

На правах рукописи

УДК 534.111:63

Пирожков Дмитрий Николаевич

**МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
СОЗДАНИЯ КОРМОПРИГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН
С ВИБРИРУЕМЫМ ЗЕРНИСТЫМ СЛОЕМ**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства
механизации сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Барнаул 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный аграрный университет»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
И.Я. Федоренко (ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет»)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
А.В. Фоминых (ФГБОУ ВПО «Курганская государственная сельскохозяйственная академия имени Т.С. Мальцева»)

доктор технических наук, профессор
О.Д. Черепов (ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»)

доктор технических наук, профессор
Г.М. Харченко (ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет»)

Ведущее предприятие: ФГБОУ ВПО «Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина»

Защита состоится «29» марта 2012 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, тел/факс (8-3852) 36-71-29, <http://www.altstu.ru>, e-mail: elnis@inbox.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью Вашего учреждения просим направлять в адрес ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « » 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

Л.В. Куликова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Обеспечение продовольственной безопасности страны в части снабжения населения животноводческой продукцией, восстановление и наращивание поголовья сельскохозяйственных животных, высокая продуктивность и эффективность животноводческой отрасли во многом зависят от правильного кормления животных. Исследования ученых зоотехников однозначно сводятся к тому, что основным рационом животных должны быть специальным образом подготовленные корма. Существующие технические средства выполнения основных технологических операций кормоприготовления зачастую не обеспечивают в полной мере заданные зоотехнические требования к готовой продукции, являются материало- и энергоемкими, требуют высоких затрат труда и средств для приготовления кормов. Поэтому все выше перечисленное отрицательно сказывается на себестоимости животноводческой продукции.

Одним из направлений совершенствования кормоприготовительной техники является использование полезного действия вибрации. Вибрация позволяет получать заданные физико-механические свойства обрабатываемого кормового материала. Отсутствие вращающихся частей, контактирующих с кормом, отсутствие дополнительных механических передач между приводящим электродвигателем и рабочими органами вибромашины для осуществления рабочего процесса, простота конструкции и ее высокая надежность также являются основными достоинствами использования вибраций в кормопроизводстве.

Наиболее эффективным является использование механических колебаний при обработке сыпучих материалов, поскольку вибрационное воздействие на зернистый слой заставляет его изменять свои физико-механические свойства в довольно широких пределах. Это обстоятельство позволяет использовать данный эффект для качественного осуществления различных технологических операций кормопроизводства. В то же время, существующий уровень теоретической проработки вопросов взаимодействия зернистого материала с вибрирующими рабочими органами, а также его поведение при таком взаимодействии не объясняет всего многообразия наблюдаемых явлений. Поэтому данная работа посвящена анализу работы существующих кормоприготовительных вибрационных машин и разработке теоретических методов расчета новых, проектируемых машин, работающих с толстыми слоями зернистых материалов.

На основании выше изложенного можно отметить, что повышение эффективности работы вибрационной кормоприготовительной техники, взаимодействующей с зернистыми материалами, путем определения рациональных динамических режимов движения виброожиженного слоя сыпучего материала на основе математического моделирования является актуальной проблемой, имеющей важное значение в кормоприготовительной и животноводческой отраслях.

В диссертации проанализированы и обобщены данные из литературных источников, приводятся результаты научно-исследовательской деятельности автора, а также данные, полученные при совместной работе автора с другими исследователями по этой проблеме.

Работа выполнена на кафедрах «Механизация животноводства» и «Механика машин и сооружений» Алтайского государственного аграрного университета» в соответствии с планом фундаментальных научно-исследовательских работ Российской

академии наук на период до 2025 г. «Развитие теории вибрационных машин различного целевого назначения для разработки высокоэффективных технологических процессов в агропромышленном комплексе», с федеральной целевой научно-технической программой, финансируемой из средств госбюджета (регистрационный № 01201157188), с региональной программой прикладных научно-исследовательских работ «Обоснование, разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий и технических средств для приготовления кормов (регистрационный № 01201157189).

Научная гипотеза: сыпучая среда при воздействии вибраций может рассматриваться с позиций синергетики как самоорганизующаяся система, формирующая сложные пространственные диссипативные структуры, которые можно использовать в сельскохозяйственной технологии.

Цель работы: повышение эффективности работы кормоприготовительных машин путем определения рациональных динамических режимов движения вибрируемого зернистого слоя на основе математического моделирования.

Для достижения указанной цели работы были поставлены и решены следующие задачи:

1. Изучить совокупность процессов и действие сил, возникающих в слое зернистого материала при вертикальных и горизонтальных колебаниях.
2. Разработать математическую модель вибрируемого зернистого слоя на основе теории сплошной среды, учитывающую отличительные особенности сыпучего материала, подвергаемого воздействию вибрации.
3. Обосновать возможность использования методов синергетики для исследования динамических режимов виброожиженного слоя зернистого материала. Объяснить на основе синергетических подходов существование различных экспериментально наблюдаемых типов динамического состояния вибрируемого зернистого слоя.
4. Разработать алгоритмы и методы расчета вибрационных кормоприготовительных машин на основе созданных математических моделей виброожиженного зернистого материала.
5. Оценить перспективы использования результатов исследования и их экономическую эффективность при создании кормоприготовительных машин с вибрируемым зернистым слоем.

Объектом исследования являются вибрационные технологические процессы обработки кормовых сыпучих материалов и вибрационные кормоприготовительные машины.

Предметом исследования являются математические модели виброожиженного слоя сыпучего материала.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись методы гидродинамики и термодинамики, методы синергетики, методы теоретической механики, методы теории подобия и математического моделирования, методы численного решения дифференциальных уравнений, методы исследования устойчивости динамических систем, методы планирования эксперимента и математической статистики.

Научная новизна. Разработана гидродинамическая модель виброожиженного слоя сыпучего материала, получены критерии подобия, представляющие собой вибрационные аналоги чисел Эйлера, Рейнольдса, Фруда, Релея, Прандтля, позволяющие использовать математический аппарат термо- гидродинамики для моделирования по-

ведения виброожиженного слоя сыпучего материала.

Доказано, что вибрируемый зернистый слой является синергетической системой, то есть для моделирования его поведения применимы законы и методы синергетики.

На основе синергетического подхода выполнено сведение гидродинамической модели виброожиженного материала к модели Лоренца, позволяющей определять динамическое состояние вибрируемого зернистого слоя.

Разработан общий алгоритм расчета кормоприготовительных машин с вибрируемым зернистым слоем, на основе которого созданы методики расчета вибрационного дозатора, вибрационного смесителя и вибрационного очистителя для зернистых кормовых материалов.

Практическая значимость. В результате проведенных исследований разработаны методы и алгоритмы расчета вибрационных кормоприготовительных машин, позволяющие качественно оценивать динамическое состояние обрабатываемого материала, что дает возможность анализировать работу существующего и создавать новое технологическое оборудование с рациональными эксплуатационными характеристиками. Указанные методы и алгоритмы расчета могут быть использованы в проектных организациях, занимающихся разработкой кормоприготовительного оборудования при разработке устройств очистки от примесей, дозирования, смешивания и выполнения других технологических операций с зернистыми кормовыми материалами.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы на предприятии ООО «Сибирский агропромышленный дом», а именно: внедрены методики расчета конструктивно-технологических параметров, эксплуатационных характеристик, а также качественных показателей технологических процессов вибрационных машин различного назначения (вибрационные дозаторы и вибрационные смесители). В ООО «Алтайские вибромашины» внедрены методики расчета конструктивно-технологических параметров, разработаны чертежи и изготовлено 20 шт. многокомпонентных вибрационных дозаторов и 5 шт. вибрационных смесителей сыпучих кормовых материалов. Научные разработки внедрены в учебный процесс Алтайского ГАУ и используются при чтении лекций, а также при подготовке аспирантов и выполнении студентами курсовых и дипломных работ на кафедрах «Механизация животноводства», «Сельскохозяйственные машины», «Тракторы и автомобили».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на XXXII Уральском семинаре по механике и процессам управления (г. Миасс, 2002), XLII научно-технической конференции (г. Челябинск, 2003), Юбилейной международной научно-практической конференции «Современные проблемы и достижения аграрной науки в животноводстве и растениеводстве» (г.Барнаул, 2003), II международной научно-технической конференции «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт» (г. Тобольск, 2004), Международной научно-практической конференции «Машинно-технологическое, энергетическое и сервисное обеспечение сельхозтоваропроизводителей Сибири» (п.Краснообск, 2008), II, III и VI Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (г.Барнаул, 2007, 2008, 2011 гг.)

На защиту выносятся:

- синергетический подход к рассмотрению динамики виброожиженного слоя зернистого материала, позволяющий применять методы синергетики к описанию динамическо-

го поведения виброожиженного зернистого слоя;

- гидродинамическая модель виброожиженного слоя зернистого материала, позволяющая адекватно описать динамику этого слоя и объяснить причины наблюдаемых явлений при воздействии вибрации на зернистый материал;

-общий алгоритм и частные методики расчета вибрационных машин на основе гидродинамической модели виброожиженного слоя зернистого материала;

- оценка экономической эффективности и применимость результатов работы в животноводстве и перерабатывающей промышленности.

Достоверность теоретических исследований обеспечивается математической корректностью постановки задач, соответствием полученных критериев подобия положениям термо- и гидродинамики, количественным и качественным совпадением результатов численных решений с экспериментальными данными.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 25 печатных работах, в том числе: 10 статей в изданиях из перечня ВАК РФ, 6 патентов РФ на изобретение, одна монография, 8 статей в других изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, библиографического списка из 210 наименований, восьми приложений. Общий объем работы составляет 292 страницы, в том числе 29 таблиц, 78 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы научная гипотеза и цель, поставлены задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения работы, выносимые на защиту.

В первой главе дается краткий обзор и анализ явлений и фактов, экспериментально наблюдаемых в вибрируемом зернистом слое, а также анализ существующих математических моделей для описания наблюдаемых явлений.

В наши дни машины вибрационного принципа действия получили большое распространение. На предприятиях сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности вибрации успешно применяются при обработке различных зернистых (по другой терминологии - сыпучих, дисперсных) материалов и продуктов: зерна, муки, сахара песка, крахмала, крупы, какао-бобов, мясных фаршей, сухих смесей и т.д. В процессе их просеивания, центрифугирования, сепарирования, транспортирования, смешивания, дозирования, измельчения, обжарки, сушки, резки, уплотнения вибрационные рабочие органы взаимодействуют с некоторой порцией этих материалов – загрузкой машины. При этом сыпучий материал представлен в технологической машине в виде слоя той или иной толщины, обычно существенно меньшей, чем длина волны распространения вибрационных возмущений.

Применение виброметода в различных отраслях хозяйства стало возможным благодаря усилиям многих ученых, в числе которых крупнейшие советские и российские механики И.И. Артоболевский, В.В. Андронов, В.И. Бабицкий, И.И. Блехман, И.И. Быховский, Р.Ф. Ганиев, И.Ф. Гончаревич, Э.Э. Лавендел, Н.В. Михайлов, Р.Ф. Нагаев, Ю.И. Неймарк, Е.А. Непомнящий, П.Ф. Овчинников, Я.Г. Пановко, К.М. Рагульскис, П.А. Ребиндер, Н.Б. Урьев, К.В. Фролов, К.Ш. Ходжаев, В.Н. Челомей, В.А. Членов, С.Ф. Яцун.

Из зарубежных ученых своими трудами по данной проблеме выделяются Р. Бишоп, Д. Кумабэ, К. Магнус, П. Ребю, С.П. Тимошенко, Я. Ден Хартог.

Существенный вклад в разработку вибрационных машин и процессов агропромышленного комплекса внесли Н.А. Буренков, П.М. Василенко, В.П. Горячкин, В.В. Гортинский, А.А. Дубровский, П.М. Заика, П.Н. Лапшин, П.И. Леонтьев, Г.Е. Лимоннов, Г.Е. Листопад, С.А. Мачихин, Ю.А. Мачихин, М.А. Талейсник, Г.Д. Терсков, В.М. Усаковский, И.М. Федоткин, И.Я. Федоренко, А.В. Фоминых, и другие ученые.

Экспериментально установлено, что при вибрационном воздействии в сыпучем материале изменяются механизмы взаимодействия между его частицами.

Многими исследователями были отмечены изменения в поведении материала при изменении параметров вибрации. Характерной величиной, оценивающей интенсивность вибрации, является произведение амплитуды колебаний на квадрат частоты колебаний $a\omega^2$. При $a\omega^2 < g$ после некоторого движения, связанного с уплотнением среды, наступает относительный покой, и материал движется вместе с сосудом (рисунок 1 а, начальный уровень материала показан пунктирной линией). При $a\omega^2 > g$ начинается упорядоченное движение сыпучей среды в виде циркуляционных потоков (рисунок 1 б). В зависимости от высоты слоя может возникать одна или целый ансамбль ячеек циркуляции. Скорость циркуляции в этом режиме имеет постоянное по модулю значение, что можно трактовать как детерминированное (ламинарное) движение материала. При режимах, в которых $a\omega^2 \gg g$, характеризующихся интенсивным вибровоздействием, наступает стохастическое (турбулентное) движение зернистого материала и его интенсивное перемешивание по всему объему (рисунок 1 в).

Для объяснения наблюдаемых явлений и определения кинематических и динамических характеристик вибрируемого слоя различными авторами было разработано большое количество математических моделей, которые можно разделить на несколько основных групп.

1. Модели единичной частицы. Рассматривают движение одной частицы сыпучего материала на шероховатой вибрируемой поверхности.

2. Специальные модели. Предназначены для описания процессов, происходящих только в какой-то одной, узкоспециализированной группе вибрационных машин. К таким моделям можно отнести рассмотрение сыпучего материала как двухмассовой системы, снабженной системой вязких демпферов и упругих элементов; как систему тонких горизонтальных слоев, проскальзывающих друг относительно друга; модель в которой слой материала рассматривается как поршень с отверстием в центре, взаимодействующий при своем движении с прослойкой воздуха.

3. Модели сплошной среды. Рассматривают вибрируемый зернистый слой как сплошное тело, вязкую жидкость или идеальный газ.

К недостаткам первой группы моделей можно отнести то, что в них не учитываются силы взаимодействия частицы с другими, окружающими ее

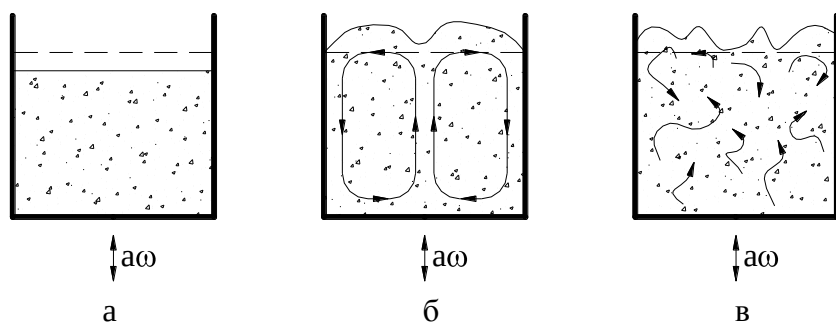


Рисунок 1 – Виды движения зернистого материала под действием вибрации

частицами, силы сопротивления воздушной среды и объемные силы, возникающие в сплошной среде (силы типа архимедовой). Подобные модели пригодны лишь для описания движения отдельных достаточно крупных тел, а также слоя, состоящего из крупных частиц, толщина которого не превышает 20-30-кратного среднего размера частиц. При рассмотрении слоя материала большей толщины модели единичной частицы являются непригодными.

Недостатками моделей второй группы является их сложность и узкоспециализированная направленность, объясняющая процессы, протекающие в материале, обрабатываемом только в отдельно взятых вибрационных машинах.

Наиболее правильным, на наш взгляд, подходом к описанию поведения вибрируемого зернистого слоя является его описание на основе моделей сплошной среды. В этих моделях учитывается взаимодействие частиц или элементарных объемов материала друг с другом и с воздушным потоком, присутствуют объемные силы, возникающие в сплошных средах. Но из всех существующих моделей подобного типа можно выделить лишь одну – модель на основе уравнений Лоренца, объясняющую все три экспериментально наблюдаемые типа поведения вибрируемого зернистого слоя, а именно: дрожание частиц с последующим уплотнением материала; циркуляционные движения; стохастическое поведение.

Во второй главе проводятся параллели между поведением нагреваемого снизу слоя вязкой жидкости и виброоживленным сыпучим материалом. Приводятся основные понятия из современной нелинейной динамики и синергетики и доказываются их применимость к описанию динамики вибрируемого зернистого слоя.

Краеугольным камнем синергетики является понятие о диссипативных структурах как пространственно-временных упорядоченных организациях в физических, механических, химических и биологических системах. Диссипативные структуры включают в себя все типы процессов самоорганизации: колебательные процессы, пространственную упорядоченность, пространственно-временное структурирование, хаотические состояния, что и наблюдается в процессах и аппаратах вибрационного типа.

Для возникновения диссипативных структур необходимы следующие условия, которые выполняются во многих технологических машинах и аппаратах:

1. Система должна быть открытой и постоянно обмениваться веществом и энергией с окружающей средой, т.е. система должна находиться в неравновесном состоянии.
2. В системе должно быть регулирование по типу обратной связи, что отображается нелинейными дифференциальными уравнениями.
3. Отклонения от равновесия превышают критические значения, то есть рассматриваются состояния, лежащие вне термодинамической (равновесной) ветви.
4. Процессы рассматриваются в таком диапазоне параметров, когда для их описания необходимы нелинейные математические модели.

Диссипативные структуры характеризуют поведение системы в целом, которое никак нельзя было предвидеть или понять на основе свойств отдельных ее элементов.

Условия возникновения, устойчивости, перехода из одного неравновесного стационарного состояния в другое были достаточно хорошо изложены И. Пригожиным, который разработал свою теорию на основе термодинамики неравновесных процессов.

За функцию состояния термодинамической системы принимается изменение энтропии:

$$dS = d_i S + d_e S, \quad (1)$$

где $d_i S$ – производство энтропии; $d_e S$ – поток энтропии.

Энтропия обладает следующими свойствами.

1) Энтропия является экстенсивной величиной. Если система состоит из нескольких частей, полная энтропия равна сумме энтропий этих частей. Производство энтропии $d_i S$ вызвано изменениями внутри системы, а поток энтропии $d_e S$ возникает за счет взаимодействия системы с внешней средой.

2) Производство энтропии в реальных необратимых процессах всегда положительно:

$$d_i S > 0. \quad (2)$$

В термодинамике неравновесных процессов на основе уравнения (2) записывается полное условие термогидродинамической устойчивости:

$$P \delta Z' = \int \rho \left[R^{-1} \frac{g \alpha^2 h^4}{\nu} \theta_{,j}^2 + \nu u_{i,j}^2 - 2g \alpha \theta \omega \right] dV > 0. \quad (3)$$

где $P \delta Z'$ – производство избыточной энтропии в любой произвольной части объема термодинамической системы, равновесие которой рассматривается; ρ – плотность; $R = \frac{g \alpha h^4}{\nu \lambda} \beta$ – число Релея; $\beta = -\frac{\partial T}{\partial z} > 0$ – коэффициент, характеризующий изменение температуры T в направлении вертикальной оси z ; g – ускорение свободного падения; α – коэффициент теплового расширения; h – высота слоя вязкой жидкости; ν – кинематическая вязкость; λ – теплопроводность; $\theta_{,j}$ – частная производная от перепада температуры по соответствующей пространственной координате; $u_{i,j}$ – i -тая компонента перепада скорости центра масс системы; ω – перепад скорости потока по высоте слоя.

Применяя условие (3) для исследования конвективной неустойчивости Бенара можно использовать наименьшее из возможных значений числа Релея, при котором возникает неустойчивость. Такое значение числа Релея называется критическим и обозначается R_c . То есть, среда переходит в неустойчивое состояние при условии:

$$R > R_c. \quad (4)$$

Для проверки применимости термогидродинамического математического аппарата в целом, и условия (4) в частности, к описанию динамики вибрируемого зернистого слоя были проведены экспериментальные исследования.

Экспериментальные установки, позволяющие получать прямолинейные вертикальные (рисунок 2а) и горизонтальные (рисунок 2б) колебания оснащались прозрачными сосудами кубической и цилиндрической форм. Изменяя параметры вибрационного воздействия на зернистый материал (просо), находящийся в сосуде, проводились наблюдения за его динамическим состоянием. При переходе материала от одного типа движения к другому фиксировались параметры вибрационного воздействия на него.

В качестве факторов, влияющих на динамическое состояние вибрируемого материала, использовались амплитуда и частота колебаний, а также высота слоя материала. Параметры вибрации измерялись акселерометром Analog Devices ADXL278, позволяющим измерять ускорения одновременно в двух взаимоперпендикулярных направлениях величиной $\pm 50 \text{ g}$ с погрешностью не более 5 %. Показания акселерометра вы-



а)



б)

Рисунок 2 – Общий вид экспериментальных установок

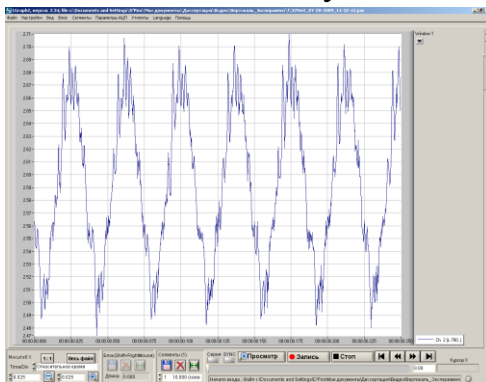


Рисунок 3 – Графическое представление измеряемых параметров вибрации

водились на компьютер (рисунок 3), где подвергались дальнейшей обработке.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность критерия (4), который указывает на переход материала из состояния уплотнения к регулярным циркуляциям, применительно к вибрируемому зернистому материалу.

Третья глава посвящена разработке гидродинамической модели вибрируемого зернистого слоя. В ней получены критерии подобия, позволяющие моделировать поведение виброожиженного сыпучего материала на гидродинамическом программном обеспечении. На основе методов синергетики производится сведение

гидродинамической модели к модели Лоренца. Приводятся результаты компьютерного моделирования динамического поведения вибрируемого зернистого слоя и сравнение с экспериментом.

В предыдущих разделах упоминалось, что виброожиженный слой сыпучего материала напоминает вязкую жидкость и его поведение может быть описано при помощи уравнения Навье-Стокса:

$$\frac{dV}{dt} + \mathbf{V} \nabla \mathbf{V} = \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{F}, \quad (5)$$

где $\mathbf{V}$ – скорость; p – давление; ∇ – оператор Набла; $\mathbf{F}$ – силы, отличающие виброожиженный сыпучий материал от вязкой жидкости.

Для определения последнего слагаемого в правой части выражения (5) было рассмотрено движение частицы материала в сплошной среде виброожиженного сыпучего материала при прямолинейных вертикальных колебаниях (рисунок 4), где: F_{AB} – архимедова сила от действия воздуха, F_{AC} – архимедова сила от действия сыпучего ма-

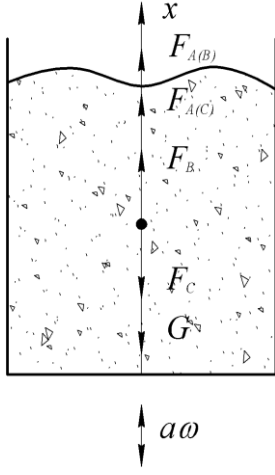


Рисунок 4 – Силы, действующие на частицу в вибро-ожиженном сыпучем материале

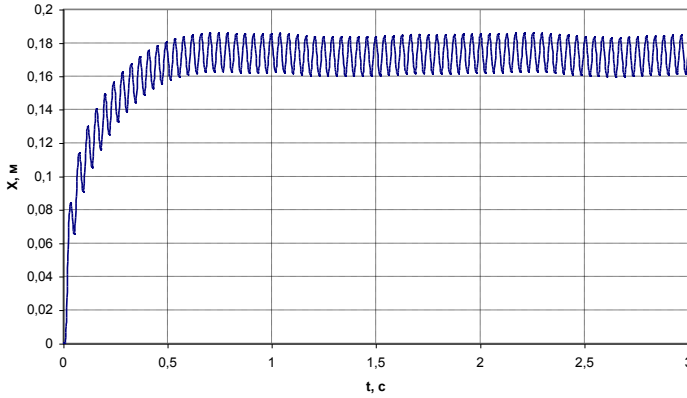


Рисунок 5 – Перемещение частицы под действием вибрации в сыпучем материале

Анализ рисунка 5 показывает, что частица поднимается под действием объемных сил на некоторую высоту и «зависает», совершая колебания на высоте, близкой к поверхности слоя материала.

Подставив выражения для сил, указанных на рисунке 4 в уравнение (5) и записав его в координатной форме для плоской картины движения, получим:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial V_x}{\partial x} V_x - \frac{\partial V_x}{\partial y} V_y \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial V_y}{\partial x} V_x - \frac{\partial V_y}{\partial y} V_y + g \left(\frac{\rho}{\rho_c} + \frac{\rho_B}{\rho_c} - 1 \right) + \frac{6g\rho k f}{d_4 \rho_c} h - y \times \\ &\times \text{sign } V_y - a\omega \cos \omega t \exp -\varepsilon y + \frac{3C_s \rho_s}{4d_4 \rho_c} U_{0y} \exp -\delta y \sin \omega t - V_y \left| U_{0y} \exp -\delta y \sin \omega t - V_y \right| \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

К уравнениям (7) необходимо добавить уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0. \quad (8)$$

Для того, чтобы модель была полной и законченной, к выражениям (7), (8) добавим граничные условия в соответствии с рисунком 6:

териала; F_C – сила сухого трения; F_B – сила динамического напора со стороны воздушного потока; G – сила тяжести.

Дифференциальное уравнение движения частицы с учетом всех сил, действующих на нее (рисунок 4) выглядит следующим образом:

$$\ddot{x} = \frac{3C_s \rho_B}{4d \rho_c} U_0 \exp -\delta x \sin \omega t - \dot{x} \left| U_0 \exp -\delta x \sin \omega t - \dot{x} \right| + \frac{6g\rho k f}{d \rho_c} h_0 - x \text{ sign } \dot{x} - a\omega \cdot \cos \omega t \cdot \exp -\varepsilon x + g \left(\frac{\rho}{\rho_c} + \frac{\rho_B}{\rho_c} - 1 \right), \quad (6)$$

где C_s – коэффициент сопротивления; ρ_s – плотность воздуха; ρ_c – плотность частицы; d – эквивалентный диаметр частицы; U_0 – амплитудное значение скорости воздуха в сечении $X = 0$; δ – коэффициент пространственного затухания скорости воздушного потока; ω – частота колебаний; t – время; ρ – плотность вибро-ожиженного сыпучего материала; k – коэффициент подвижности материала; f – коэффициент внутреннего трения материала; h – высота слоя материала над частицей; h_0 – максимальная высота слоя материала в сосуде; x – текущая координата частицы; a – амплитуда колебаний; ε – коэффициент затухания колебаний в сыпучем материале.

Численное решение уравнения (6) дает траекторию движения частицы (рисунок 5).

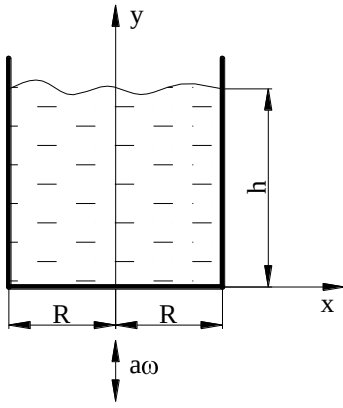


Рисунок 6 – Расположение координатных осей при решении плоской задачи

$$y = 0, V_y = a\omega \cos \omega t$$

$$y = h, V_y = 0, p = p_0$$

$$x = \pm R, V_x = 0, V_y = 0.$$

(9)

Для решения системы (7) при помощи специальных компьютерных программ, моделирующих поведение жидкостей и газов, необходимо получить критерии подобия между виброоживленным сыпучим материалом и вязкой жидкостью. Воспользовавшись методикой из теории подобия и обозначив штрихом безразмерные значения скорости, времени, координат и сил $V'_x = \frac{V_x}{a\omega}$; $V'_y = \frac{V_y}{a\omega}$; $t' = \frac{t}{T}$; $x' = \frac{x}{a}$; $y' = \frac{y}{a}$;

$$p' = \frac{p}{p_0}; h' = \frac{h}{a}; F' = \frac{F}{G}; d' = \frac{d_q}{a}, \text{ получим:}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{T\omega} \frac{\partial V'_x}{\partial t'} &= - \frac{p_0}{\rho a\omega^2} \frac{\partial p'}{\partial x'} + \frac{\nu}{a^2\omega} \left(\frac{\partial^2 V'_x}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 V'_x}{\partial y'^2} \right) - \left(\frac{\partial V'_x}{\partial x'} V'_x + \frac{\partial V'_x}{\partial y'} V'_y \right) \\ \frac{1}{T\omega} \frac{\partial V'_y}{\partial t'} &= - \frac{p_0}{\rho a\omega^2} \frac{\partial p'}{\partial y'} + \frac{\nu}{a^2\omega} \left(\frac{\partial^2 V'_y}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 V'_y}{\partial y'^2} \right) - \left(\frac{\partial V'_y}{\partial x'} V'_x + \frac{\partial V'_y}{\partial y'} V'_y \right) + \\ &+ \frac{g}{a\omega^2} \left(\frac{\rho}{\rho_+} + \frac{\rho_a}{\rho_+} - 1 \right) + \frac{g a k f}{a\omega^2} \frac{h' - y'}{\rho_+ d'} \text{sign } a\omega \left(V'_y - \cos t' \omega T \exp(-\epsilon y' a) \right) \\ &+ \frac{3C_a \rho_a}{4\rho_+} \frac{1}{d'} \left(\exp(-\delta y' a) \sin t' \omega T - V'_y \right) \exp(-\delta y' a) \sin t' \omega T - V'_y \Big| \\ \omega \left(\frac{\partial V'_x}{\partial x'} + \frac{\partial V'_y}{\partial y'} \right) &= 0 \\ y' = 0, V'_y &= \cos \omega t \\ y' = \frac{h}{a} = h', V'_y = 0, p' &= 1 \\ x' = \pm \frac{R}{a}, V'_x = 0, V'_y = 0 \end{aligned} \right\} (10)$$

В системе уравнений (10) полученные безразмерные критерии подобия обведены прямоугольными рамками. По их виду можно судить об аналогии процессов движения, происходящих в псевдожидкости под действием вибрации и в вязкой жидкости. Так, безразмерная величина $\frac{p_0}{\rho a\omega^2}$ представляет собой не что иное, как вибраци-

онный аналог числа Эйлера, величина $\frac{\nu}{a^2\omega}$ – вибрационный аналог числа Рейнольдса,

величина $\frac{g a k f}{a\omega^2} \frac{h' - y'}{\rho_+ d'}$ – вибрационный аналог числа Фруда и, наконец, величина $\frac{g}{a\omega^2}$ –

коэффициент перегрузки.

В результате преобразований получили следующие критерии подобия:

$$\frac{p_0}{\rho a \omega^2}, \frac{v}{a^2 \omega}, \frac{g}{a \omega^2}, \frac{6 \rho k f}{\rho_{\text{ч}}}, \frac{3 C_{\text{с}} \rho_{\text{с}}}{4 \rho_{\text{ч}}}, \frac{h}{a}, \frac{R}{a}, \frac{h_0}{R}. \quad (11)$$

Наибольший интерес среди выявленных критериев подобия представляет вибрационный аналог числа Фруда:

$$Fr_B = \frac{g a k f}{a \omega^2} \frac{h' - y'}{1}. \quad (12)$$

Само же число Фруда в гидродинамике определяется выражением:

$$Fr = \frac{V^2}{gL} \frac{1}{\chi \Delta T}, \quad (13)$$

где V – характерная скорость; L – характерный размер (длина); χ – коэффициент теплового расширения; ΔT – перепад температуры.

Сравнивая выражения (12) и (13), можно провести аналогию:

$$\Delta T \propto h' - y', \quad \chi \propto k f, \quad (14)$$

то есть изменение высоты слоя материала аналогично перепаду температуры, а коэффициент теплового расширения пропорционален произведению коэффициента подвижности материала на коэффициент внутреннего трения. В гидродинамике, при подогреве слоя жидкости снизу и при возникновении конвекционных течений, движущей силой является сила Архимеда, выталкивающая вверх нагретые у нижней кромки жидкости частицы, которые вследствие нагревания становятся легче. При виброожижении движущей силой является подъемная сила от возникающего при вибрации стенок сосуда воздушного потока. Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что перепад температуры в жидкости аналогичен изменению скорости воздушного потока по высоте слоя сыпучего материала.

Моделирование поведения виброожиженного слоя сыпучего материала при помощи программы для гидродинамических расчетов Flow 3D показало все три типа экспериментально наблюдаемых динамических состояния материала: уплотнение (рисунок 7), циркуляционные течения (рисунок 8), стохастическое движение (рисунок 9). Результаты моделирования и их соответствие натурному эксперименту (рисунок 7 - 9) подтверждают справедливость гидродинамической модели и полученных критериев подобия, и дает возможность использования ее для проектирования вибрационных машин с вибрируемым зернистым слоем.

Моделирование поведения виброожиженного слоя сыпучего материала при разработке каждой конкретной вибрационной машины при помощи уравнений Навье-Стокса и использовании гидродинамического программного обеспечения представляет собой весьма непростую задачу. Часто для проектирования вибрационной машины нет необходимости точно знать, как распределяются поля скоростей, ускорений и давлений в объеме материала. Достаточно информации лишь о том, какой режим движения материала будет осуществляться при решении конкретной задачи. Представление о режиме движения материала может дать модель Лоренца. Поэтому для упрощения уравнений Навье-Стокса можно использовать некоторую методику, основанную на принципах синергетики и приводящую к системе более простых дифференциальных уравнений. Такая методика была предложена американским физиком-метеорологом Эдвардом Лоренцом и впоследствии была названа моделью Лоренца. Используем дан-

ную методику для сведения уравнений (7) к системе Лоренца.

К системе уравнений (7) добавим уравнение неразрывности (8), граничные условия (9) и уравнения, описывающие изменение скорости воздушного потока и давления по высоте слоя виброожиженного слоя сыпучего материала. Скорости воздушного потока U , генерируемого вибрирующим контейнером, в сечениях $y=0$ и $y=h$ (рисунок 6) считаем заданными (для данного режима вибрации), поэтому закономерности распределения этих скоростей внутри слоя материала записываем в форме уравнения переноса:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{UV} = \gamma \nabla^2 U, \quad (15)$$

где γ – некоторый коэффициент.

Примем, что скорость воздушного потока изменяется по высоте слоя по следующему закону:

$$U = U_0 + \Delta U - \frac{\Delta U}{h} y + \theta_{x,y,t}, \quad (16)$$

где $\theta_{x,y,t}$ – отклонение скорости от линейного профиля.

Приведем пояснения к выражению (16). Будем считать, что скорость воздушного потока у вибрирующего рабочего органа (днища) равна $U_0 + \Delta U$, а у верхней кромки виброожиженного слоя материала высотой h она уменьшается на некоторую величину ΔU и равна U_0 . Тогда в любом текущем уровне по высоте слоя с координатой y линейное изменение скорости будет составлять величину $\frac{\Delta U}{h} y$.

Предположим, что плотность материала зависит от скорости воздушного потока, проходящего через материал, и изменяется по зависимости

$$\rho = \rho_0 (1 - \eta (U - U_0)), \quad (17)$$

где η – коэффициент расширения материала от скорости воздушного потока (аналог коэффициента теплового расширения).

Положим, что давление в слое материала изменяется по следующим образом:

$$p = p_0 - \rho_0 g (1 - \eta (U - U_0)) y + \tilde{p}_{x,y,t}, \quad (18)$$

где $\tilde{p}_{x,y,t}$ – отклонение поля давлений от гидростатического давления.

Сведем все представленные уравнения в одну систему, которая и будет оценивать динамику виброожиженного слоя:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \nabla \cdot \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{V} + g \left(\frac{\rho}{\rho_q} + \frac{\rho_s}{\rho_q} - 1 \right) + \frac{6g\rho k f}{d_q \rho_q} (h - y) + \frac{3C_s \rho_s}{4d_q \rho_q} (U - V)^2 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{UV} = \gamma \nabla^2 U \\ \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \\ U = U_0 + \Delta U - \frac{\Delta U}{h} y + \theta_{x,y,t} \\ \rho = \rho_0 (1 - \eta (U - U_0)) \\ p = p_0 - \rho_0 g (1 - \eta (U - U_0)) y + \tilde{p}_{x,y,t} \end{array} \right. \quad (19)$$

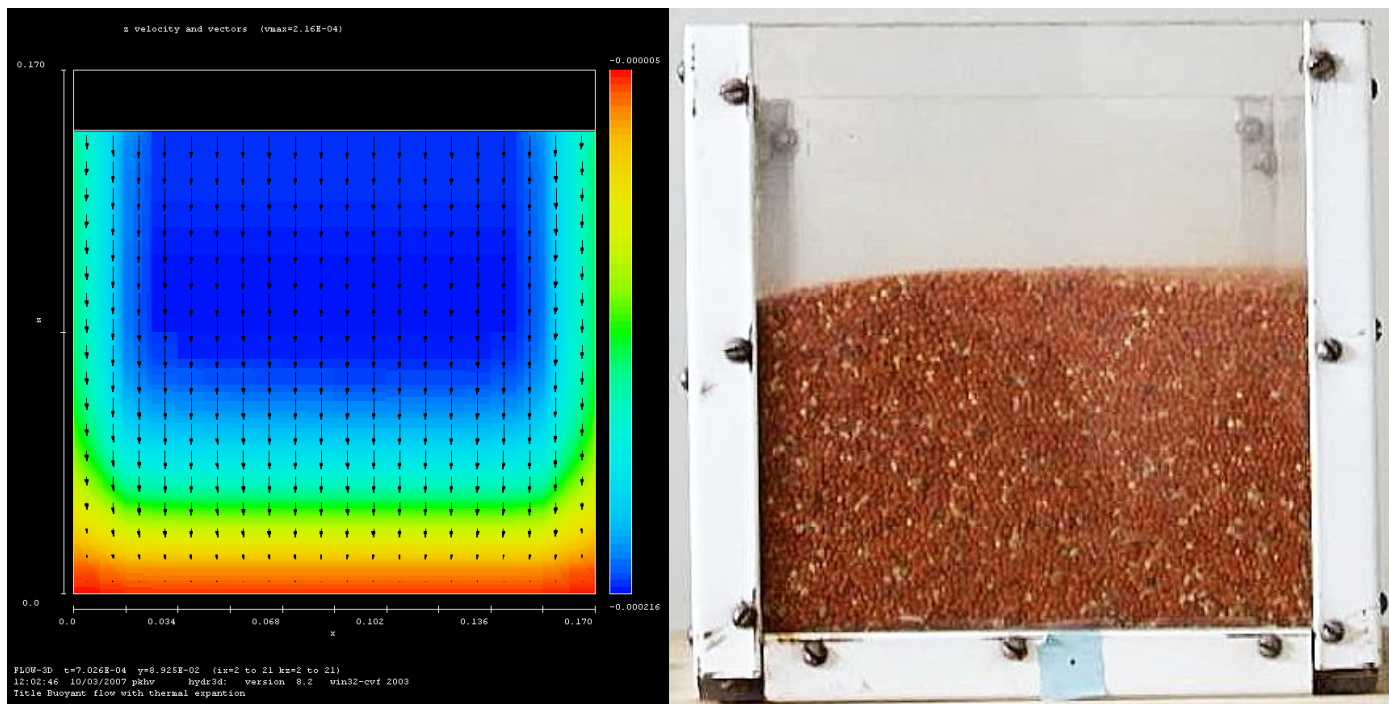


Рисунок 7 – Поле скоростей в режиме движения с уплотнением материала и экспериментально наблюдаемое уплотнение зерен проса

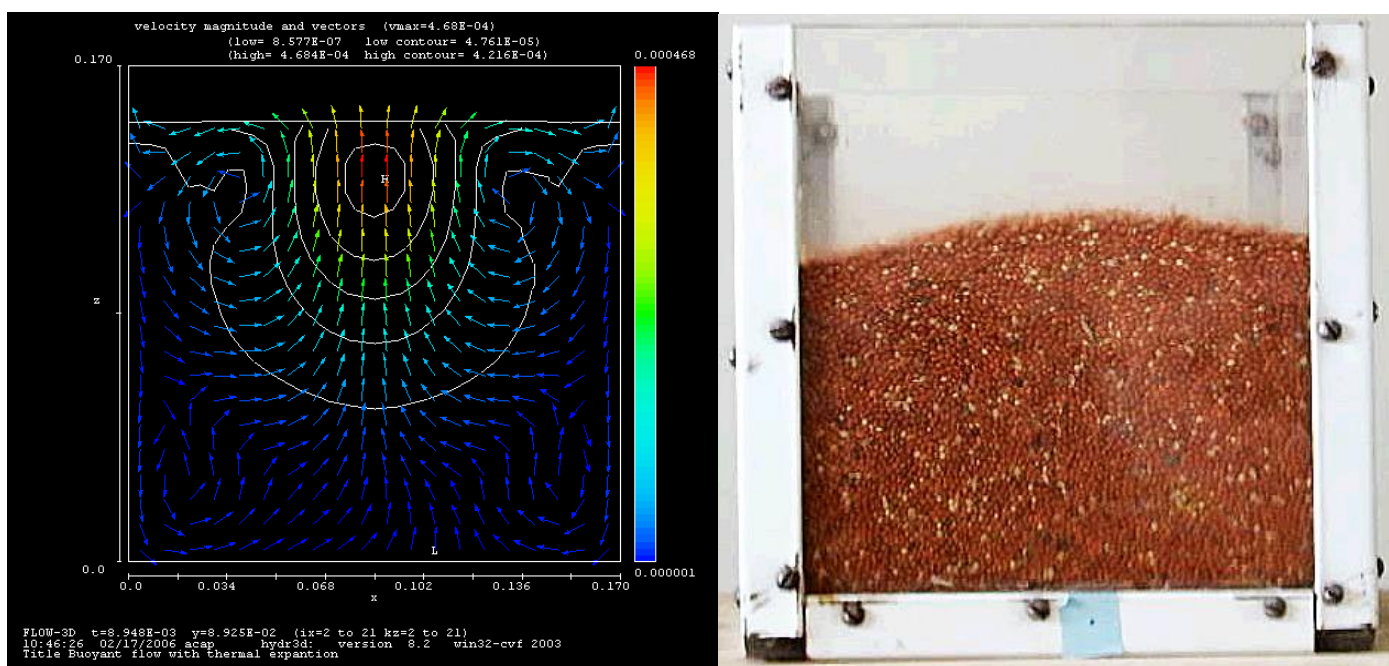


Рисунок 8 – Поле скоростей в режиме циркуляции и циркуляционное движение зерен проса с образованием ячеек Бенара, наблюдаемое в эксперименте

Используя методику Лоренца, сводим систему уравнений (19) к более простой системе нелинейных дифференциальных уравнений, именуемых моделью Лоренца, представляющую собой динамическую систему с трехмерным фазовым пространством (x, y, z) :

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y - x) \\ \dot{y} = rx - y + xz, \\ \dot{z} = xy - bz \end{cases} \quad (20)$$

где σ , r и b – параметры модели Лоренца.

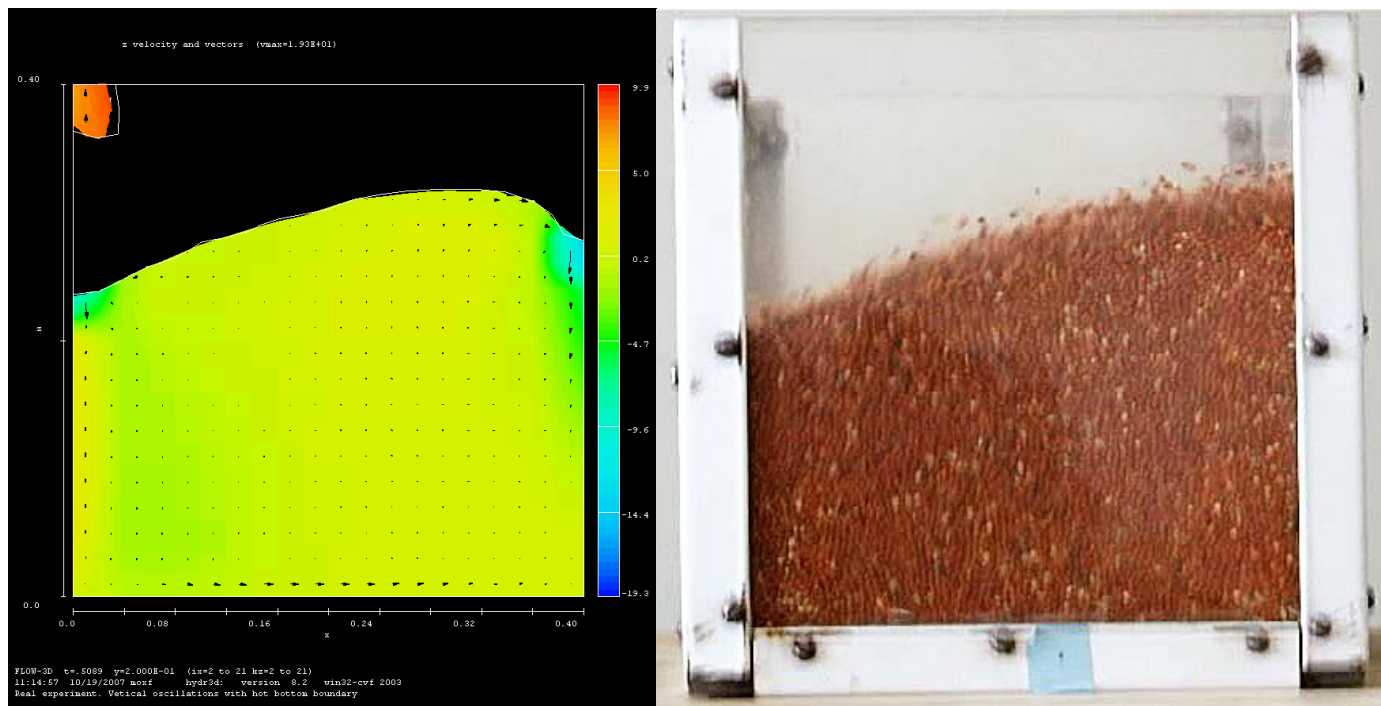


Рисунок 9 – Хаотический режим движения зернистого слоя с выбрасыванием материала за пределы сосуда

Параметры модели Лоренца определяются из выражений:

$$\sigma = \frac{\nu}{\gamma}; \quad r = \frac{\Delta U \alpha^2 \eta g}{h \nu \gamma \alpha^2 + \beta^2}; \quad b = \frac{4}{1 + c^2}, \quad (21)$$

где $\beta = \frac{\pi}{h}$, $\alpha = \frac{\pi}{R} = \frac{\pi c}{h}$, m и n – целые, c – отношение высоты h ячейки циркулирующего материала к ее ширине R .

Физический смысл переменных, входящих в уравнения системы (20) определяется следующим образом. Переменная x характеризует скорость вращения псевдожидкости в ячейке Бенара, переменная y характеризует изменение скорости воздушного потока по высоте слоя, переменная z характеризует отклонение вертикального профиля скорости воздушного потока от линейной зависимости. Из физического смысла этих переменных следует, что абсолютную скорость движения материала можно получить, сочетая все три переменных одновременно. Параметр σ есть отношение эффективной кинематической вязкости к коэффициенту γ , то есть $\frac{\nu}{\gamma}$. Если провести анало-

гию с гидродинамикой, где знаменатель рассмотренного выражения является коэффициентом температуропроводности, то γ при виброожижении сыпучего материала можно назвать «коэффициентом проводимости скорости воздушного потока» или, наоборот, «коэффициентом затухания скорости воздушного потока». Любая из предложенных формулировок говорит о том, что коэффициент γ влияет на интенсивность изменения скорости воздуха по высоте слоя материала. Параметр σ в гидродинамике называют числом Прандтля, мы назовем его вибрационным аналогом числа Прандтля. В главе 2 было рассмотрено условие устойчивости стационарного состояния (4), которое характеризуется числом Рэлея, при определенных критических значениях которого в конвекционных потоках жидкости возникают ячейки Бенара. В классической гидро-

динамике число Релея записывается следующим образом:

$$R = \frac{g\chi L^3 \Delta T}{\nu \lambda}, \quad (22)$$

где λ – коэффициент температуропроводности.

Критическое значение числа Релея определяется по формуле:

$$R_c = \frac{\pi^4}{c^2} \frac{1+c^2}{c^2}. \quad (23)$$

В соответствии с (14) и (22) запишем вибрационный аналог числа Релея:

$$R_B = \frac{\Delta U \eta g h^3}{\nu \gamma}. \quad (24)$$

Параметр r , входящий во второе уравнение системы (20) и представленный в (21), есть не что иное, как отношение вибрационного аналога числа Релея к его критическому значению:

$$r = \frac{R_B}{R_c}. \quad (25)$$

То есть при значениях $r < 1$ в виброожиженном сыпучем материале не должно возникать циркуляционных потоков материала, подобных ячейкам Бенара в жидкости, а при значениях $r > 1$ такие ячейки должны появиться. Тогда условие (14) применительно к модели Лоренца можно записать как:

$$r > 1. \quad (26)$$

Условие (26) показывает, что модель Лоренца учитывает энтропийный подход к определению характера движения вибрируемого зернистого слоя. Кроме того, многими исследователями экспериментально подтверждены факты работоспособности условия (26). В нашей работе также проведен эксперимент, подтверждающий справедливость условия (26). Данное обстоятельство указывает на то, что методы, предлагаемые синергетикой, дают возможность адекватно оценить динамическое состояние вибрируемого зернистого слоя.

Параметр b , входящий в третье уравнение системы (20), определяется размерами возникающих в материале ячеек.

В работах Федоренко И.Я. имелись попытки привести гидродинамическую модель виброожиженного слоя зернистого материала, основанную на использовании уравнения Навье-Стокса, к модели Лоренца. Также были получены три управляющих параметра σ , r и b , входящие в модель Лоренца, при которых происходят бифуркационные переходы, подтвержденные экспериментально. Параметры модели Лоренца, полученные в работах Федоренко И.Я. выглядят следующим образом:

$$\sigma = \frac{a\omega h}{\nu}, \quad r = \frac{a\omega^2}{g}, \quad b = \frac{4}{1 + \left(\frac{h}{D}\right)^2}, \quad (27)$$

где D – характерный поперечный размер сосуда.

Попробуем несколько уточнить параметры (27), прояснив смысл коэффициента γ , входящего в выражение для σ (21).

Сравнивая выражения (21) и (27), можно видеть, что параметр b имеет абсолютно одинаковое значение, параметры σ , и r несколько отличаются, но довольно схожи. Для того, чтобы унифицировать параметры σ и r , в выражениях (21) и (27), введем

некоторые коэффициенты. Для унификации параметра σ коэффициент затухания скорости воздушного потока примем равным

$$\gamma = \frac{\nu^2}{a\omega h}. \quad (28)$$

Выражение (28) не лишено смысла, так как скорость воздушного потока зависит от параметров вибрации a и ω , от высоты слоя h и от физико-механических свойств зернистого материала, которые представляет эффективная кинематическая вязкость ν . Тогда выражение для параметра r с учетом (28) будет выглядеть как

$$r = \frac{\Delta U \eta g}{\nu a \omega h^2 + R^2} \text{ или } r = K \frac{a \omega^2}{g}, \quad (29)$$

где

$$K = \frac{\Delta U \eta g^2}{\nu a^2 \omega^3 h^2 + R^2}. \quad (30)$$

Для определения типа движения сыпучего материала при разработке вибрационной машины необходимо определять параметры модели Лоренца (21), соответствующие конкретной машине и решать систему (20) при полученных значениях этих параметров. Система уравнений (20) допускает только численное решение. Результаты этого решения удобнее всего выводить в графическом виде (рисунок 10).

Решение системы (20) можно получить в любом современном математическом пакете, в нашем случае использовался MATLAB.

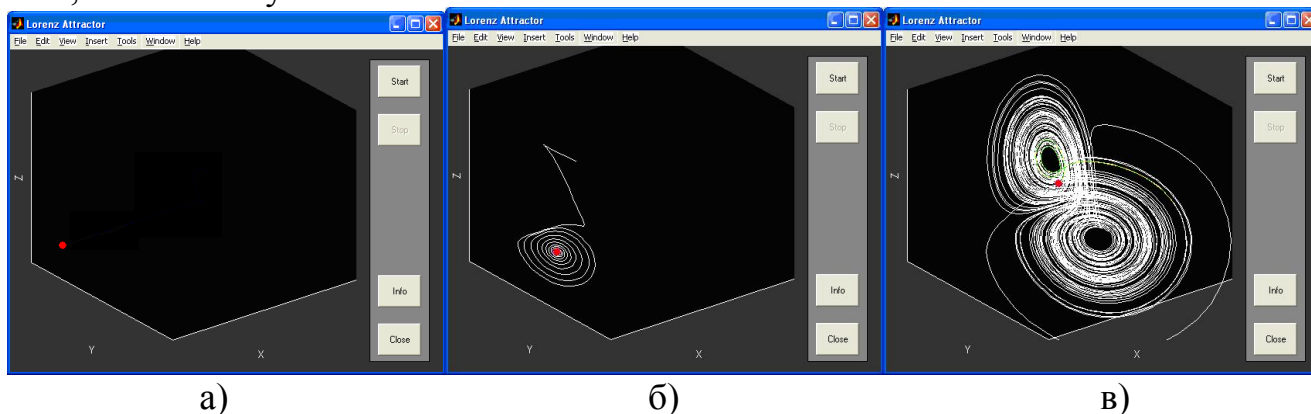


Рисунок 10 – Графическое решение системы Лоренца

По построенным графикам (рисунок 10) можно судить о режиме движения материала. Поскольку переменная x в системе Лоренца (20) характеризует скорость вращения зернистого материала в ячейке Бенара, то именно по ее величине и можно определить режим движения материала. Так, графики с неподвижной точкой (рисунок 10а) или предельным циклом с короткой траекторией, конечная точка которой лежит вблизи нулевого значения по оси x , соответствуют неподвижному режиму с уплотнением материала. Предельный цикл с длинной траекторией (рисунок 10б), конечная точка которой соответствует постоянному по величине и ненулевому значению переменной x , говорят о циркуляционном движении материала. Если же на графике отображается странный аттрактор, который показывает постоянно изменяющуюся скорость циркуляции материала, то режим движения является хаотическим (рисунок 10в).

Использование графического представления результатов решения системы Лоренца не очень удобно применять на практике, так как сложно провести границу, ска-

жем, между предельным циклом с короткой либо длинной траекторией или между аттракторами с плотным наложением траекторий или с их широким спектром. Поэтому в математике существует критерий, по которому оценивается степень хаотичности динамической системы. Таким критерием является показатель Ляпунова.

Система Лоренца имеет фазовую размерность равную трем, поэтому для нее вычисляется три показателя Ляпунова $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. Степень хаотичности определяется по знакам показателей Ляпунова следующим образом. Если знаки показателей Ляпунова получаются в виде $<- - ->$, то вид траектории – притягивающая неподвижная точка, $<0 - ->$ – предельный цикл с короткой траекторией, $<0 0 ->$ – предельный цикл с длинной траекторией или аттрактор с плотным наложением траекторий, $<+ 0 ->$ – странный аттрактор с широким спектром траекторий.

Таким образом, получив решение уравнений (20) в графическом виде, либо вычислив степень хаотичности этого решения при помощи показателей Ляпунова можно совершенно точно определить тип движения сыпучего материала в конкретной вибрационной машине.

В четвертой главе представлен общий алгоритм расчета вибрационных машин на основе изложенных в предыдущей главе теоретических положений. В соответствии с общим алгоритмом расчета представлены методики расчета дозатора, смесителя и очистителя для сыпучих кормовых материалов.

При проектировании новой машины ее конструктивные параметры и геометрические размеры рабочих органов, влияющие на динамическое состояние обрабатываемого зернистого материала, разрабатываются с «нуля». Для того, чтобы расчеты были последовательными, не упускали различных «мелочей» при проектировании, необходима методика, в соответствии с которой и производится разработка вибрационной машины.

Общий алгоритм расчета новой машины с вибрируемым зернистым слоем представлен на рисунке 11.

Дадим пояснения к рисунку 11 и представим основные шаги при разработке новой вибрационной машины.

- 1) Исходя из назначения вибрационной машины, задают, какой тип динамического состояние вибрируемого зернистого слоя необходимо получить (уплотнение, регулярные циркуляции, хаотическое движение). Поскольку разработка ведется согласно гидродинамической теории, сведенной к уравнениям Лоренца (20), то динамическое состояние вибрируемого слоя является функцией многих переменных, от которых зависят параметры модели Лоренца f, H, D, h, a, ω , где H – высота слоя материала. Поэтому в зависимости от необходимой производительности и требований к размерам вибрационной машины задаются предварительными значениями величин H, D, h, a, ω .
- 2) Для нахождения величины параметра σ модели Лоренца необходимо знать величину эффективной кинематической вязкости вибрируемого зернистого слоя $\nu = f, H, D, h, a, \omega$, которая входит в выражение для σ (27). Поэтому были проведены экспериментальные исследования по определению вязкости некоторых кормовых зернистых материалов, подвергаемых вибрационной обработке, о которых будет сказано ниже. По уравнениям регрессии, полученным в результате

эксперимента, определяют эффективную кинематическую вязкость ν вибрируемого зернистого слоя.

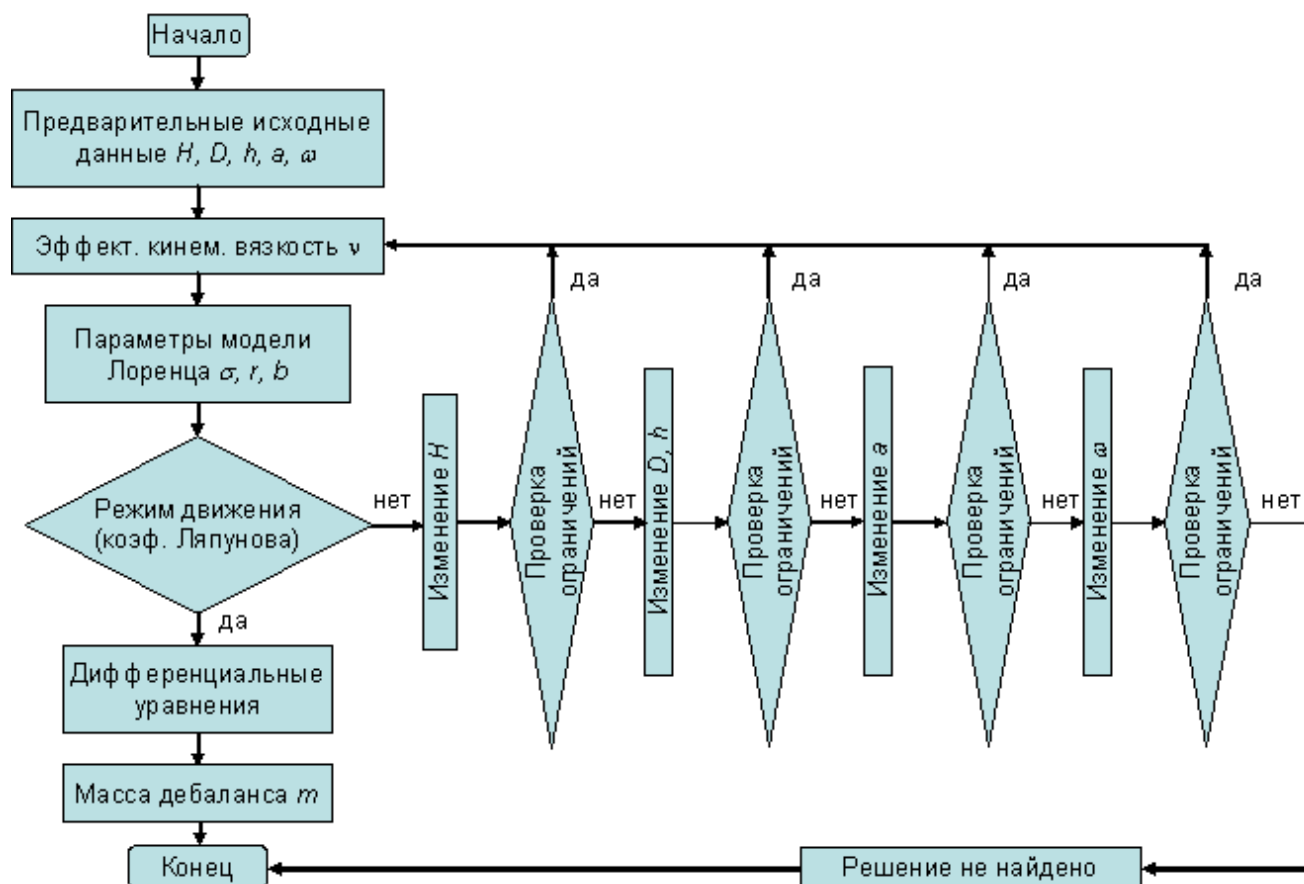


Рисунок 11 – Блок-схема для расчета машин с вибрируемым зернистым слоем

- 3) По выражениям (27) определяют параметры модели Лоренца σ , r , и b .
- 4) Решая систему уравнений (20), что предпочтительно, либо при помощи коэффициентов Ляпунова, находят режим движения вибрируемого зернистого слоя. Если режим движения виброожиженного материала соответствует заданному в пункте 1, то исходные данные H , D , h , a , ω принимаются для дальнейшего расчета вибрационной машины. В противном случае величина исходных данных изменяется с определенным шагом в установленных пределах, а после каждого изменения происходит перерасчет характеристик движения материала до тех пор, пока не будет получен требуемый режим движения. Приоритет в выборе любой из переменных H , D , h , a , ω определяется проектировщиком машины, исходя из того, какую из переменных в каждом конкретном случае проще изменить. В случае, если требуемый режим движения не получен ни при каких значениях исходных данных H , D , h , a , ω , необходимо изменить пределы их варьирования, либо изменить конструкцию вибрационной машины.
- 5) Составляется расчетная схема машины как колебательной системы.
- 6) Для полученной колебательной системы составляются дифференциальные уравнения движения самой машины и вибропривода.
- 7) Получение, путем решения дифференциальных уравнений, необходимой массы дебалансов m , либо других параметров, зависящих от конструкции вибропривода, обеспечивающих заданную интенсивность вибрации и динамическое состояние обрабатываемого материала.

Для использования модели Лоренца при расчете вибрационных машин, необходимо знать величину эффективной кинематической вязкости обрабатываемого сыпучего материала, так как параметр σ , входящий в первое уравнение модели Лоренца зависит от вязкости (27).

В связи с вышесказанным возникла необходимость проведения экспериментальных исследований по определению эффективной кинематической вязкости. На кафедре механизации животноводства Алтайского ГАУ был разработан вискозиметр для измерения вязкости в вибрируемом зернистом слое, на конструкцию которого был получен патент РФ. Принципиальная схема вискозиметрической установки приведена на рисунке 12.

В качестве факторов были приняты: X_1 – высота слоя H (м); X_2 – расстояние от дна контейнера до струны h (м); X_3 – амплитуда колебаний a (м); X_4 – частота колебаний ω (с⁻¹).

Эксперимент проводился для различных зерновых материалов: пшеница цельная, дерть пшеничная, горох, дерть гороховая, просо, для каждого из которых было получено соответствующее уравнение регрессии.

На основе общего алгоритма расчета (рисунок 11) представим методику расчета для конструкции многокомпонентного вибрационного дозатора, предложенной на кафедре механизации животноводства Алтайского ГАУ.

Дозатор (рисунок 13а) содержит бункер 10, разделенный вертикальными перегородками на четыре равных отсека (по числу компонентов). Система возбуждения, включающая тросовые подвески 1 и вибровозбудитель 4, приводит в движение виброднище 3 с побудительным конусом 2.

Технологический процесс вибрационного дозатора протекает следующим образом (рисунок 13а). Исходные компоненты загружаются в отсеки бункера 10. При включении вибровозбудителя 4 дебалансы генерируют вынуждающую силу, которая

вызывает колебания побудительного конуса 2 и виброднища 3. Побудительный конус 2 (рисунок 13б) и прикрепленные к нему лопасти 6 служат для создания требуемого динамического состояния сыпучей среды, отделяемой от общей ее массы находящимися в бункере отражающими козырьками 7, предотвращающими распространение вибраций в верхние слои материала.

Конструктивно все секции дозатора, предназначенные для компонентов с различными физико-

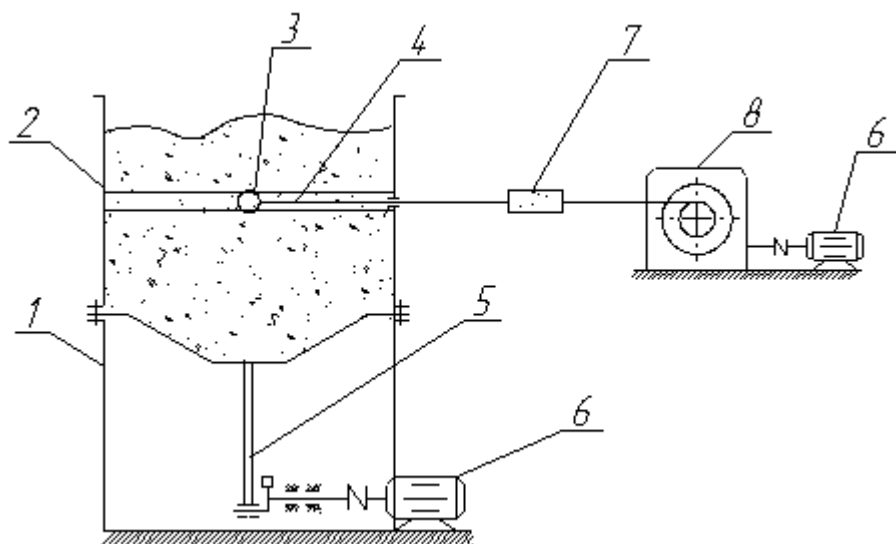


Рисунок 12 – Принципиальная схема вискозиметрической установки:

1 – рама; 2 – контейнер; 3 – сфера; 4 – струна; 5 – эксцентриковый привод; 6 – электродвигатель; 7 – датчик; 8 – редуктор

механическими свойствами, имеют одинаковую частоту и амплитуду колебаний. Поэтому высота лопаток 6, и расстояние между ними, в каждом отсеке дозатора различны и служат для создания особого динамического состояния среды – эффекта, при котором материалы с разными свойствами приводятся к единому состоянию с требуемой вязкостью и текучестью. Геометрические характеристики лопаток 6 для каждой секции подбираются при помощи модели Лоренца.

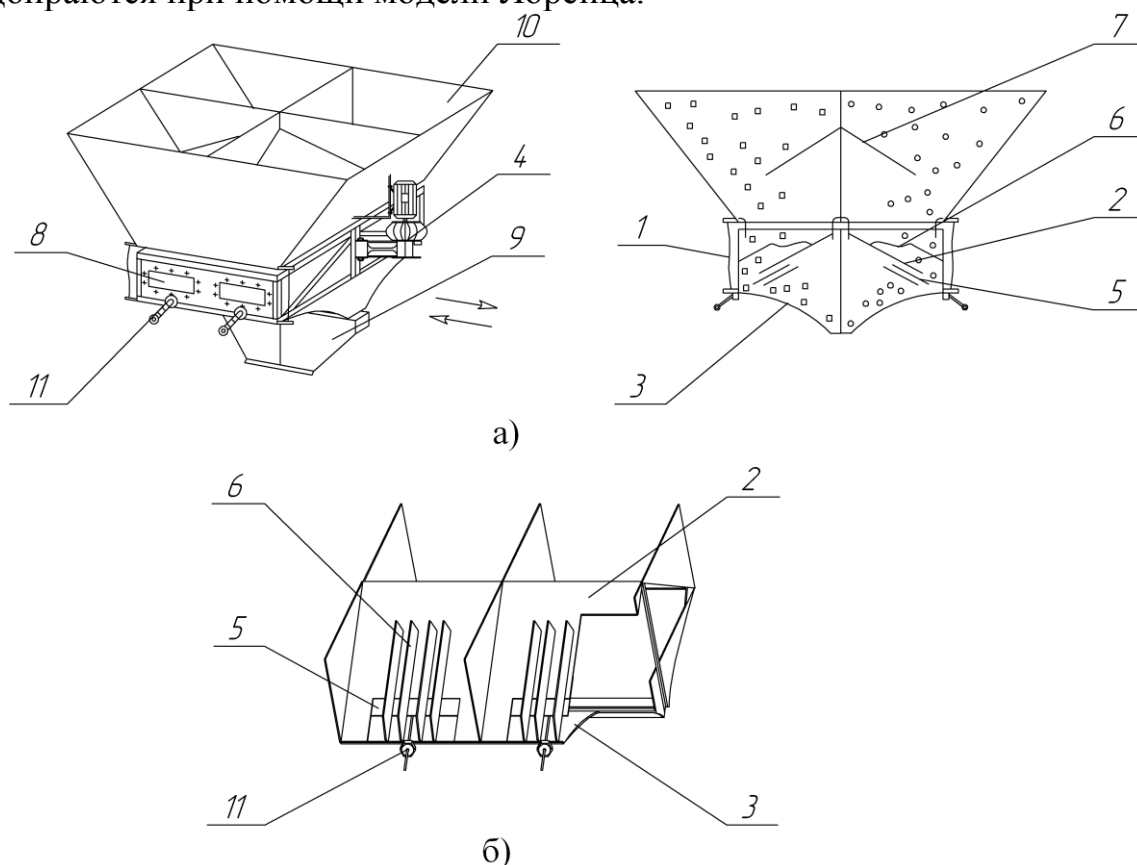


Рисунок 13 – Многокомпонентный вибрационный дозатор

Под действием эффекта псевдооживления зернистые материалы легко истекают через зазор вниз равномерным слоем и попадают на виброднище 3, транспортируются по нему и выводятся из дозатора. Заданная подача каждой секции устанавливается при помощи заслонок 5 вращением регулировочных винтов 11.

Методику расчета дозатора составляем согласно алгоритму расчета (рисунок 11).

1) Назначаем исходные данные.

Конструктивно-технологическими параметрами дозатора, влияющими на качество его работы, являются: расстояние D между побудительными пластинами, высота пластин h , разница H между максимально возможной высотой слоя материала над виброднищем в районе выгрузного окна и высотой пластин, частота колебаний ω , амплитуда колебаний a .

Расстояние $D = 30$ мм и максимальная высота слоя материала равная 170 мм приняты конструктивно. Частота вращения асинхронного двигателя привода, а значит и частота колебаний $\omega = 156 \text{ с}^{-1}$. Конструкция дозатора допускала возможность изменения высоты побудительных лопаток h в пределах от 25 до 75 мм и амплитуды колебаний в пределах от 0 до 1,8 мм. Наилучшим режимом движения материала для протекания процесса дозирования является режим циркуляционных движений.

2) Определяем эффективную кинематическую вязкость материала.

Определение эффективной кинематической вязкости материала производится по экспериментально полученным уравнениям регрессии, в которые входят следующие факторы: высота слоя материала, высота над вибрируемой поверхностью (на которой определяется величина вязкости), частота и амплитуда колебаний.

За высоту слоя материала примем величину H из пункта 1.

Поскольку нам необходимо знать вязкость материала непосредственно в месте его истечения, то высоту над вибрируемой поверхностью примем равной нулю, то есть будем определять величину вязкости на поверхности виброднища.

Частота колебаний назначена в пункте 1.

Амплитуду колебаний найдем из следующих соображений. Режим движения материала должен быть циркуляционным. Согласно гидродинамической теории зарождение циркуляций происходит при величине коэффициента перегрузки $r > 1$. Согласно же экспериментальным данным циркуляции могут начать образовываться при условии $1 < r < 2$. Поэтому для того, чтобы в дозаторе гарантированно началось образование циркуляционного режима движения, без чего невозможен процесс дозирования, примем значение $r = 2$. Зная значение частоты колебаний ω и величину параметра r , исходя из выражения (27) найдем значение амплитуды колебаний:

$$a = \frac{rg}{\omega^2} = \frac{2 \cdot 9,81}{156^2} = 0,00081 \text{ м.}$$

3) Определяем значения параметров модели Лоренца.

Значение параметра $r = 2$, принято в пункте 2. Для определения параметра b необходимо знать характерные размеры сосуда, в котором происходит движение материала. В дозаторе материал переходит в виброоживленное состояние между возбуждающими пластинами, поэтому за характерную ширину сосуда примем расстояние между пластинами $D = 30$ мм. Для вычисления параметров σ и b необходимо знать высоту слоя материала в сосуде. За высоту слоя материала в сосуде примем высоту пластин h , считая такой «сосуд», образованный пластинами, заполненным материалом доверху.

При фиксированных значениях величин a , ω и D , принятых в предыдущих пунктах, определяем по модели Лоренца режим движения материала, варьируя высотой пластин h в заданных пределах от 25 до 75 мм с шагом в 2 мм, производя каждый раз пересчет значения эффективной кинематической вязкости, параметров σ , b и режима движения материала.

В результате расчета выясняется, что режим движения при любом значении высоты пластин, изменяющейся в указанном диапазоне, согласно модели Лоренца получается циркуляционным. То есть процесс дозирования будет осуществляться при любом значении h от 25 до 75 мм.

Для принятия окончательного решения о том какая высота пластин обеспечит наилучшее качество дозирования, необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

4) Составляем расчетную схему дозатора, как колебательной системы и определяем необходимую массу дебаланса.

Исходя из конструкции дозатора, описанной выше, была его составлена расчетная схема (рисунок 15).

Расчетная схема предполагает, что дозатор является двухмассовой вибрацион-

ной машиной, в которой вибровозбудитель 1 (рисунок 15), включающий дебаланс 7 на упругой подвеске 6, приводится во вращение при помощи электродвигателя (на рисунке не показан) с постоянной угловой скоростью ω . Колебательные движения дебаланса 7, имеющего массу m_1 , передаются дозатору 3, имеющему массу m_2 и закрепленному на тросовых подвесках 5, посредством шатуна 2. Упруго-вязкий элемент 4 моделирует восстанавливающую силу, возникающую при отклонении дозатора от положения равновесия, и силы вязкого сопротивления, возникающие внутри виброожиженного сыпучего материала.

Составляем уравнения Лагранжа второго рода, приняв за обобщенные координаты угол φ и перемещение дебаланса U (рисунок 15):

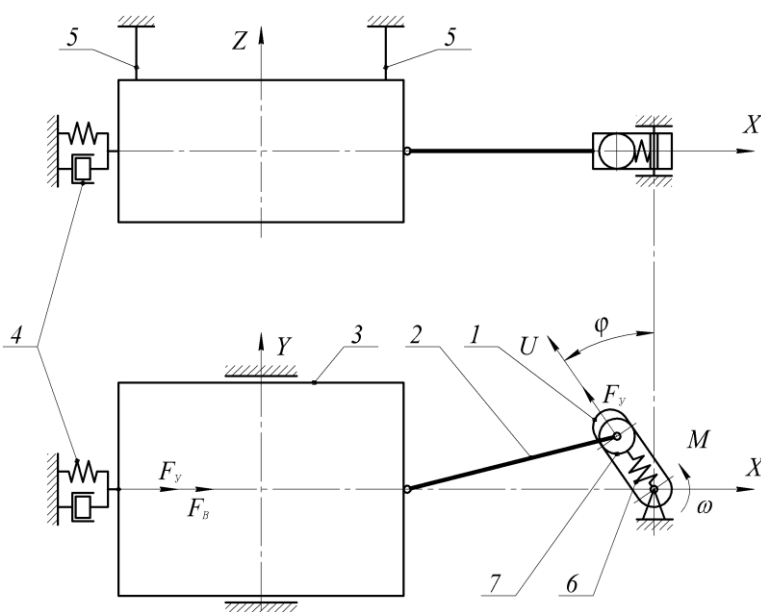


Рисунок 15 – Расчетная схема вибрационного дозатора

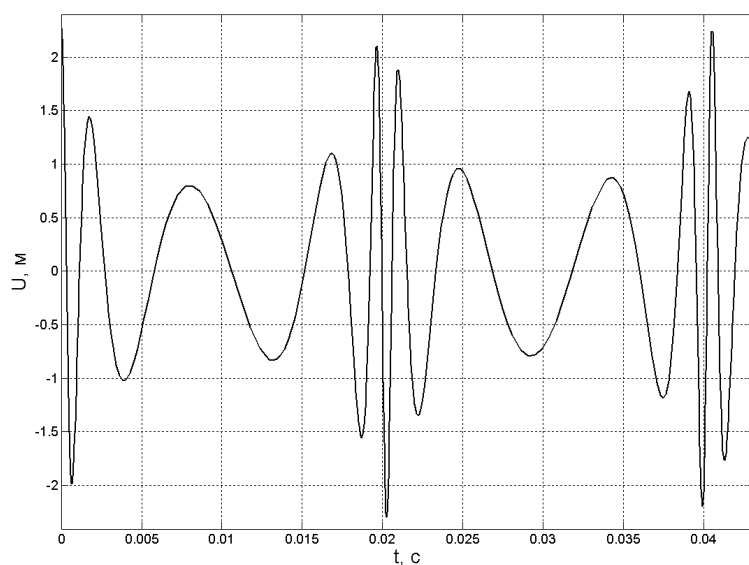


Рисунок 16 – График зависимости координаты U от времени

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} &= F_{\varphi}, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{U}} \right) - \frac{\partial T}{\partial U} &= F_U \end{aligned}, \quad (31)$$

где t - время; T - кинетическая энергия системы; F_{φ} , F_U - обобщенные силы.

Расписав составляющие системы (31) выражения и решив ее относительно массы дебаланса, получаем, что для осуществления колебаний с частотой $\omega = 156 \text{ с}^{-1}$ и амплитудой $a = 0,81 \text{ мм}$, при массе дозатора $m_2 = 60 \text{ кг}$ и длине тросовых подвесок $l = 200 \text{ мм}$, масса дебаланса m_1 составляет $0,4 \text{ кг}$. При массе дебаланса $m_1 = 0,4 \text{ кг}$ решение системы (31) относительно амплитуды движения дебаланса U представлено на рисунке 16.

Так, согласно рисунку 16, наибольшая величина амплитуды дебаланса U соответствует тому положению дебаланса, при котором угол φ равен 0 либо 180° , а наименьшая амплитуда колебания дебаланса $U = 0,81 \text{ мм}$, совпадающая по величине с амплитудой колебаний дозатора, получается при угле φ равном 90° либо 270° , что хорошо согласуется с экспериментальными данными (рисунок 17).

Согласно экспериментальным

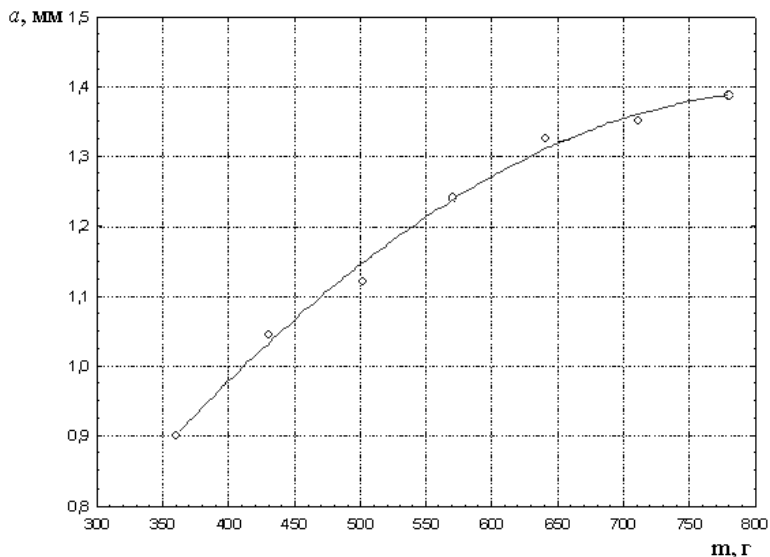


Рисунок 17 – Зависимость амплитуды колебаний от массы дебаланса

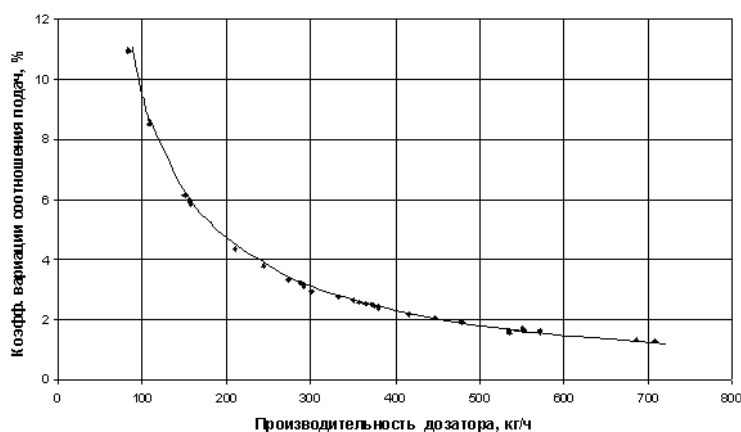


Рисунок 18 – Зависимость коэффициента вариации подачи от производительности вибрационного дозатора

данным (рисунок 18) наименьший коэффициент вариации подачи цельной пшеницы, составляющий менее 3 % при подаче двумя секциями свыше 300 кг/ч, дозатором был достигнут при следующих параметрах: частота колебаний $\omega = 156 \text{ с}^{-1}$; амплитуда колебаний a от 0,91 до 1,09 мм, параметр $b = 0,55$; при массе дозатора $m_2 = 60 \text{ кг}$.

Возможность применения теоретических исследований к расчету смесителей показана на опытном образце вибрационного смесителя для сыпучих материалов, разработанного в Алтайском ГАУ (рисунок 19).

Вибрационный смеситель (рисунок 19) представляет собой цилиндрическую камеру смешивания 2, прикрываемую сверху крышкой 1. Снизу камеры смешивания 2 установлено гибкое виброднище 3. Гибкое виброднище 3 соединено шатуном 4 с эксцентриковым виброприводом 5, который приводится электродвигателем 7. В гибком виброднище 3 имеется выгрузное отверстие 12, которое при помощи гофры 11 соединено с выгрузным патрубком 9,

перекрываемым заслонкой 10. Вся конструкция смесителя установлена при помощи стоек 6 на основании 7.

Исходные компоненты для смешивания загружаются в камеру смешивания 2 сверху. После включения электродвигателя 8 виброднище 3 совершает прямолинейные вертикальные колебания. Колебательные движения передаются обрабатываемому материалу, который в зависимости от параметров вибрации может иметь различные динамические состояния. После завершения процесса смешивания открывается заслонка 10, и готовая смесь проходя через выгрузное отверстие 12, гофру 11 и патрубок 9 выгружается из смесителя.

Смеситель имеет возможность совершать колебания амплитудой a равной 3, 5, 7 или 9 мм путем смены эксцентриков в вибровозбудителе 5 (рисунок 19). Частота колебаний ω неизменна и составляет 150 рад/с.

Анализ конструкции смесителя позволяет сказать, что обрабатываемый в нем материал будет представлять собой слой сплошной среды, поперечный размер которого будет равен внутреннему диаметру камеры смешивания, а высота будет равна расстоянию от виброднища до верхней свободной поверхности слоя.

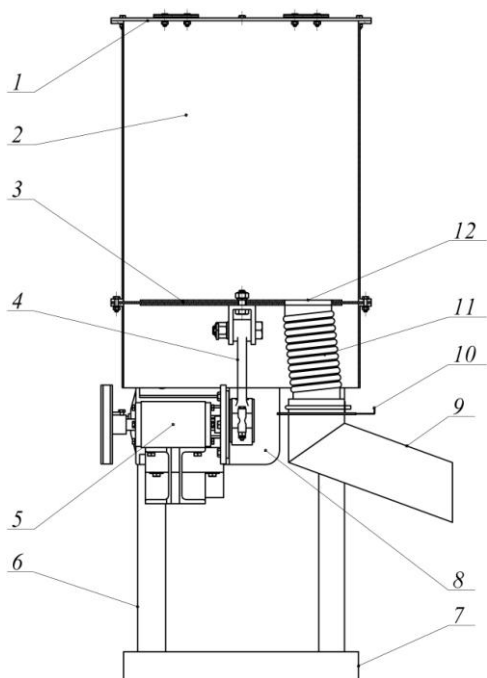


Рисунок 19 – Вибрационный смеситель

Смешивание целесообразно производить при полной загрузке смесительной камеры, поэтому исходя из размеров смесителя, поперечный размер слоя D составил 420 мм, а высота слоя материала h 350 мм.

Расчеты по модели Лоренца, которые проводились при помощи математического пакета MATLAB для пшеничной дерти, показали, что при частоте колебаний $\omega = 150$ рад/с, поперечном размере слоя $D = 420$ мм, высоте слоя $h = 350$ мм и любом значении амплитуды колебаний $a = 5, 7$ или 9 мм, отображающая точка в фазовом пространстве переменных x, y и z рисовала предельный цикл. Это означает, что при указанных параметрах вибрации в исследуемом материале будет наблюдаться циркуляционный режим движения, который вполне подходит для осуществления процесса смешивания.

Для выбора наиболее подходящего значения амплитуды колебаний, при которой будет наблюдаться наибольшая однородность смеси, были проведены экспериментальные исследования, которые показали, что процесс смешивания происходит наиболее интенсивно при $a = 7$ мм.

При помощи модели Лоренца можно определить не только характер движения обрабатываемого материала, но и энергетические характеристики процесса смешивания. Поскольку переменная x системы (20) характеризует скорость циркуляции материала в ячейках Бенара, то, зная значение x и массу материала для конкретного режима обработки, можно определить такой энергетический показатель процесса смешивания как аналог кинетической энергии, которой обладает обрабатываемый материал:

$$E_{кин}^a = \frac{mx^2}{2}, \quad (32)$$

где m – масса движущегося материала.

Используя интегральные уравнения типа свертки можно связать энергетические показатели процесса смешивания с однородностью кормосмеси:

$$\theta = \frac{E_{кин}^a}{W} \left[T + t - T \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right], \quad (33)$$

где W – модуль смешивания, показывающий какая работа совершается при увеличении однородности 1 кг кормосмеси на 1 %, 1/(кг мин %); T – характерное время релаксации, в течение которого релаксирующая часть однородности кормосмеси уменьшается в $e = 2,71$ раза, мин; t – время смешивания, мин.

На основе уравнения (33) возможно определение следующих важнейших показателей процесса смешивания:

1. Определение оптимального времени смешивания:

$$t^* = 2T. \quad (34)$$

2. Определение максимальной однородности смеси:

$$\theta_{\max} = 1,135 \frac{E_{\text{кин}}^a t^*}{W}. \quad (35)$$

3. Определение однородности смеси при неограниченном увеличении времени смешивания:

$$\theta_k = \frac{E_{\text{кин}}^a T}{W}. \quad (36)$$

Для определения значений W и T в вибрационном смесителе смешивали пшеничную дерть с семенами ячменя, которые служили контрольным компонентом. При проведении эксперимента интенсивность вибрации и наполнение смесителя было неизменным ($\omega = 180$ рад/с, $a = 9$ мм, $h = 350$ мм), изменялось только время смешивания, при котором снимались значения однородности смеси. Получив экспериментальные значения однородности смеси, их аппроксимировали кривой вида (33), получив при этом следующую зависимость:

$$\theta = 31,9 \left[2,63 + t - 2,63 \exp\left(-\frac{t}{2,63}\right) \right]. \quad (37)$$

Коэффициент корреляции R между зависимостью (37) и экспериментальными точками составляет 0,82 (рисунок 20), а статистические расчеты показывают, что модель (37) адекватна.

Согласно модели Лоренца значение аналога кинетической энергии при проведении эксперимента $E_{\text{кин}}^a = 688,3$ кг. Тогда модуль смешивания составит $W = 688,3 \div 31,9 = 21,6$ 1/(кг мин %).

Таким образом, нам известны значения W и T для данного смесителя и кормовой смеси. Используя их в выражениях (34) – (36), мы можем получить:

- оптимальное время смешивания $t^* = 2T = 2 \cdot 2,63 = 5,26$ мин;
- максимальную однородность смеси $\theta_{\max} = 1,135 \frac{E_{\text{кин}}^a t^*}{W} = 95,1\%$;
- однородность смеси при неограниченном времени смешивания, то есть при $t \rightarrow \infty$

$$\theta_k = \frac{E_{\text{кин}}^a T}{W} = 83,8\%.$$

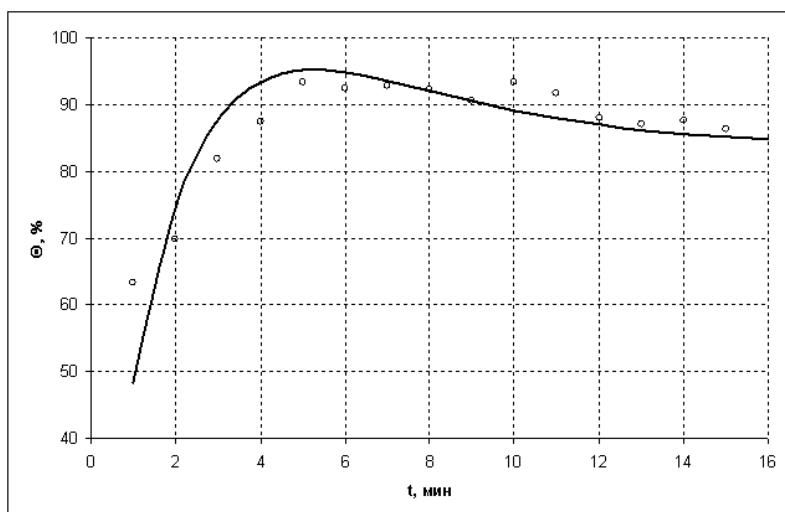


Рисунок 20 – Кривая смешивания для вибрационного смесителя

В качестве примера расчета зерноочистительной машины проведем подбор конструктивно-технологических параметров для вновь проектируемого очистителя фуражного зерна, конструкция которого разработана на кафедре механизации животноводства АГАУ.

Принципиальная схема зерноочистителя показана на рисунке 21.

Устройство состоит из рамы 1, к которой жестко закреплено установленное с наклоном неподвижное решето 2. Над верхним концом

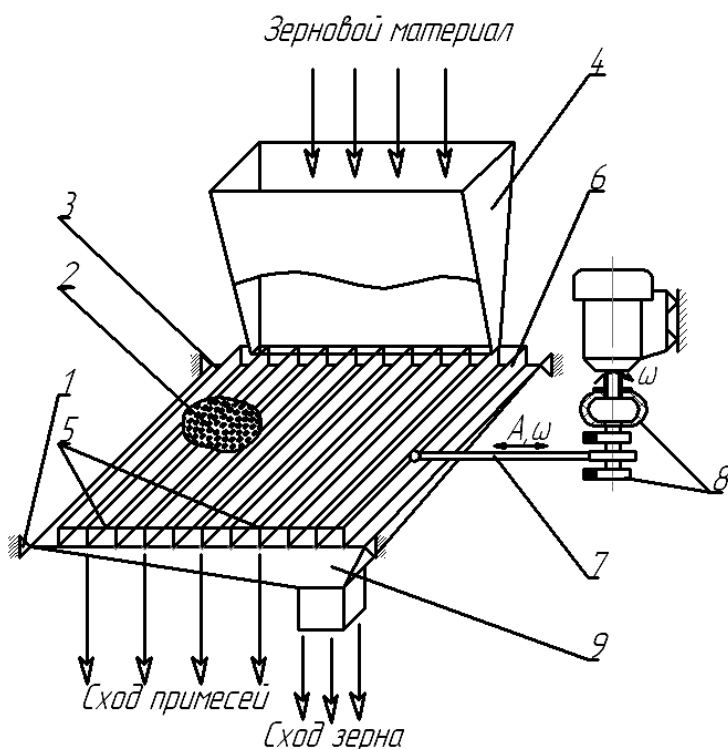


Рисунок 21 – Принципиальная схема вибрационного очистителя фуражного зерна

3 решета 2 установлен бункер исходного материала 4. Над решето 2 установлен очиститель решета 5, выполненный в виде набора соединенных между собой параллельных пластинок 6, направление которых совпадает с наклоном решета 2. Очиститель решета 5 соединен шатуном 7 с виброприводом 8 и выполнен с возможностью изменения положения в поперечной плоскости. Под решето 2 установлен сборник фракций 9.

Устройство работает следующим образом.

В бункер 4 засыпается зерновой материал с различными инородными примесями. Просыпаясь через нижнее отверстие бункера 4, которое расположено почти по всей длине решетного стана 2, материал попадает на неподвижное решето 2, которое жестко связано с рамой 1 сепаратора.

Зерновой материал с различными инородными примесями приводится в движение очистителем решета 5, представляющим собой набор соединенных между собой параллельных пластинок 6. Очиститель решета 5 приводится в движение шатуном 7 вибропривода 8. Зерновой материал с различными инородными примесями совершает при этом движения по неподвижному решету 2 в направлении схода примесей. В результате этого очищенное зерно, которое просеялось через неподвижное решето 2, попадает в сборник фракций 9. Примеси и зерно, застрявшие в неподвижном решете 2, удаляются набором соединенных между собой параллельных пластинок 6. Примеси и инородный материал совершают движение по всему решету в направлении схода примесей.

При проектировании машины были определены ее конструктивные особенности. Для возможности применения машины на очистке любой зерновой культуры диаметр отверстий решета d был принят равным 10 мм, живое сечение решета $k=0,45$. Угол наклона решета $\alpha=15^\circ$. Исходя из рабочих режимов вибрационных машин сельскохозяйственного назначения параметры вибрации были выбраны в следующем диапазоне: амплитуда колебаний a от 2 до 6 мм, частота колебаний ω от 50 до 150 с^{-1} . Ширина основания под решето $B=500$ мм, а длина $L=800$ мм. Минимальная высота пластин 6 $h=10$ мм обусловлена требованиями по прочности и жесткости к пластинам, максимальная величина высоты h в 20 мм объясняется ограничениями в громоздкости и массе конструкции. Расстояние D между пластинами 6 принимается в пределах от 10 до 30 мм. Минимальное значение расстояния D обусловлено также требованиями к массе конструкции, а максимальное – возможностями пластин передавать колебания в обрабатываемый материал, так как при величине $D>30$ мм возможно сильное затухание колебаний в материале и ухудшение рабочего процесса.

Определим производительность проектируемой вибрационной зерноочистительной машины на основе разработанной гидродинамической модели и приведенных выше ограничений. В качестве обрабатываемого материала примем зерно пшеницы.

Очевидно, что наибольшая производительность зерноочистительной машины будет достигаться при таких параметрах вибрации, при которых вязкость виброожиженного сыпучего материала будет наименьшей. Анализ полученного экспериментальным путем уравнения регрессии для динамической вязкости пшеницы показывает, что минимальная вязкость виброожиженного зерна пшеницы достигается при амплитуде колебаний a около 4 мм, частоте колебаний ω около 140 рад/с и высоте пластины $h = 20$ мм.

Поскольку зерновой материал в процессе очистки виброожижается при помощи пластин 6 и между каждой парой смежных пластин динамическое состояние обрабатываемого материала одинаково, то ячейку, образованную смежными пластинами с размерами $h \times D$ можно считать отдельным сосудом.

Анализ системы Лоренца (20) показывает, что для расстояния между пластинами $D = 30$ мм величина x имеет наибольшее значение. Большая величина переменной x означает, что материал обладает большей скоростью, то есть является более подвижным, а это значит, что при большем значении переменной x процесс очистки будет протекать более интенсивно. Исходя из вышесказанного, принимаем $h = 20$ мм, $D = 30$ мм. Для принятых параметров вибрации и конструктивных параметров зерноочистительной машины, влияющих на вязкость виброожиженного слоя, динамическая вязкость зерна пшеницы μ будет составлять 6873 Па·с.

Согласно гидродинамической модели виброожиженного слоя зернистого материала процесс очистки зерна рассмотрим как протекание вязкой жидкости сквозь отверстия в решетке, диаметр которых задан $d = 10$ мм. Расход жидкости, вытекающей из отверстия, определяется по формуле:

$$Q = \xi S_d \sqrt{2gH_c}, \quad (38)$$

где ξ – коэффициент расхода отверстия; S_d – площадь отверстия; H_c – напор.

С учетом сил сухого трения, возникающих между зерном и решетом при прохождении материала через отверстия в решетке, угла наклона решета и переменного напора вследствие изменения высоты столба материала по длине решета, выражение (38) примет вид:

$$Q = \frac{2,4\xi kBL\rho}{\cos \alpha} \sqrt{2gL \cdot \operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha \cdot 1 - f}, \quad (39)$$

где k – коэффициент живого сечения решета; f – коэффициент трения; B – ширина решета; ρ – плотность обрабатываемого материала; α – угол наклона решета; β – угол естественного откоса обрабатываемого материала.

Подставляя исходные данные в выражение (39), получим производительность машины при очистке фуражного зерна пшеницы в $Q = 2,48$ т/ч.

В пятой главе «Состояние внедрения и экономическая эффективность результатов исследования» приведены основные направления реализации результатов.

Результаты исследований и сформулированные на их основе предложения и новые технические решения использованы при создании экспериментальных и промышленных образцов вибрационных машин, а также их технической документации.

Краткая аннотация внедрения результатов исследования приведена на странице 6 автореферата.

Экономический эффект от использования результатов исследования, изложенных в данной работе может быть достигнут при использовании разработанной вибрационной техники в сфере кормоприготовления на сельскохозяйственных или перерабатывающих предприятиях. В нашем случае целесообразно применять сравнительную экономическую оценку новых разработок с существующими (базовыми) вариантами, в качестве которых выступают серийно выпускаемые машины подобного назначения.

Оценить экономическую эффективность использования вибрационных дозатора и смесителя, разрабатывавшихся для использования в составе малогабаритного комбикормового агрегата, отдельно от агрегата, как самостоятельных машин, представляется весьма проблематичным, так как трудно найти базовый вариант подобных машин для сравнения. Поэтому нами за базовый вариант принят малогабаритный комбикормовый агрегат АК, выпускаемый ОАО «ВНИИКОМЖ», а за новую машину - малогабаритный вибрационно-ударный комбикормовый агрегат ИТАИ-4, разработанный в АГАУ, а экономическая эффективность дозатора и смесителя оценивается долей экономической эффективности агрегата. Доля экономической эффективности дозатора и смесителя в общей экономической эффективности агрегата составляет 15%.

Годовой экономический эффект от применения малогабаритного вибрационно-ударного комбикормового агрегата ИТАИ-4, по сравнению с агрегатом АК производства ОАО «ВНИИКОМЖ» составил 445920 руб. Экономический эффект от использования агрегата за весь срок службы составил 1406687,7 руб. Для дозатора и смесителя, входящих в состав комбикормового агрегата ИТАИ-4, годовой экономический эффект составляет 66888 руб., а экономический эффект за весь срок службы 211003,16 руб.

Анализ экономических показателей указывает на то, что экономический эффект, достигнутый при использовании вибрационной техники, получен, в основном, за счет более высокой производительности и низкой энергоемкости нового агрегата в сравнении с базовым. Именно по этим параметрам вибрационные кормоприготовительные машины отличаются от основной массы машин, основанных на других принципах выполнения технологических операций.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В диссертации на основе анализа современного состояния вопроса и проведенных теоретических и экспериментальных исследований динамического поведения вибрируемого зернистого слоя и технологических возможностей вибрационных кормоприготовительных машин можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально обнаруженное сходство в поведении подогреваемого снизу слоя вязкой жидкости и вибрируемого слоя зернистого материала указывает на то, что математический аппарат гидродинамики можно использовать для моделирования поведения виброожиженного сыпучего материала.
2. Анализ разработанной гидродинамической модели виброожиженного сыпучего материала позволил выявить критерии подобия аналогичные используемым в гидродинамике вязкой жидкости. Так, получены вибрационные аналоги известных в термо- и гидродинамике критериев подобия, таких как числа Эйлера

$$Eu_B = \frac{P_0}{\rho a \omega^2}, \text{ Рейнольдса } Re_B = \frac{v}{a^2 \omega}, \text{ Фруда } Fr_B = \frac{g a k f}{a \omega^2} \frac{h' - y'}{2}, \text{ Релея } R_B = \frac{\Delta U \eta g h^3}{v \gamma},$$

Прандтля $Pr_B = \frac{\nu}{\gamma}$. Полученные критерии подобия позволяют использовать гидродинамическое программное обеспечение для моделирования поведения виброожиженного сыпучего материала.

3. Полученные при компьютерном моделировании картины движения виброожиженного сыпучего материала полностью совпадают с его экспериментально наблюдаемым поведением. Гидродинамическая модель способна описать все три экспериментально наблюдаемых типа динамического поведения вибрируемого зернистого слоя: уплотнение материала, регулярные циркуляции с образованием ячеек Бенара, стохастическое движение, что является доказательством ее адекватности.
4. Установлено, что вибрируемый зернистый слой является синергетической системой, так как отвечает всем требованиям, предъявляемым к таким системам: постоянный обмен веществом и энергией с окружающей средой, имеется регулирование по типу обратной связи, отклонение от равновесия превышает критические значения, то есть рассматриваются состояния, лежащие вне равновесной термодинамической ветви, для описания происходящих процессов используются нелинейные математические модели. Указанные факты позволяют использовать методы синергетики для анализа динамического состояния вибрируемого зернистого слоя.
5. На основе методов синергетики выполнено сведение гидродинамической модели виброожиженного сыпучего материала к модели Лоренца. Получены параметры модели Лоренца $\sigma = \frac{a \omega h}{\nu}$, $r = \frac{\Delta U \eta g}{\nu a \omega h^2 + R^2}$ и $b = \frac{4}{1 + \left(\frac{h}{R}\right)^2}$. Анализ указанных пара-

метров позволил выявить, что переход системы из одного динамического состояния в другое возможен не только путем изменения интенсивности вибрации, но и в результате изменения соотношения между поперечным размером сосуда и высотой слоя материала. Это позволяет без изменения конструкции машины, варьируя только высотой слоя обрабатываемого материала, получать его требуемое динамическое поведение.

6. Разработан общий алгоритм расчета, на основе которого получены частные методики для расчета вибрационного дозатора, смесителя и очистителя кормовых зернистых материалов. При помощи указанных методик определены конструктивные параметры и технологические характеристики работы: вибрационного дозатора, при которых обеспечивается наилучшее качество дозирования с равномерностью подачи в 97% (частота колебаний $\omega = 156 \text{ с}^{-1}$, амплитуда колебаний $a = 0,81 \text{ мм}$, параметр модели Лоренца $b = 0,55$, масса дебаланса $m_1 = 0,4 \text{ кг}$); опытного образца вибрационного смесителя с качеством смеси в 93 % (частота колебаний $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$, поперечный размер слоя $D = 420 \text{ мм}$, высота слоя $h = 350 \text{ мм}$, амплитуда колебаний $a = 7 \text{ мм}$, оптимальное время смешивания $t^* = 5,26 \text{ мин}$); опытного образца вибрационного очистителя фуражного зерна с качест-

вом очистки от грубых, солоmistых и крупных примесей в 100% и производительностью $Q=2,48$ т/ч (диаметр отверстий решета $d=10$ мм, угол наклона решета $\alpha=15^\circ$, размеры решета 500×800 мм, высота пластин $h=20$ мм, расстояние между пластинами $D=30$ мм, амплитуда колебаний $a=4$ мм, частота колебаний $\omega=140$ с⁻¹).

7. На основе исследований сформулированы исходные требования на разработку вибрационных смесителей, дозаторов и очистителей фуражного зерна, утвержденные ГУСХ Алтайского края. Разработаны методики расчета вибрационных машин различного назначения, используемые в ООО «Сибирский агропромышленный дом» и ООО «Алтайские вибромашины». Изготовлены опытные образцы вибрационных кормоприготовительных машин. Результаты работы внедрены в учебный процесс Алтайского ГАУ.
8. Произведена оценка экономической эффективности результатов исследования, которая показывает, что экономический эффект при использовании вибрационной кормоприготовительной техники достигается за счет её более высокой производительности и низкой энергоёмкости в сравнении с машинами, основанными на других принципах выполнения технологических операций. Так, годовой экономический эффект от использования вибрационных дозатора и смесителя в составе малогабаритного комбикормового агрегата ИТАИ-4 составил 67 тыс. руб., а экономический эффект за весь срок службы 211 тыс. руб.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ

1. Федоренко, И.Я. Динамика виброожиженного слоя сельскохозяйственного материала [Текст] / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2005. – № 6. – С. 13-15.
2. Федоренко, И.Я. Методы расчета вибрационных машин на основе гидродинамических моделей сыпучего материала [Текст] / И.Я. Федоренко, Д.Н. Пирожков, А.А. Гнездилов // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2007. – № 5. – С. 93-98.
3. Пирожков, Д.Н. Сведение гидродинамической модели виброожиженного сыпучего материала к системе Лоренца [Текст] / Д.Н. Пирожков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2008. – № 8. – С. 59-65.
4. Пирожков, Д.Н. Определение конструктивных параметров вибрационного дозатора [Текст] / Д.Н. Пирожков // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2009. – № 7. – С. 77-83.
5. Пирожков, Д.Н. Расчет элементов вибрационного привода [Текст] / Д.Н. Пирожков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 8. – С. 73-78.
6. Пирожков, Д.Н. Методика расчета вибрационного дозатора на основе гидродинамической модели сыпучего материала [Текст] / Д.Н. Пирожков // Хранение и переработка с/х сырья. – 2010. – № 11. – С. 73-75.
7. Федоренко, И.Я. Использование модели Лоренца для описания процесса смешивания

- вания сыпучих кормовых материалов [Текст] / И.Я. Федоренко, **Д.Н. Пирожков**, Р.Н. Котов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 9. – С. 81-85.
8. Федоренко, И.Я. Обоснование конструктивно-технологических параметров зерноочистительной машины на основе гидродинамической модели виброожиженного слоя зернистого материала [Текст] / И.Я. Федоренко, **Д.Н. Пирожков**, А.С. Федоренко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2012. № 1. С. 85-90.
9. Федоренко, И.Я. Оптимизация конструктивно-кинематических параметров вибрационного смесителя [Текст] / И.Я. Федоренко, **Д.Н. Пирожков**, Р.Н. Котов // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. – 2011. – № 12. – С. 38-42.
10. **Пирожков, Д.Н.** Использование показателей Ляпунова для определения динамического состояния вибрируемого зернистого слоя [Текст] / **Д.Н. Пирожков** // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. – 2011. – № 12. – С.42-47.

Патенты

11. Пат. 2119380 Российская Федерация, С1 В 01 F 7/08. Смеситель непрерывного действия [Текст] / В.И. Земсков, **Д.Н. Пирожков**; заявитель и патентообладатель АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Заявл. 14.07.97; опубл. 27.09.98, Бюл. № 27.
12. Пат. 2267770 Российская Федерация С 1 G 01 N 11/10. Установка для определения вязкости дисперсных материалов [Текст] / И.Я. Федоренко, А.А. Гнездилов, С.А. Сорокин, К.А. Пехтерев, **Д.Н. Пирожков**, В.И. Лобанов; заявитель и патентообладатель – Алтайский ГАУ. – Заявл. 05.05.2004; опубл. 10.01.2006, Бюл. № 01.
13. Пат. 2294096 Российская Федерация С 1 A01K 43/00. Линия для очистки поверхности скорлупы яиц от загрязнений [Текст] / И.Я. Федоренко, А.А. Гнездилов, **Д.Н. Пирожков**; заявитель и патентообладатель – Алтайский ГАУ. – Заявл. 28.07.2005; опубл. 27.02.2007, Бюл. № 6.
14. Пат. 2338284 Российская Федерация С 1 B01F 3/18. Устройство для смешивания сыпучих материалов [Текст] / И.Я. Федоренко, С.Н. Васильев, **Д.Н. Пирожков**, А.И. Сечевой; заявитель и патентообладатель – Алтайский ГАУ. – Заявл. 29.01.2007; опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32.
15. Пат. 2354446 Российская Федерация С 1 B01F 11/00, B06B 1/00. Привод вибрационной технологической машины [Текст] / И.Я. Федоренко, М.Г. Желтунов, С.Н. Васильев, **Д.Н. Пирожков**; заявитель и патентообладатель Федоренко И.Я. – Заявл. 03.12.2007; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.
16. Пат. 2421271 Российская Федерация С 1 B01F3/18, B01F11/00. Смеситель для сыпучих материалов [Текст] / И.Я. Федоренко, **Д.Н. Пирожков**, Р.А. Котов; заявитель и патентообладатель Федоренко И.Я. – Заявл. 08.02.2010; опубл. 20.06.2011, Бюл. № 17.

Другие издания

- 17.Золотарев, С.В. Использование пакета программ MINITAB для исследования процесса смешивания [Текст] / С.В. Золотарев, **Д.Н. Пирожков** // Совершенствование технологий и технических средств в АПК. Материалы юбилейной научно-практической конференции. – Барнаул. – 1999. – Ч.1. – С.15-21.
- 18.Пирожков, Д.Н. Исследование движения частицы при перемешивании сыпучего материала в смесителе непрерывного действия [Текст] / **Д.Н. Пирожков** // Сб. ст. Юб. науч.-практ. конф. Совершенствование технологий и технических средств в АПК. – Барнаул. – 2001. – С.91-93.
- 19.Федоренко, И.Я. Движение частицы сыпучего материала под воздействием вибраций [Текст] / И.Я. Федоренко, **Д.Н. Пирожков** // Тр. XXXII Уральского семинара по механике и процессам управления. – Екатеринбург. – 2002. – С. 212-214.
- 20.Федоренко, И.Я. Факторы, действующие на частицу в виброожиженном слое [Текст] / И.Я. Федоренко, **Д.Н. Пирожков** // Материалы XLII науч.-техн. конф. ЧГАУ. – Челябинск. – 2003. – Ч.3. – С. 155-159.
- 21.Пирожков, Д.Н. Виброкипящий слой: математические модели и использование в технологии [Текст] / **Д.Н. Пирожков** // Сб. ст. Юб. междунар. науч.-практ. конф. – Барнаул. – 2003. – Ч. 1. – С. 144-147.
- 22.Федоренко, И.Я. Синергетические системы и поведение сыпучей среды под действием вибрации [Текст] / И.Я. Федоренко, **Д.Н. Пирожков** // Тр. 2 междунар. науч.-техн. конф. – Тобольск. – 2004. – Ч. 2. – С. 238-240.
- 23.Федоренко, И.Я. Критерии подобия гидродинамических моделей виброкипящего слоя сыпучего материала [Текст] / И.Я. Федоренко, **Д.Н. Пирожков** // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2005. – № 1. – С. 105-108.
- 24.Федоренко, И.Я. Вибрируемый зернистый слой в сельскохозяйственной технологии: монография [Текст] / И.Я. Федоренко, **Д.Н. Пирожков**. – Барнаул: Изд-во АГАУ. – 2006. – 166 с.
- 25.Федоренко, И.Я. Направления совершенствования вибрационных машин в АПК. [Текст] / И.Я. Федоренко, **Д.Н. Пирожков** // Сб. ст. II междунар. науч.-практ. конф. Аграрная наука – сельскому хозяйству. – Барнаул. – 2007. Кн. 2. – С. 279-281.