.Н. Николаев, Э.Н. Гайнуллин // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – Т.28. – № 12. – С. 57 – 59.

108. Соколовская И.Е. Моделирование теплофизических свойств пористого теплоизоляционного материала при его термообработке в вихревом аппарате / И.Е. Соколовская, В.Е. Чериченко // Математическое моделирование. – 2008. – №2(19). – С. 54 – 56.

109. Справочник по радиоизмерительным приборам / под ред. В.С. Насонова. Т.1: Измерение напряжений, параметров элементов и цепей. Источники питания. – М.: «Сов. радио», 1976. – 232 с.

110. Спэрроу Э.М. Теплообмен излучением. / Э.М. Спэрроу, Р.Д. Сесс; перевод с английского С.З. Сориц и Л.М. Сорокопуда; под ред. А.Г. Блоха. – Л.: «Энергия», 1971. – 294 с.

111. Сыроватка В.И. Машинные технологии приготовления комбикормов в хозяйствах / В.И. Сыроватка. – М.: ГНУ ВНИИМЖ, 2010.

112. Таршис М.Ю. Теоретические основы и методология создания эф-

фективных аппаратов с эластичными рабочими элементами для смешивания сыпучих материалов: автореф. дис... д-ра техн. наук / М.Ю. Таршис. – Ярославль, 2009. – 33 с.

113. Тепловизор Testo 882: руководство пользователя. – ООО «Тэсто Рус», 57 с.

114. Тепловые методы технической диагностики строительных материалов и изделий: монография / В.Н. Чернышов, В.Г. Однолько, А.В. Чернышов, В.М. Фокин. – М.: Издательство Машиностроение - 1, 2007. – 208 с.

115. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве / Б.Х. Драганов, А.В. Кузнецов, С.П. Рудобашта; под общ. ред. Б.Х. Драганова. – М.: Агропромиздат, 1990. – 463 с.

116. Теплофизические и реологические характеристики полимеров: справочник / под общ. ред. Ю.С. Липатова. – К.: «Наук. думка», 1977. – 244 с.

117. УКТ38 Щ.4 – устройство для измерения и контроля температуры восьмиканальное: руководство по эксплуатации. – ОВЕН, 2013. – 112 с.

118. Управление программами и проектами: 17 модульная программа для менеджеров «Управление развитием организации». Т. 8. – М.: ИНФРА-М, 1999. – 392 с.

119. Управление проектами: учебник / Л.Г. Матвеева и др. – Ростов н/Д: «Феникс», 2009. – 422 с.

120. Федоренко И.Я. Методы расчета вибрационных машин на основе гидродинамических моделей сыпучего материала / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков, А.А. Гнездилов // Сибирский вестник с.-х. науки. – 2007. – № 5. – С. 93 – 98.

121. Федоренко И.Я. Динамика виброоживленного слоя сельскохозяйственного материала / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков // Вестник РАСХН. – 2006. – № 6. – С. 13 – 15.

122. Федоренко И.Я. Вибрируемый зернистый слой в сельскохозяйственной технологии: монография / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков. – Барнаул: АГАУ, 2006.

123. Федоренко И.Я. Оптимизация параметров процесса вибросмешивания в смесителе с гибким рабочим органом / И.Я. Федоренко, Р.А. Котов // Вестник АГАУ. – 2015. – № 4. (126) – С. 106 – 109.

124. Филатов В.В., Филатов А.В., Кудряшкин А.В., Емкин Н.В., Плаксин Ю.Н., Андреева А.А. Установка для термообработки зернового сырья. МПК 7А 23 L1/18, 1/20; А 23 Р1/14; F 26 В3/30, от 14.10.2004.

125. Филатов В.В., Агломазов А.Л. Способ определения теплофизических характеристик дисперсных пищевых материалов. № 2007118776 от 22.05.07, решение о выдаче патента от 13.05.2008. Патент № 2352934 от 27.11.2008., 11 Бюллетень.

126. Филатов В.В., Агломазов А.Л. Способ определения теплофизических характеристик дисперсных пищевых продуктов. № 2008107513 от 29.02.08, положительное решение о выдаче патента от 03.04.2009.

127. Филатов В.В. Установка для экспериментальных исследований теплофизических характеристик зернистых сыпучих материалов / В.В. Филатов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2011. – № 4. – С. 18 – 21.

128. Филатов В.В. Экономическая эффективность и нормирование надежности технологического оборудования при инфракрасном подводе энергии / В.В. Филатов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2011. – № 2. – С. 26 – 27.

129. Филатов В.В. Анализ методов инфракрасной спектроскопии для определения оптических характеристик капиллярно-пористых материалов / В.В. Филатов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – № 12. – С. 16 – 21.

130. Филатов В.В. Использование метода эквивалентных поверхностей для проектирования термических камер инфракрасных установок / В.В. Филатов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – № 9. – С. 40 – 44.

131. Фролов К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения / К.В. Фролов. – М.: Машиностроение, 1984. – 354 с.

132. Харитонов В.В. Теплофизика полимеров и полимерных композиций / В.В. Харитонов. – М.: Высшая школа, 1983. – 162 с.
133. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман и др. – М.: Мир, 1977. – 522 с.
134. Хлыстунов В.Ф. Смешивание кормов в порционных аппаратах с вертикальным шнеком / В.Ф. Хлыстунов, М.А. Тищенко, С.В. Брагинец, Б.А. Карташов, А.Н. Токарева // Техника в сельском хозяйстве. – 2004. – № 3. – С. 13 – 15.
135. Холоднов В.А. Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических процессов: практическое руководство / В.А. Холоднов, В.П. Дьяконов, Е.Н. Иванова, Л.С. Кирьянова. – СПб: АНО НПО «Профессионал», 2003. – 465 с.
136. Чарыков В.И. Исследование теплового режима катушки намагничивания электромагнитного сепаратора / В.И. Чарыков, А.А. Евдокимов, А.А. Митюнин // Вестник АГАУ. – 2013. – № 5. (103) – С. 118 – 122.
137. Черняев Н.П. Производство комбикормов / Н.П. Черняев. – М.: Агропромиздат, 1989. – 224 с.
138. Черняев Н.П. Оценка стабильности технологического процесса / Н.П. Черняев // Комбикорма. – 2012. – № 3. – С. 51 – 53.
139. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А.Ф. Чудновский. – М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.
140. Шушпанников А.Б. Разработка и исследование вертикально-вибрационного смесителя / А.Б. Шушпанников, А.Г. Золин, В.Н. Чистюхин // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – № 10. – С. 78 – 80.
141. Шушпанников А.Б. Методология построения смесеприготовительных агрегатов вибрационного типа для сыпучих композиций: автореф. дис... д-ра техн. наук / А.Б. Шушпанников. – Кемерово, 2016. – 31 с.
142. Эккерт Э.Р. Теория тепло- и массообмена / Э.Р. Эккерт, Р.М. Дрейк. – М. – Л.: Госэнергоиздат, – 1961.
143. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных

температур / Н.А. Ярышев. – Л.: Энергия, 1967. – 299 с.

144. Andeen D.R., Glicksman L.R., Bowman R. Heat transfer from flattened horizontal tubes // Fluidization. Cambridge university Press. 1978. P. 345 – 356.

145. Compendium of Thermophysical Property. Measurement Methods. Vol. 2. // Ed. by K. D. Maglic, A. Cezairliyan, V. E. Peletsky. N. Y., London.: Plenum. Press, 1986. – 643 p.

146. Fan Yang, Teruyuki Ikeda, G. Jeffrey Snyder, Chris Dames. Effective thermal conductivity of polycrystalline materials with randomly oriented superlattice grains J. Appl. Phys. 108, 034310 (2010).

147. Naito K., Inaba H., Nōda Y. Measurement of Thermal Conductivity and Diffusivity by Means of Scanning Temperature Method. // J. Nucl. Sei and Technol. 1976. – V. 13, № 9, P. 508 – 516.

148. Nolas G. S., in Thermal Conductivity: Theory, Properties, and Applications, edited by T. M. Tritt Kluwer Academic, New York, – 2004, P. 110.

149. Practical Temperature Measurement. P.R.N. Childs, Butterworth Heinemann, Oxford, – 2001.

150. Vijayaraghavan M.R., Sastri V.M.K. Effect of surface roughness on heat transfer in fluidized beds // Conference of future energy production. Int. Center Neat and mass transfer. Dubrovnic. – 1975. P. 571 – 578.

Программа «Система вычисления теплофизических характеристик»

```
unit main;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, Grids, ComObj, ActiveX, WinProcs, Math;
type
  TForm1 = class(TForm)
    Edit1: TEdit;
    Edit2: TEdit;
    Edit3: TEdit;
    Edit4: TEdit;
    Edit5: TEdit;
    Edit6: TEdit;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Label8: TLabel;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Label11: TLabel;
    Label12: TLabel;
    Label13: TLabel;
```

```
Label14: TLabel;
Label15: TLabel;
Label16: TLabel;
Label17: TLabel;
Label18: TLabel;
Edit7: TEdit;
Label19: TLabel;
Label20: TLabel;
Label21: TLabel;
Edit8: TEdit;
Button1: TButton;
Button2: TButton;
StringGrid1: TStringGrid;
ComboBox1: TComboBox;
OD: TOpenDialog;
Label22: TLabel;
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure FormActivate(Sender: TObject);
procedure ComboBox1Change(Sender: TObject);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;
type
  aa = array of array of string;
var
  Form1: TForm1;
  Fdata : OleVariant;
```

```
MyExcel: OleVariant;
Flag: boolean;
Data, RData : aa;
const
  ExcelApp = 'Excel.Application';
implementation
  {$R *.dfm}
function CheckExcelInstall : boolean;
var
  ClassId: TCLSID;
  Rez : HRESULT;
begin
  Rez:= CLSIDFromProgID(PWideChar(WideString(ExcelApp)),ClassID);
  if Rez = S_OK then Result:=True
    else Result:=False;
end;
function CheckExcelRun: boolean;
begin
  try
    MyExcel:=GetActiveOleObject(ExcelApp);
    Result:=True;
  except
    Result:=false;
  end;
end;
function RunExcel(DisableAlerts:boolean=true; Visible: boolean=false): boolean;
begin
  try
    if CheckExcelInstall then
      begin
```

```

MyExcel:=CreateOleObject(ExcelApp);
MyExcel.Application.DisplayAlerts:= false;
MyExcel.Visible:=Visible;
Result:=true;
end
else
begin
    MessageBox(0,'Приложение MS Excel не установлено на этом компьюте-
ре','Ошибка',MB_OK+MB_ICONERROR);
    Result:=false;
end;
except
    Result:=false;
end;
end;
function OpenBook(AutoRun:boolean=true; path: string=""):boolean;
begin
    if CheckExcelRun then
        begin
            MyExcel.WorkBooks.Open[path, 0, True];
            Flag:= false;
            Result:=true;
        end
    else
        if AutoRun then
            begin
                RunExcel;
                MyExcel.WorkBooks.Open[path, 0, True];
                Flag:=True;
                Result:=true;
            end
        end
    end
end

```

```
    end
  else
    Result:=false;
  end;
function closebook: boolean;
begin
  if Flag then
    begin
      MyExcel.Application.Quit;
      MyExcel:=UnAssigned;
    end;
  end;
procedure FilGrid(param : string="");
var i,j,s: integer;
begin
  s:=0;
  j:=length(data[1])-1;
  for i := 1 to j do
    begin
      Form1.StringGrid1.Rows[i].Clear;
    end;
  if param='Все термодары' then
    Begin
      for i := 0 to j do
        begin
          Form1.StringGrid1.Cells[0,i+1]:=Data[0,i];
          Form1.StringGrid1.Cells[1,i+1]:=Data[1,i];
          Form1.StringGrid1.Cells[2,i+1]:=Data[2,i];
          Form1.StringGrid1.Cells[3,i+1]:=Data[3,i];
          Form1.StringGrid1.Cells[4,i+1]:=Data[4,i];
```

```

    end;
End
else
begin
    for i := 0 to j do
        if Data[0,i] = param then
            begin
                Form1.StringGrid1.Cells[0,s+1]:=Data[0,i];
                Form1.StringGrid1.Cells[1,s+1]:=Data[1,i];
                Form1.StringGrid1.Cells[2,s+1]:=Data[2,i];
                Form1.StringGrid1.Cells[3,s+1]:=Data[3,i];
                Form1.StringGrid1.Cells[4,s+1]:=Data[4,i];
                s:=s+1;
            end;
        end;
    end;
    Form1.StringGrid1.Row:=1;
    Form1.StringGrid1.SetFocus;
end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
    od.Execute();
    Edit8.Text:=od.FileName;
end;
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
var
    r1,r2,t,y,q,R,Q1,Q2,a1,l,c,a : real;
    i, z: integer;
    k2: string;
begin
    r1:=strtofloat(trim(Edit1.Text));

```

```

r2:=strtofloat(trim(Edit2.Text));
t:=strtofloat(trim(Edit3.Text));
y:=strtofloat(trim(Edit4.Text));
q:=strtofloat(trim(Edit5.Text));
R:=strtofloat(trim(Edit6.Text));
Q1:=strtofloat(trim(Edit7.Text));
OpenBook(true, Edit8.Text);
z:=strtoint(MyExcel.ActiveSheet.UsedRange.rows.Count);
k2:='E'+inttostr(z-1);
Fdata:=MyExcel.Range['D4',k2].Value;
StringGrid1.RowCount:=z-4;
SetLength(Data,5,StringGrid1.RowCount);
MyExcel.ActiveWorkbook.Close;
CloseBook;
for i := 1 to StringGrid1.RowCount do
begin
  Q2:=FData[i,2];
  a1:=(sqr(r2) - sqr(r1))/(4*t);
  l:=((q*R)/(2*(Q2-Q1))*(((sqr(r2)-sqr(r1)))/(sqr(R))));
  c:=l/(a1*y);
  a:=sqr((l*c*y*R)/q);
  Data[0,i-1]:=VarToStr(FData[i,1]);
  Data[1,i-1]:= floatToStr(RoundTo(strtofloat(VarToStr(FData[i,2])), -2));
  Data[2,i-1]:=floattostr(RoundTo(l, -2));
  Data[3,i-1]:=floattostr(RoundTo(c, -2));
  Data[4,i-1]:=floattostr(RoundTo(a, -2));
end;
for i:= 0 to (StringGrid1.RowCount-1) do
begin
  if Data[0,i]='Термопара 1' then Data[0,i]:='
n1';

```

```
if Data[0,i]='Термопара 2' then Data[0,i]:=' n2';
if Data[0,i]='Термопара 3' then Data[0,i]:=' n3';
if Data[0,i]='Термопара 4' then Data[0,i]:=' n4';
end;
Combox1.Visible:=true;
FilGrid(' Все термодпары');
end;
procedure TForm1.ComboBox1Change(Sender: TObject);
begin
  FilGrid(ComboBox1.Text);
end;
procedure TForm1.FormActivate(Sender: TObject);
begin
  StringGrid1.Cells[0,0]:='Термопара';
  StringGrid1.Cells[1,0]:='?2';
  StringGrid1.Cells[2,0]:='?';
  StringGrid1.Cells[3,0]:='c';
  StringGrid1.Cells[4,0]:='a';
end;
end.
```

Система вычисления теплофизических характеристик

$r1 = 0,35$ [м]
 $\Delta t = 2500$ [с]
 $q = 31,75$ [Вт]
 $\Theta 1 = 23,2$ [°с]
 Значение расстояния от центра смесителя до теплоизлучающего элемента внутри ёмкости
 Время запаздывания
 Мощность теплоизлучающего элемента
 Температура поверхности ёмкости

$r2 = 0,425$ [м]
 $\gamma = 800$ [кг\м3]
 $R = 0,85$ [м]
 С:\данные экспери...
 Значение расстояния до точки на поверхности ёмкости
 Плотность преикса
 Радиус ёмкости
 Выбор файла

Все термомпары
 Рассчитать

Термомпара	$\Theta 2$	λ	c	a
n1	27	0,29	61,44	141293,17
n2	26,8	0,3	64,85	175406,6
n3	26,2	0,36	77,82	363722,44
n4	20,6	-0,42	-89,79	644707,05
n2	26,6	0,32	68,66	220465,02
n3	26,2	0,36	77,82	363722,44
n1	27	0,29	61,44	141293,17
n4	20,7	-0,43	-93,38	754216,54
n1	26,9	0,29	63,1	157198,66
n2	26,5	0,33	70,74	248427,57
n3	26,2	0,36	77,82	363722,44
n4	20,6	-0,42	-89,79	644707,05
n2	26,6	0,32	68,66	220465,02
n3	26,2	0,36	77,82	363722,44
n1	27	0,29	61,44	141293,17
n4	20,6	-0,42	-89,79	644707,05

Рис 1. Окно вывода результатов программы
для вычисления теплофизических характеристик

Таблица 1. Значения факторов в эксперименте

Температура, К	Время переме- шивания, с	Влажность, %	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Интенсивность нагрева
23,1	90	6,63876625	0,295056	26,555065
23,8	110	6,63876625	1,931277	212,44052
24,6	130	6,745691	3,320955	431,724224
24,9	135	6,828445286	3,844161	518,9618417
25,5	150	6,697823	4,465215	669,7823
25,9	170	6,63876625	4,529981	770,096885
26,3	190	6,2893575	4,369448	830,19519
27	200	6,123587	4,898869	979,77392
27,6	210	5,55803686	4,8699	1022,678782
28	230	5,311013	4,618273	1062,2026
28,5	240	5,173895	4,742737	1138,2569
28,7	250	4,877460918	4,448244	1112,061089
29	260	4,267778304	3,939488	1024,266793
29,4	270	4,284173	4,062029	1096,748288
30	280	3,950340248	3,950339	1106,095269
31,2	290	3,8547675	4,359875	1264,36374
31,8	300	3,698255	4,339286	1301,78576
32	310	3,567098284	4,142435	1284,155382
33	320	3,414222643	4,267778	1365,689057
33,7	330	3,398876	4,408239	1454,718928
34	340	3,319383125	4,295673	1460,528575
35,4	350	3,1866078	4,515877	1580,557469
35,8	355	2,998877	4,32514	1535,425024
36	360	2,87946488	4,159227	1497,321737

Поверхности отклика

$$Y = -14258,528 + 97,5415X_1 - 5,3409X_2 - 0,1669X_1^2 + 0,0187X_1X_2 - 0,0007X_2^2$$

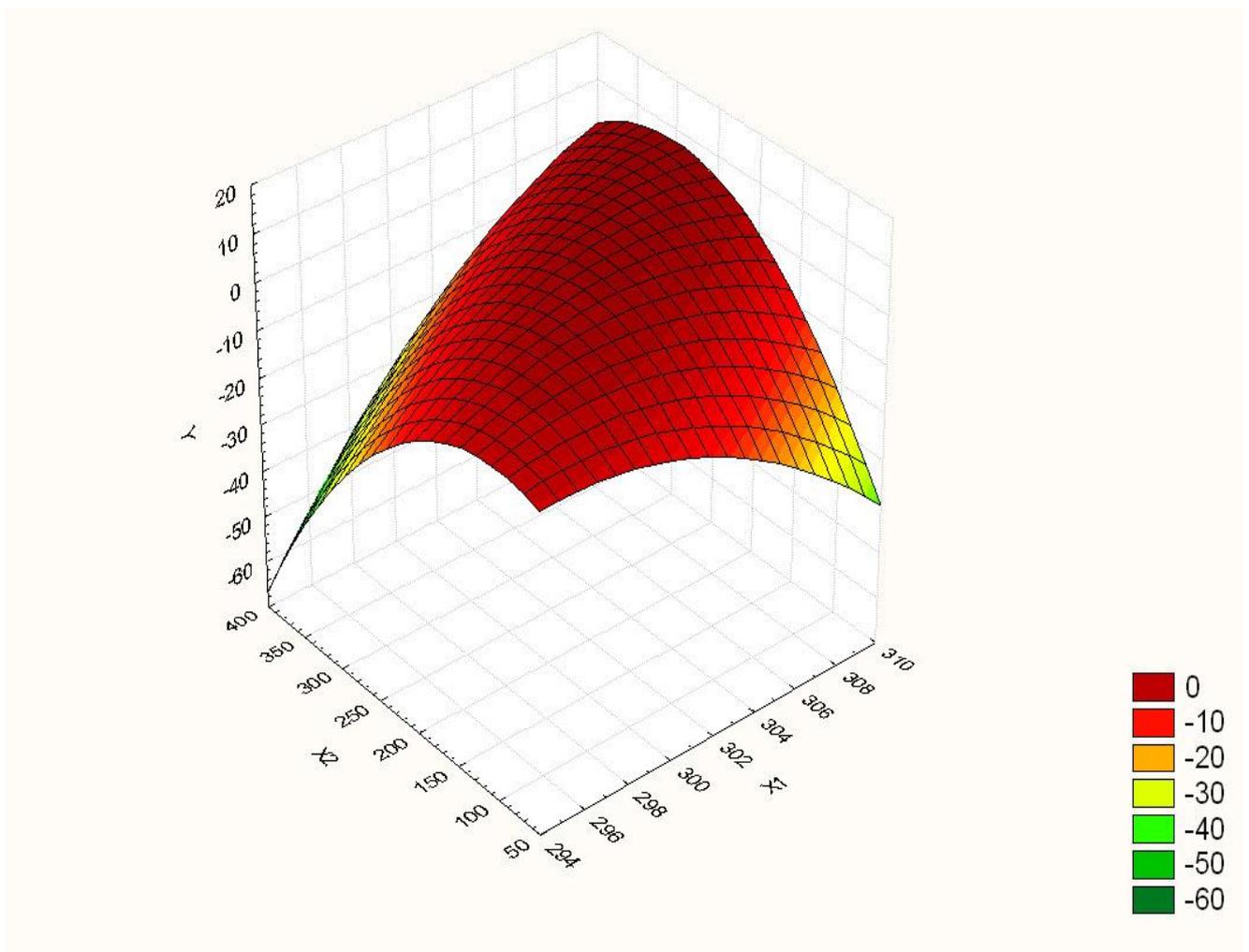


Рис 2. Влияние температуры нагрева смесительных элементов $X_1(t)$ и времени вибрационного воздействия $X_2(t)$ на коэффициент интенсивности нагрева сыпучего материала Y

$$Y = -798,912 + 0,1377X_1 + 235,3953X_3 + 0,0086X_1^2 - 0,7865X_1X_3 - 0,1246X_3^2$$

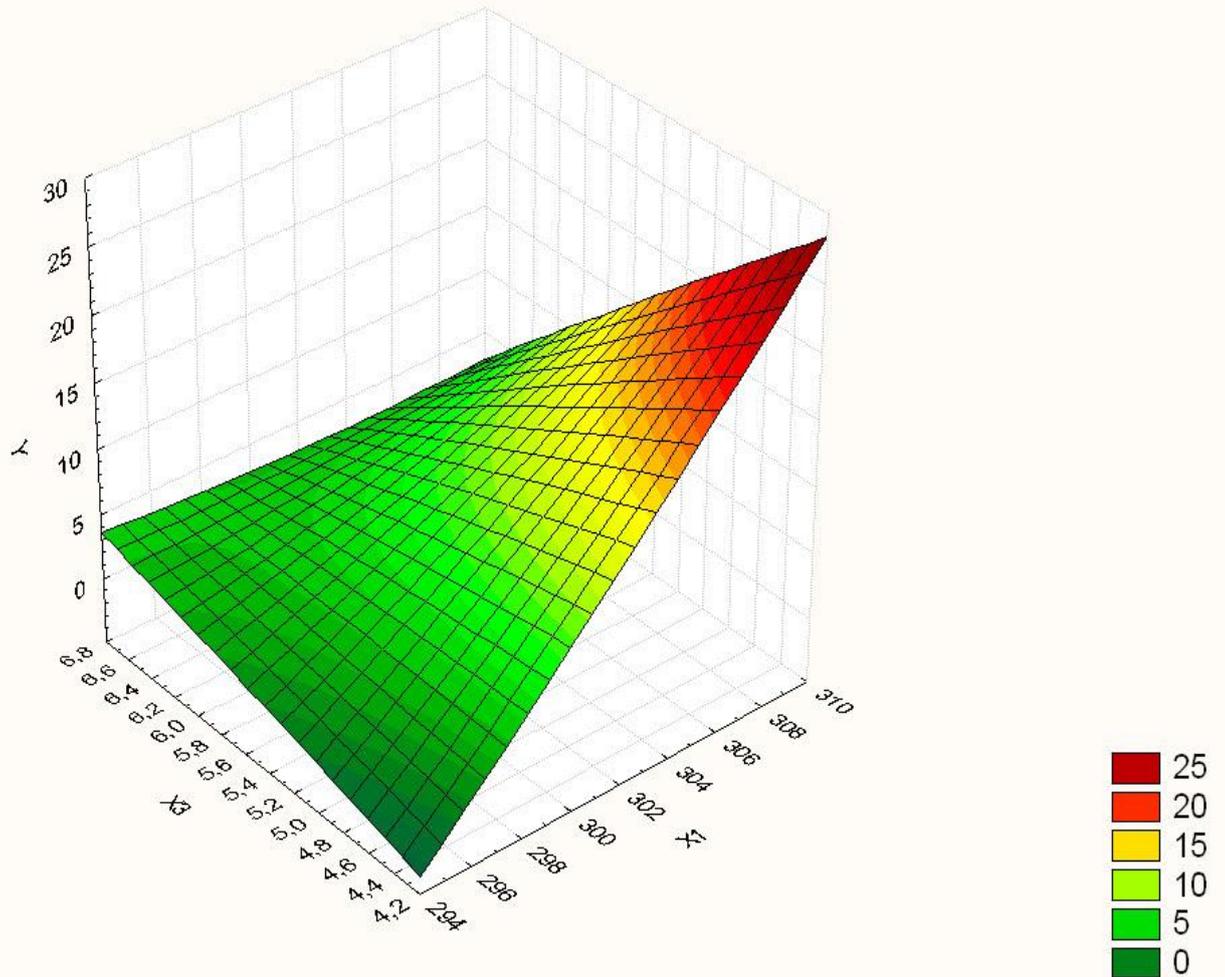


Рис 3. Влияние температуры нагрева смесительных элементов $X_1(\Theta)$ и влажности $X_3(\omega)$ на коэффициент интенсивности нагрева сыпучего материала Y

$$Y = 9010,7198 - 56,2443X_1 - 592,7279X_4 + 0,0875X_1^2 + 1,9464X_1X_4 + 2,4043X_4^2$$

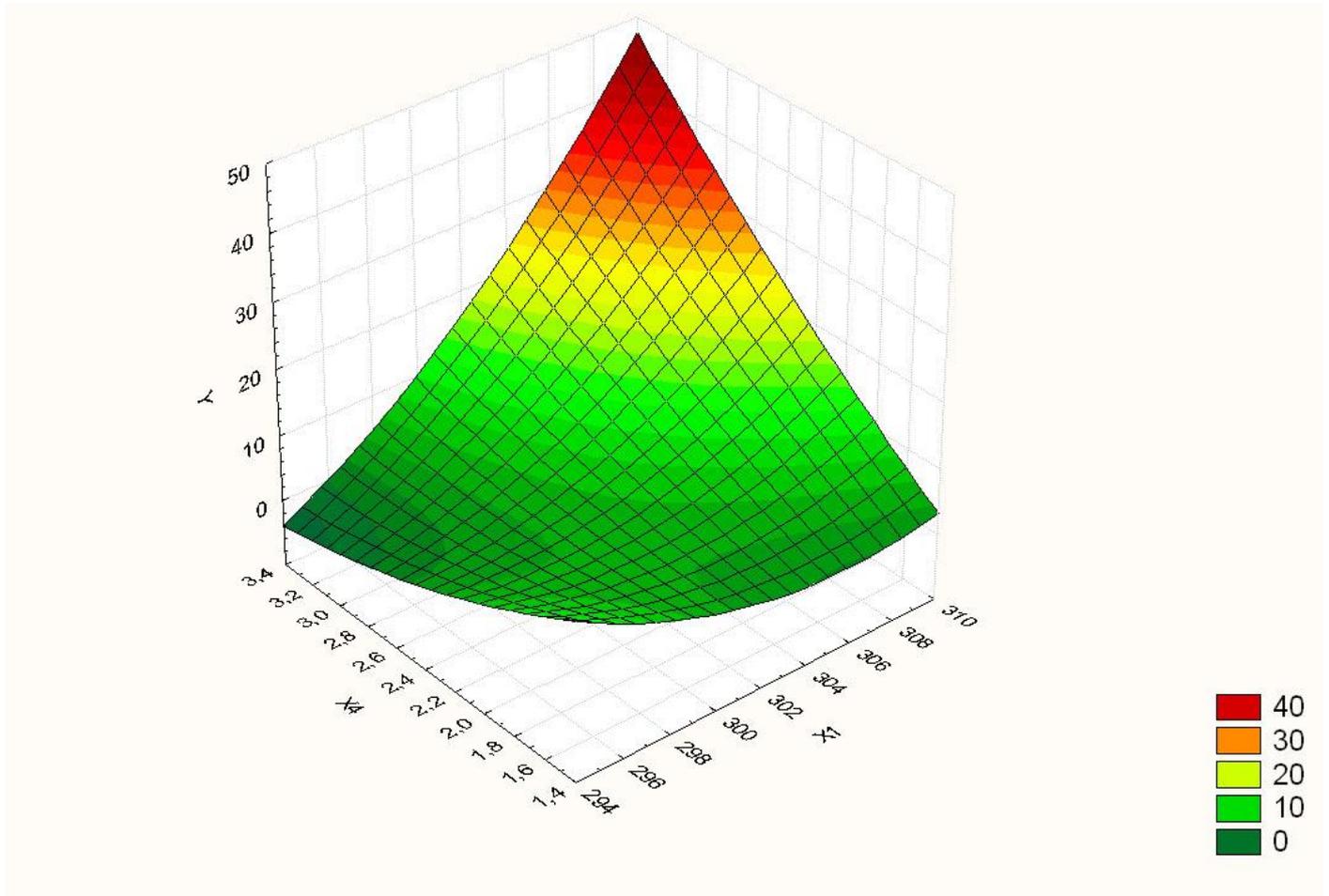


Рис 4. Влияние температуры нагрева смесительных элементов $X_1(^\circ\text{C})$ и теплопроводности $X_4(\lambda)$ на коэффициент интенсивности нагрева сыпучего материала Y

$$Y = -24,8642 + 0,1903X_2 + 4,6572X_3 + 8,7238X_2^2 - 0,0353X_2X_3 + 0,0667X_3^2$$

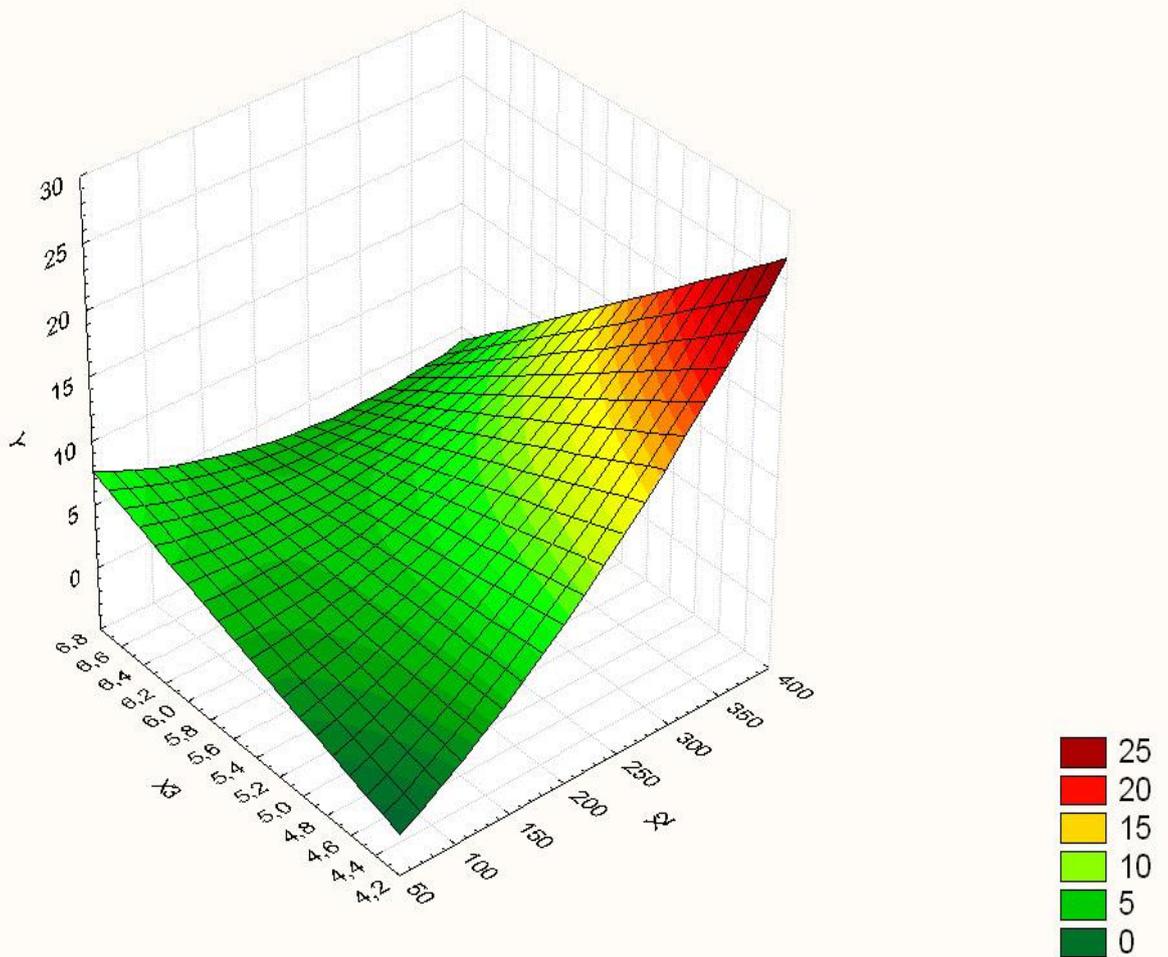


Рис 5. Влияние времени вибрационного воздействия $X_2(t)$ и влажности $X_3(\omega)$ на коэффициент интенсивности нагрева сыпучего материала

$$Y = 157,1079 - 0,6466X_2 - 79,619X_4 + 0,0006X_2^2 + 0,1864X_2X_4 + 9,5415X_4^2$$

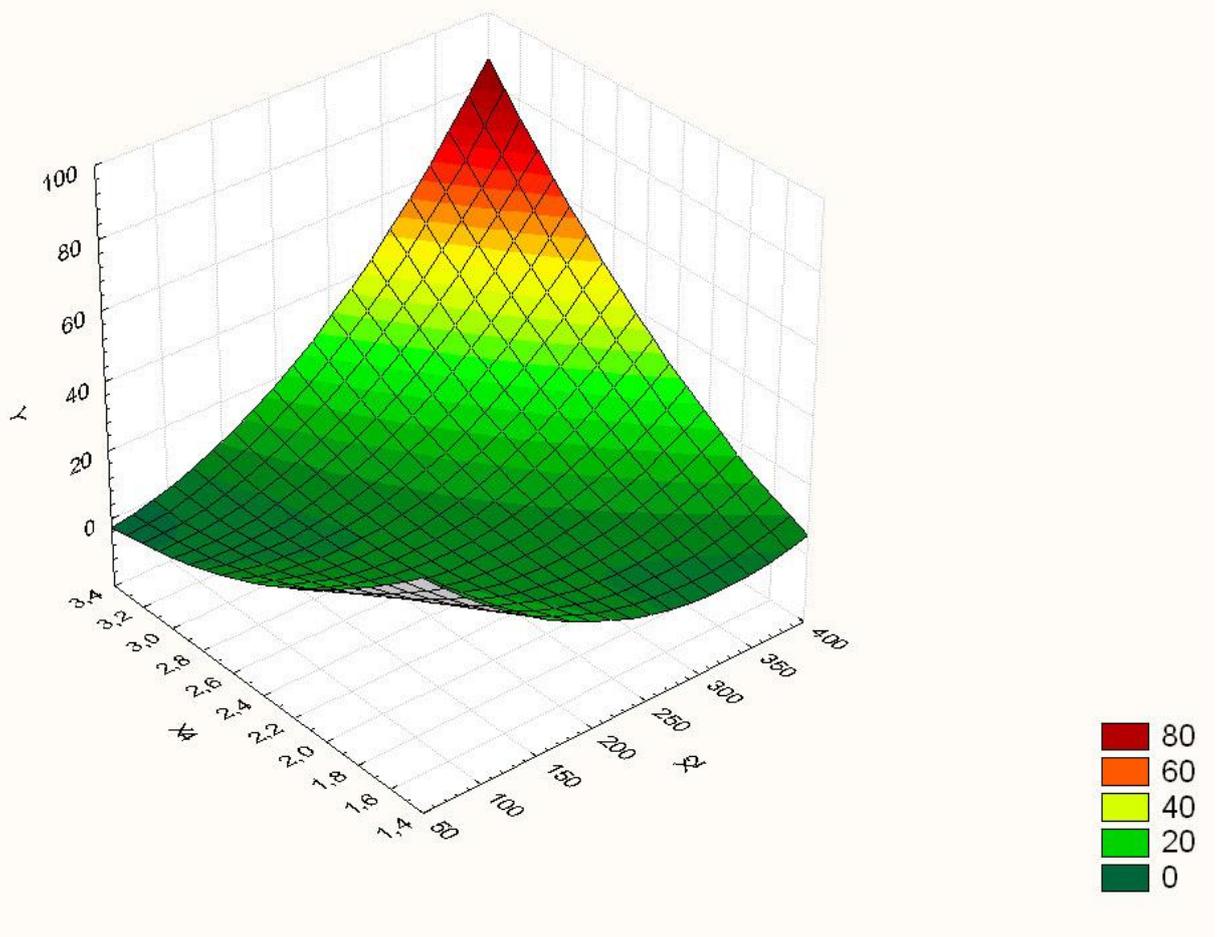


Рис 6. Влияние времени вибрационного воздействия $X_2(t)$ и теплопроводности $X_4(\lambda)$ на коэффициент интенсивности нагрева сыпучего материала

$$Y = -456,6925 + 118,5129X_3 - 106,4933X_4 - 7,6504X_3^2 - 13,4154X_3X_4 - 6,5217X_4^2$$

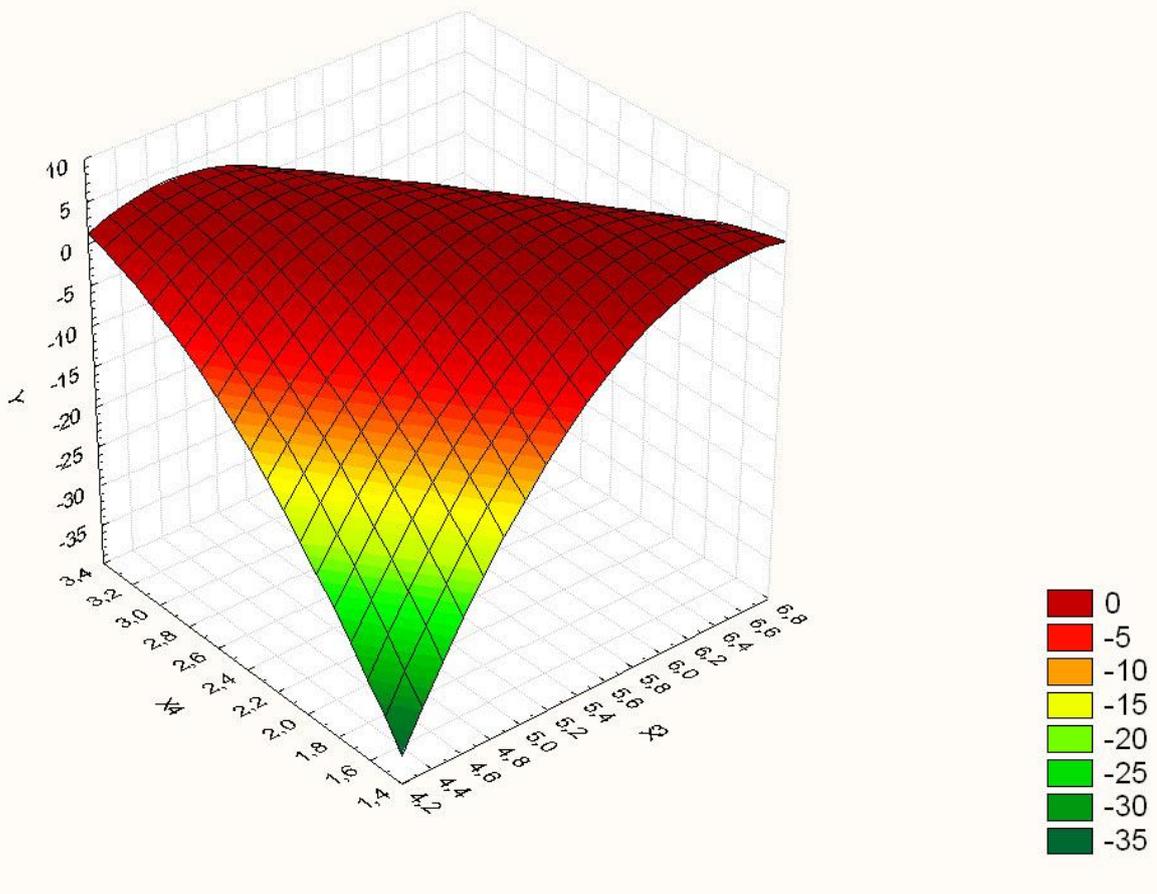


Рис 7. Влияние влажности $X_3(\omega)$ и теплопроводности $X_4(\lambda)$ на коэффициент интенсивности нагрева сыпучего материала

Результаты планирования эксперимента

Таблица 2. Результаты работы программы Statistica 6.0

	1 X1	2 X2	3 X3	4 X4	5 Y
1	296,1	90	4,3	3,12	0,3
2	296,8	110	4,5	3,12	1,93
3	297,6	130	4,6	3,21	3,32
4	297,9	135	5,1	3,12	3,84
5	298,5	150	5,3	2,95	4,47
6	298,9	170	5,5	2,61	4,53
7	299,3	190	5,7	2,49	4,37
8	300	200	5,8	2,29	4,9
9	300,6	210	5,9	2	4,87
10	301	230	6,2	1,98	4,62
11	301,5	240	6,3	1,92	4,74
12	301,7	250	6,4	1,85	4,45
13	302	260	6,42	1,83	3,94
14	302,4	270	6,45	1,81	4,06
15	303	280	6,48	1,8	3,95
16	304,2	290	6,5	1,77	4,36
17	304,8	300	6,52	1,72	4,34
18	305	310	6,54	1,67	4,14
19	306	320	6,56	1,64	4,27
20	306,7	330	6,6	1,6	4,41
21	307	340	6,61	1,56	4,3
22	308,4	350	6,62	1,55	4,52
23	308,8	355	6,63	1,53	4,33
24	309	360	6,64	1,5	4,16

Таблица 2.1. Результаты работы программы Statistica 6.0

	факторы в 6.0				
	1 X1	2 X2	3 X3	4 X4	5 Y
X1	1,00000	0,98144	0,86748	-0,89990	0,45423
X2	0,98144	1,00000	0,94080	-0,95811	0,52596
X3	0,86748	0,94080	1,00000	-0,97319	0,68482
X4	-0,89990	-0,95811	-0,97319	1,00000	-0,56031
Y	0,45423	0,52596	0,68482	-0,56031	1,00000
Means	302,38333	244,58333	6,00708	2,11000	4,04667
Std.Dev.	3,91804	82,97350	0,74416	0,59222	0,99479
No. Cases	24,00000				
Matrix	1,00000				

Таблица 2.2. Результаты работы программы Statistica 6.0

Variable	Correlations (факторы в 6.0)				
	X1	X2	X3	X4	Y
X1	1,000000	0,981435	0,867480	-0,899898	0,454229
X2	0,981435	1,000000	0,940801	-0,958108	0,525963
X3	0,867480	0,940801	1,000000	-0,973186	0,684825
X4	-0,899898	-0,958108	-0,973186	1,000000	-0,560307
Y	0,454229	0,525963	0,684825	-0,560307	1,000000

Таблица 2.3. Результаты работы программы Statistica 6.0

Predicted & Residual Values (факторы в б.У)									
Dependent variable: Y									
Case No.	Observed Value	Predicted Value	Residual	Standard Pred. v.	Standard Residual	Std.Err. Pred.Val	Mahalanobis Distance	Deleted Residual	Cook's Distance
1	0,300000	1,540696	-1,24070	-2,91624	-2,24997	0,393953	10,78084	-2,53410	2,155796
2	1,930000	1,984537	-0,05454	-2,39974	-0,09890	0,298938	5,80113	-0,07724	0,001153
3	3,320000	2,201702	1,11830	-2,14702	2,02800	0,367575	9,26142	2,01255	1,183741
4	3,840000	4,382257	-0,54226	0,39053	-0,98337	0,350935	8,35711	-0,91139	0,221275
5	4,470000	4,627119	-0,15712	0,67548	-0,28493	0,336954	7,62965	-0,25075	0,015441
6	4,530000	4,133418	0,39658	0,10095	0,71919	0,185791	1,65261	0,44737	0,014943
7	4,370000	4,128116	0,24188	0,09478	0,43865	0,189816	1,76697	0,27440	0,005868
8	4,900000	4,119238	0,78076	0,08445	1,41589	0,162744	1,04502	0,85526	0,041906
9	4,870000	3,849646	1,02035	-0,22928	1,85038	0,341425	7,85904	1,65471	0,690410
10	4,620000	4,553732	0,06627	0,59008	0,12017	0,205131	2,22448	0,07691	0,000538
11	4,740000	4,733825	0,00618	0,79966	0,01120	0,210013	2,37779	0,00722	0,000005
12	4,450000	4,708974	-0,25897	0,77074	-0,46964	0,200854	2,09315	-0,29859	0,007780
13	3,940000	4,466125	-0,52613	0,48813	-0,95411	0,205546	2,23739	-0,61102	0,034120
14	4,060000	4,332931	-0,27293	0,33313	-0,49495	0,236685	3,27899	-0,33457	0,013564
15	3,950000	4,343765	-0,39376	0,34574	-0,71408	0,237971	3,32517	-0,48388	0,028682
16	4,360000	4,626946	-0,26695	0,67528	-0,48410	0,140971	0,54484	-0,28561	0,003507
17	4,340000	4,500241	-0,16024	0,52783	-0,29059	0,139078	0,50474	-0,17113	0,001225
18	4,140000	4,129879	0,01012	0,09684	0,01835	0,204447	2,20329	0,01173	0,000012
19	4,270000	4,291232	-0,02123	0,28460	-0,03850	0,161120	1,00524	-0,02321	0,000030
20	4,410000	4,345119	0,06488	0,34731	0,11766	0,173865	1,32818	0,07204	0,000339
21	4,300000	4,009132	0,29087	-0,04368	0,52748	0,221261	2,74472	0,34668	0,012728
22	4,520000	4,409804	0,11020	0,42259	0,19984	0,257155	4,04362	0,14082	0,002837
23	4,330000	4,418466	-0,08847	0,43267	-0,16043	0,282219	5,06619	-0,11986	0,002475
24	4,160000	4,283099	-0,12310	0,27514	-0,22324	0,277548	4,86842	-0,16487	0,004529
Minimum	0,300000	1,540696	-1,24070	-2,91624	-2,24997	0,139078	0,50474	-2,53410	0,000005
Maximum	4,900000	4,733825	1,11830	0,79966	2,02800	0,393953	10,78084	2,01255	2,155796
Mean	4,046667	4,046667	-0,00000	-0,00000	-0,00000	0,240916	3,83333	-0,01527	0,185121
Median	4,335000	4,338347	-0,03788	0,33943	-0,06870	0,215637	2,56126	-0,05022	0,006824

Таблица 2.4. Результаты работы программы Statistica 6.0

Durbin-Watson d (факторы в б.У) and serial correlation of residuals	
	Durbin-Watson d
Estimate	1,331076
	0,200457

Таблица 2.5. Результаты работы программы Statistica 6.0

Regression Summary for Dependent Variable: Y (факторы в б.У)						
R= ,86381302 R ² = ,74617293 Adjusted R ² = ,69273565						
F(4,19)=13,964 p<,00002 Std.Error of estimate: ,55143						
N=24	Beta	Std.Err. of Beta	B	Std.Err. of B	t(19)	p-level
Intercept			-202,403	92,58236	-2,18619	0,041519
X1	2,39914	1,231323	0,609	0,31263	1,94842	0,066289
X2	-3,99247	1,883783	-0,048	0,02259	-2,11939	0,047453
X3	3,64592	0,700896	4,874	0,93696	5,20180	0,000051
X4	1,32162	0,626826	2,220	1,05291	2,10843	0,048497

«СОГЛАСОВАНО»

Проректор по научной
работе и МО ФГБОУ ВО
ОГАУ, д.с.-х.н., профессор
Г.В. Петрова

2015 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ОАО «Новосергиевский
механический завод»

А.В. Салтанов

25 октября 2015 г.

**Акт внедрения**

результатов научно-исследовательских,
опытно-конструкторских и технологических работ

Бойко Ирины Геннадьевны

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ,

доктор технических наук, профессор

Соловьев Сергей Александрович

ФГБНУ ГОСНИТИ, г. Москва

Наименование работы. Совершенствование системы контроля температуры в смесителях вибрационного типа.

«25» сентября 2015 г. комиссия в составе: председателя - генерального директора ОАО «Новосергиевский механический завод» А.В. Салтанова и представителей ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет» старшего научного сотрудника, кандидата технических наук В.А. Пушко, И.Г. Бойко соискателя кафедры «Механизация технологических процессов в АПК» составила настоящий акт о том, что в ОАО «НМЗ» - 461202, Оренбургская область, п.г.т. Новосергиевка, ул. К. Маркса, 4., внедрены полученные теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы для конструкции смесителей вибрационного типа.

1. В процессе внедрения выполнены следующие этапы работы. В 2012-2015 г.г. на основе проектируемого смесителя построена автоматизированная система контроля температуры с программно-алгоритмическим обеспечением, позволяющая установить динамику нагрева подвижных смесительных элементов при вибрационном формировании однородности смеси.

2. Техничко-экономические показатели внедрения. Технические решения для вибрационного смесителя при расчете экономической эффективности составляют «17%» от масштаба внедрения предлагаемой системы управления рабочего органа - перфорированная лопатка, в установленных диапазонах температурного нагрева электромагнитных вибровозбудителей цилиндрической формы, с учетом комплексного определения теплофизических характеристик сыпучего материала.

3. Предложения о дальнейшем внедрении работы и др. замечания. Конструкцию модернизированного смесителя периодического действия вибрационного типа необходимо внедрить в технологическую линию комбикормового производства при изготовлении премикса, БВМД, а также в другие смежные отрасли перерабатывающей промышленности.

Состав комиссии:

Генеральный директор ОАО «НМЗ»

С.н.с., к.т.н. ФГБОУ ВО ОГАУ

Соискатель кафедры «МТП в АПК» ФГБОУ ВО
ОГАУ

А.В. СалтановВ.А. ПушкоИ.Г. Бойко

«СОГЛАСОВАНО»

И.о. ректора ФГБОУ ВО
ОГАУ, д.с-х.н., профессор
Г.В. Петрова

2016 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
птицефабрики ОАО «Спутник»,
д.с-х.н., профессорА.Ф. Лукьянов
«12» мая 2016 г.**Акт внедрения**результатов научно-исследовательских,
опытно-конструкторских и технологических работ**Бойко Ирины Геннадьевны**

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ,

доктор технических наук, профессор

Соловьев Сергей Александрович

ФГБНУ ГОСНИТИ, г. Москва

Наименование работы. Совершенствование системы контроля температуры в смесителях вибрационного типа.

«12» мая 2016 г. комиссия в составе: председателя - генерального директора птицефабрики ОАО «Спутник», доктора сельскохозяйственных наук, профессора А.Ф. Лукьянова и представителей ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет» доктора сельскохозяйственных наук, профессора кафедры «Химии и биотехнологий» В.А. Сечина; старшего научного сотрудника, кандидата технических наук В.А. Пушко; соискателя кафедры «Механизация технологических процессов в АПК» И.Г. Бойко составила настоящий акт о том, что на птицефабрике ОАО «Спутник» - 461549, Оренбургская область, Соль-Илецкий район, п. Шахтный, ул. Центральная 23 принят к испытанию и внедрению в технологическую линию дозирование - смешивание промышленный образец смесителя периодического действия вибрационного тип, спроектированный в ОАО «Новосергиевский механический завод» - 461202, Оренбургская область, п.г.т. Новосергиевка, ул. К. Маркса, 4.

1. В процессе внедрения выполнены следующие этапы работы. В 2015-2016 г.г. по техническому заданию в цехе приготовления премикса, БВМД птицефабрики ОАО «Спутник» произведен запланированный монтаж и всесторонняя совместная доработка режимов управления конструкции смесителя периодического действия вибрационного типа с общей экспериментальной отработкой на соответствие техническим условиям ГОСТа Р 51095-97 (премикс) и регистрацией температурного поля подвижных смесительных элементов в заданной программе Owen Report Viewer, согласованной с устройством для измерения и контроля температуры Овен УКТ38-Щ.4. (г. Москва).

2. Техничко-экономические показатели внедрения. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения рассматриваемой конструкции смесителя периодического действия вибрационного типа в технологическую линию приготовления премиксов, БВМД на птицефабрике ОАО «Спутник» составит 449616 руб., срок окупаемости дополнительных капитальных вложений включает 3 года.

3. Предложения о дальнейшем внедрении работы и др. замечания. В технологической линии дозирование-смешивание из-за повышенных требований в области промышленной безопасности необходимо с учетом современных нормативов по проектированию предприятий для производства комбикормов (РД - АПК 1.10.17.01-15, МСХ РФ) использовать предлагаемый смеситель вибрационного типа, включающий систему автоматизированного контроля температуры с надлежащей компоновкой, обеспечивающей комплексную регистрацию теплофизических характеристик сыпучего материала (премикс, БВМД) на основе адаптированного программного обеспечения.

Состав комиссии:

Генеральный директор птицефабрики ОАО «Спутник»
д.с-х.н., профессорА.Ф. Лукьянов
А.Ф. ЛукьяновД.с-х.н., профессор кафедры «Химии и биотехнологий»
ФГБОУ ВО ОГАУВ.А. Сечин
В.А. Сечин

С.н.с., к.т.н. ФГБОУ ВО ОГАУ

В.А. Пушко
В.А. Пушко

Соискатель кафедры «МПП в АПК» ФГБОУ ВО ОГАУ

И.Г. Бойко
И.Г. Бойко