

## Сведения о фактическом выполнении плана работы на год

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫМ ТИПОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ, УЧЁТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАКЕТОВ ДИНАМИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрена механико-математическая модель колебательной системы вибрационного макета с энергетически эффективным типом возбуждения колебаний рабочих органов. Вибрационная система состоит из мягко амортизированного корпуса и присоединенного к нему при помощи специальных пакетов винтовых пружин рабочего органа в соответствии с рисунком 1 (здесь и далее рисунки 1-16 находятся в приложении – см. п. 1.6 отчета о выполнении проекта). Система приводится в движение от двух самосинхронизирующихся дебалансных вибровозбудителей, установленных на корпусе. Отсутствие жестких кинематических связей между двумя вибровозбудителями делает такую колебательную систему исключительно простой в обслуживании и надежной в работе; она также является полностью уравновешенной.

Влияние перерабатываемого материала, т.е. технологической нагрузки, на движение колебательной системы учитывается приближенно – путем присоединения к рабочему органу демпфера. Величину коэффициента демпфирования можно вычислить, определяя экспериментально энергетические затраты за период синхронных колебаний макета. В этом случае рассматриваемая динамическая схема системы может быть использована для приближённого анализа рабочего режима.

В результате исследования получены законы вынужденных колебаний вибрационной установки при учете вязкого сопротивления движению, а также уравнение баланса энергетических затрат в рабочем режиме системы и уравнения для определения эквивалентных коэффициентов вязкого трения. Кроме того, сформулированы условия существования синхронного противофазного режима движения рабочих органов, необходимого для эффективной и устойчивой работы вибрационного макета в квазирезонансном режиме. Данные условия накладывают определенное ограничение на максимальную потребляемую мощность двигателей в рабочем режиме системы, соответствующую энергетическим затратам на нужный технологический процесс, в частном случае, на разрушение материала (рисунок 2).

На основании проведенных теоретических исследований разработана модель вибрационного макета без жестких кинематических связей между рабочими органами (рисунок 3). Произведен анализ последовательных положений рабочих органов вибрационного макета за время одного оборота дебалансов. Разработана и изготовлена имитационная модель для исследования нелинейной жесткости тарельчатых пружин упругой системы вибрационного макета (рисунок 4) По результатам испытаний имитационной модели на динамической испытательной машине PROLine 100kN фирмы Zwick/Roell была получена зависимость жесткости упругой системы тарельчатых пружин от хода рабочего органа вибрационного макета в соответствии с рисунками 5 и 6.

Разработана структурная схема системы для исследований электромеханических характеристик вибрационного макета в соответствии с рисунком 7. Назначение системы – измерение и анализ электромеханических характеристик вибрационного макета при различных режимах вращения и синхронизации вибровозбудителей, главным образом, в квазирезонансном режиме.

Разработаны программы и методики экспериментальных исследований на вибрационном макете. В разработанной программе испытаний отражена цель и условия проведения исследований этого вибрационного макета. Предъявлены общие требования по обеспечению хода натурных исследований. Составлена таблица определяемых показателей и точность их измерения в соответствии с требуемыми значениями.

Исследована также динамика одномассной вибрационной колебательной системы для ситовой сепарации по крупности сыпучих материалов с энергетически эффективным типом возбуждения для получения заданных колебаний орбитального типа в горизонтальной плоскости при условии стабильной самосинхронизации. Показано, что в диапазоне среднечастотных колебаний  $14-20 \text{ с}^{-1}$  многоситный сепаратор с самосинхронизирующимся приводом при принципиально новой последовательности выделения классов крупности «от мелкого класса к крупному» позволяет повысить на 4-5% эффективность сепарации сыпучих материалов в толстом слое. Физические свойства перерабатываемого материала и показатели сепарации увязаны со структурой поверхности его частиц, изученных с использованием лазерной сканирующей микроскопии и построением 3D-моделей.

Кроме того, спроектирован и изготовлен еще один макет динамической системы колебательного устройства нового типа, основанный на противофазных эллиптических низкочастотных колебаниях рабочих органов (рисунок 8), которые могут иметь любую форму, в частности, это могут быть два синхронно работающих дробящих элемента дезинтегратора, совершающие сложные возвратно-поступающие и эллиптические движения, то есть, колебания с частотой  $6-16 \text{ с}^{-1}$  (рисунок 9). По классификации ГОСТ 8041-2006 такие колебания относятся к категории низкочастотных. Заданный характер движения дробящих элементов обеспечивает приложение к перерабатываемому материалу усилий сдвига и сжатия и позволяет получать конечный продукт дезинтеграции с высокой долей зерен кубовидной формы, что является весьма важным, например, в строительной индустрии.

Макет предназначен для дезинтеграции в лабораторных условиях прочных и особо прочных горных пород с целью моделирования промышленного процесса мелкого дробления при производстве строительного щебня – основного продукта строительной индустрии.

Лабораторные испытания показали, что спроектированный и изготовленный макет дезинтегратора позволяет адекватно моделировать в лабораторных условиях гранулометрическую характеристику дроблёного щебня, получаемого в промышленных условиях. Более того, эта установка уже с первого приближения оказалась настолько успешной, что дает возможность в течение короткого времени разработать промышленный образец и перейти к её серийному производству и широкому применению.

В данном разделе проекта исследована также нелинейная динамика привода вибрационных машин и устройств, приводимых от электродвигателя, расположенного на неподвижном основании, через гибкое сочленение.

На основе решения существенно нелинейной системы дифференциальных уравнений установлена возможность нежелательных резонансных явлений в системе, так называемый эффект Зоммерфельда с двойной частотой. Показано, как оптимальным образом должны соединяться валы дебалансов машины и приводных электродвигателей.

В результате использования подхода вибрационной механики в работе вместо упомянутой сложной системы уравнений четвертого порядка получено уравнение первого порядка (формула 1 - здесь и далее формулы 1-7 находятся в приложении – см. п. 1.6 отчета о выполнении проекта)

Это уравнение является обобщением классического уравнения машинного агрегата. Оно отличается от классического наличием тормозящего вибрационного момента, который предопределяет особенности поведения системы с гибким элементом в системе привода.

Исследовано также торможение электродвигателя вибрационной машины, содержащей деформируемые элементы (эффект Зоммерфельда).

Результаты получены на основе решения сложной системы уравнений; при решении этой задачи, как и предыдущей, использован подход к исследованию действия вибрации на нелинейные механические системы – вибрационная механика. Разработанный участниками проекта, он получил признание и развитие, как в России, так и за рубежом. Использовались

также классические методы математической физики, физической кинетики и теории колебаний, а также численные методы.

В текущем периоде выполнения проекта начаты исследования по созданию современных методов проектирования и расчета вибрационных машин с механическими (дебалансными) возбудителями. В частности, получены формулы для определения необходимых и устранимых энергозатрат в таких вибрационных машинах. Исследования имеют целью снижение установочной мощности приводных электродвигателей вибрационных машин, что связано не только с проблемой снижения энергозатрат, но и с улучшением эксплуатационных свойств машин с самосинхронизирующимися вибровозбудителями.

По этой проблеме получены следующие результаты.

На основе теории вибрационного перемещения получена простая формула (формула 2) для определения энергозатрат на поддержание режимов движения с подбрасыванием сыпучего материала – это основные необходимые энергозатраты):

Дополнительные необходимые затраты энергии связаны с потерями энергии в приводе машины, а к устранимым энергозатратам относятся затраты на подъем неуравновешенного дебаланса из нижнего положения и затраты на преодоление торможения при прохождении через резонанс при пуске (эффект Зоммерфельда).

Эти последние затраты могут быть устранены путем использования системы оптимального управления и средствами мехатроники.

Показано, что в вибрационных машинах с инерционным приводом и с прямолинейными гармоническими колебаниями рабочего органа имеет место постоянный обмен энергией между рабочим органом и валом дебаланса, т.е. вибратором. А именно, в течение каждого полупериода колебаний между ними циркулирует энергия (формула 3), что вызывает колебания угловой скорости вращения вала вибратора с амплитудой (формула 4)

Обычно эта амплитуда невелика, однако соответствующие колебания рабочего органа машины могут быть резонансно усилены, если речь идет о получении полезного эффекта. Они могут вызывать и нежелательные явления типа эффекта Зоммерфельда, как это происходит в случае использования гибкого элемента для соединения валов двигателя и вибровозбудителя.

Получены приближенные формулы (формула 5) для присоединенной массы и для коэффициента присоединенного вязкого трения рабочего органа вибрационной машины с технологической нагрузкой, т.е. обрабатываемым сыпучим материалом.

Согласно формуле 5, присоединенная масса равна массе материала в машине при  $\omega \leq 1$ , а при  $\omega \geq \pi$ , когда имеют место режимы с непрерывным или длительным подбрасыванием материала,  $M=0$ , и материал действует на рабочий орган в виде силы вязкого трения.

Начаты экспериментальные исследования по определению энергозатрат на вибрирование сыпучего материала, суспензии, резонирующего тела, которые выполняются на уникальном вибрационном стенде, также разработанном в Механобре; для проведения опытов на стенде изготовлены специальные модели и устройства.

Выполняются исследования стохастического резонанса – физического явления, изучению которого посвящен специальный раздел современной физики. Это явление состоит в появлении «пикового» отклика системы при изменении не частоты возмущения, как при «обычном» резонансе, а при изменении интенсивности случайного или детерминированного воздействия.

Показано, что это явление весьма просто объясняется и исследуется на основе подхода вибрационной механики – как результат изменения под действием высокочастотного возмущения эффективной жесткости системы. Кроме того, показано, что данное явление характерно для широкого круга нелинейных осцилляторов. Исследования стохастического резонанса носят междисциплинарный характер, и его применение в

вибрационных технологиях – лишь частный случай, например, как способ резонансного усиления периодического воздействия.

Публикации по разделу - № 1-4, 7, 9 и 10 из общего списка (п. 1.7 отчета о выполнении проекта)

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ СЕЛЕКТИВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТВЁРДЫХ МАТЕРИАЛОВ. КОМПЛЕКС РЕНТГЕНОВСКИХ МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Перспективным направлением решения задачи снижения энергетических затрат в технологиях переработки различных материалов, в том числе, минерального сырья являются применение способов дезинтеграции, позволяющих адаптировать процесс к физико-механическим свойствам исходного материала.

В работах Механобра сформулированы основные принципы, позволяющие реализовать процесс дезинтеграции при минимизации энергозатрат:

- всестороннее объемное сжатие материала;
- комбинированное нагружение с элементами сжатия, сдвига, изгиба, растяжения;
- достижение уровня энергетического воздействия, приводящего к накоплению необратимых деформаций;
- высокая частота и скорость нагружения, для снижения потерь энергии на пластические деформации;
- относительная подвижность частиц материала между циклами нагружения;
- ограничение максимального уровня нагрузок, обеспечивающего развитие микротрещин в макротрещины;
- выбор соотношения видов нагружения и их параметров в зависимости от типа материала.

Эти принципы реализуются на основе вибрационных технологий и создания вибрационной техники, обеспечивающий не только существенное снижение потребления электроэнергии при дроблении, но и повышение качества получаемого продукта по форме и размерам зерен.

Важным направлением исследования процесса дезинтеграции является поиск воздействий, позволяющих минимизировать нежелательное переизмельчение. При нагружении традиционными способами (сжатие, удар) избыточная кинетическая энергия приводит к накоплению скрытых нереализованных микротрещин, в результате чего происходит переизмельчение с образованием тонкодисперсной фазы. При вибрационном воздействии разрушаемые куски подвергаются многократному импульсному нагружению, вызывающему накопление необратимых деформаций. Таким образом, управление частотой вибраций и скоростью нагружения позволяет снизить потери энергии на пластические деформации и избежать переизмельчения.

Анализ современного состояния исследований в области дезинтеграции горных пород показывает, что в последние годы сформировался новый подход, основанный на исследовании их неоднородности и дефектов структуры на микроуровне. Весьма важным аспектом этой проблемы является выявление показателей, характеризующих дефектность структуры и имеющих технологическое значение, с получением их количественной оценки.

Решение проблемы повышения эффективности дезинтеграции потребовало разработки новой методологии исследования материалов с учетом их текстурно-структурных особенностей и физико-механических свойств, а также особенностей изменения этих свойств в процессах деформирования и разрушения при выборе и совершенствовании технологий дезинтеграции.

Наиболее перспективным методом изучения структур на микроуровне является рентгеновская компьютерная томография, позволяющая получить количественные

характеристики структуры порового пространства, что важно, в первую очередь, для горных пород и минерального вещества. Полученные результаты томографических исследований могут быть использованы при решении прикладных задач проекта – разработки технологических регламентов дезинтеграции природных и техногенных материалов различных текстурно-структурных типов, выбора метода дезинтеграции и обоснования конструктивных особенностей технологических машин.

В соответствии с этим выделены следующие задачи исследований:

- изучение структур порового пространства природных и техногенных материалов; установление количественных значений параметров структуры порового пространства, влияющих на прочность горных пород методом рентгеновской компьютерной микротомографии;

- выявление особенностей преобразования структуры порового пространства природных и техногенных материалов при воздействии вибраций;

- выявление взаимосвязи состава, текстурно-структурных особенностей, физико-механических свойств природных и техногенных материалов и режимов вибраций;

- обоснование оптимальных условий вибрационного воздействия применительно к текстурно-структурным типам материалов;

- разработка основных принципов выбора энерго- и ресурсосберегающих вибрационных технологий применительно к текстурно-структурному типу материалов.

Исследования проводились с помощью приборов «SkyScan-1172» и «SkyScan 1173» (Бельгия) с разрешениями от 0,5 до 27мкм. В качестве программного обеспечения использовались сертифицированные программы Nrecon, DataViewer, CTAn, совместимыми с 32- и 64-битными ОС Windows.

Подробная методика микротомографических исследований приведена в Приложении.

Результаты рентгенотомографии свидетельствуют о значимых различиях в структуре порового пространства исследуемых природных материалов - строительных горных пород.

Обобщение результатов томографических исследований позволило выявить некоторые общие зависимости и закономерности, характеризующие взаимосвязь отдельных параметров микроструктуры.

Установлены общие зависимости и закономерности, характеризующие взаимосвязь отдельных параметров структуры исследуемых материалов, в данном случае основных типов изверженных горных пород – гранитов и габбро-диабазов:

- концентрация пор экспоненциально снижается при увеличении их размера; однозначная зависимость пористости от концентрации пор отсутствует, что связано с различными размерами пор в структуре пород;

- роль пор различного размера в общей пористости (емкости) образцов неоднозначна; в емкость мелкопористых образцов наибольший вклад вносят мелкокапиллярные поры, при увеличении размера пор в емкости образцов увеличивается доля более крупных пор;

- сферичность пор экспоненциально снижается по мере увеличения их размера;

- установлена логарифмическая зависимость удельной поверхности пор и удельной поверхности минеральных зерен.

- установлена зависимость прочности пород от параметров структуры порового пространства; более низкие пределы прочности при сжатии гранитов по сравнению с габбро-диабазами связаны с порами более крупных размеров низкой сферичности, что приводит к увеличению коэффициента ослабления связи минеральных зерен.

Подробное описание хода микротомографических исследований и их результатов приведено в Приложении.

Эти результаты дают основание и исходные данные для проектирования новых энергоэффективных вибрационных машин и устройств, предназначенных для дезинтеграции природных и техногенных материалов.

Публикации по разделу - № 5 из общего списка (п. 1.7 отчета о выполнении проекта)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СЫПУЧИХ СРЕД ПРИ НАЛИЧИИ ВИБРАЦИИ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СИЛОВЫХ ПОЛЕЙ.

Динамика сыпучей среды под действием вибраций имеет не только большое прикладное значение для многих технологий, но и представляет познавательный интерес как источник разнообразных нетривиальных и неожиданных эффектов, таких, как неустойчивость кластеризации и примыкающий к ней «эксперимент с Демоном Максвелла» (переход частиц из камеры с меньшим количеством частиц в камеру с большим их количеством), неожиданная асимметрия циркуляционных потоков, эффект появления перепада давления воздуха через вибрирующий слой, «эффект бразильского ореха» (всплывание более крупных частиц), гранулярный эффект Лейденфроста и другие. Некоторые из этих эффектов объяснены и описаны достаточно убедительными моделями. Относительно других имеются различные гипотезы, и продолжаются дискуссии. Сложность объекта и разнообразие его поведения в различных условиях породили оправданное разнообразие моделей, подходов и методов исследования. Весь спектр применяемых моделей простирается от очень сложных кинетических уравнений, в которых делается попытка учесть максимально возможное число факторов и рассматривается детально распределение частиц по скоростям, до сравнительно простых полуфеноменологических моделей, описывающих осредненно перенос массы, энергии и импульса. Существуют специализированные модели, относящиеся к «твердому», «жидкому» и «газообразному» состоянию сыпучей среды. Именно третье из перечисленного привлекает в последнее годы большой интерес в рамках концепции гранулярного газа, в том числе исследование подобных моделей ведётся и в «Механобр-технике».

Гранулярный газ имеет ряд особенностей, отличающих его от обычного молекулярного газа. Они определяются в первую очередь следующими обстоятельствами.

Во-первых, при столкновениях происходит диссипация энергии.

Во-вторых, для гранулярного газа имеет место отклонение от максвелловского закона распределения частиц по скоростям.

В-третьих, для гранулярного газа типичны одновременно большие градиенты как плотности, так и гранулярной температуры, что в обычном газе наблюдается редко.

В данном разделе проекта рассматривается слой сыпучего материала над интенсивно вибрирующей плоскостью и исследуются характеристики его стационарного возбужденного состояния, при котором частицы материала совершают хаотическое газоподобное движение в поле силы тяжести. Рассматриваемая система моделирует широко применяемый в различных областях технологий «виброкипящий» слой в предположении, что решающим фактором, вызывающим интенсивное хаотическое движение твердых частиц и в то же время потерю их энергии, являются взаимные соударения частиц. Таким образом, в работе используется концепция «гранулярного газа». Рассматриваются процессы переноса кинетической энергии и количества движения с последовательным учетом немаксвелловского распределения частиц по скоростям, обнаруженного ранее как в численных, так и в натурных экспериментах. В результате получены уравнения для пространственного изменения концентрации частиц и их кинетической энергии (так называемой гранулярной температуры) и найдено общее аналитическое решение этих уравнений, а также решение краевой задачи о слое со свободной поверхностью сверху и с заданным движением плоскости снизу. Проанализировано влияние коэффициента восстановления, крупности частиц и параметров вибрации на пространственное распределение плотности и гранулярной

температуры в слое сыпучего материала, а также на величину расходуемой энергии. На основе полученных уравнений дано аналитическое описание эффекта неустойчивости симметричного состояния двух одинаковых камер с гранулярным газом, разделенных перегородкой с окошком («эксперимент с Демоном Максвелла»). Показано, что неустойчивость возникает начиная с определенной высоты расположения окошка и достигает максимума при ее определенном значении.

Далее для примера показаны результаты исследований для слоя со свободной поверхностью сверху и заданным движением вибрирующей плоскости. На рисунке 15 изображена зависимость безразмерной гранулярной температуры от расстояния до вибрирующей плоскости.

Рассмотрены также в данном разделе проекта вопросы динамики сыпучих материалов в рабочих областях различных сепарирующих устройств, работающих в виброожиженном слое. По сути, это целый класс технологий и машин, в которых частицы материала, находящегося в виброожиженном состоянии, испытывают дополнительные силовые воздействия в гравитационных, электрических или электромагнитных полях. Здесь, в числе прочих, чрезвычайно важен учёт бесконечного числа соударений частиц, поскольку эффект от таких соударений существенен по сравнению с дополнительными силовыми воздействиями. Цель выполняемых исследований – определить, насколько в среднем велика задержка процесса разделения частиц в силовых полях по своим контрастным свойствам из-за случайных соударений, вызванных вибрационным воздействием на весь массив сыпучих материалов. В качестве примера рисунок 16, где приведена величина стохастического отклонения частиц из-за случайных соударений.

Это частный случай движения частицы в слое виброожиженного материала при действии объемной силы — движение парамагнитной частицы в рабочей области электромагнитного сепаратора. Для магнитной силы взято линейное приближение. Получена оценка среднего времени извлечения частицы, а также статистическая оценка задержки в извлечении за счет соударений извлекаемой частицы с другими частицами исходного материала в виброожиженном слое, что позволило установить необходимое время пребывания материала в рабочей области сепаратора для полного извлечения парамагнитных частиц.

Основные результаты данного раздела исследования заключаются в следующем:

- получены уравнения для стационарного состояния вибровозбуждаемого сыпучего материала (гранулярного газа) с учетом немаксвелловского закона распределения по скоростям и наличия существенных градиентов как концентрации так и гранулярной температуры;
- сформулированы нелинейные граничные условия на вибрирующей и неподвижной плоскостях;
- поставлена и аналитически решена задача о слое со свободной поверхностью;
- выведены простые формулы для расчета гранулярной температуры, концентрации и давления вблизи вибрирующей плоскости и в любой точке по высоте слоя а также для лейденфростовского скачка концентрации вблизи возбуждающей плоскости;
- выведена формула для мощности расходуемой на поддержание стационарного состояния слоя;
- дано количественное описание явления „демона Максвелла“ (конкуренции кластеров).
- исследованы процессы случайных соударений частиц в виброожиженном сыпучем материале и их влияние на запаздывание по времени единичных актов разделения и концентрации этих частиц в различных силовых полях по их контрастным свойствам.

Разработанная теория может при дальнейшем развитии и валидировании найти применение при энергетической оптимизации процессов вибрационных технологий для самых различных отраслей промышленности.

По результатам исследований, изложенных в данном разделе, подготовлены к публикации две статьи, которые выйдут в свет уже в 2018 г. Две уже опубликованные в рамках данного проекта в 2017 году статьи касаются практических результатов создания и испытания технологий и машин, использующих в своей основе упомянутые выше комбинированные силовые поля.

Публикации по разделу - № 6, 8 из общего списка (п. 1.7 отчета о выполнении проекта)