

## Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном году

1. Выполненное исследование позволяет оценить влияние технологической нагрузки, в частном случае, разрушаемого материала на динамику и устойчивость рабочего режима колебательной системы вибрационного макета на основе двухмассной системы с пространственными движениями рабочих органов в соответствии с рисунком 1. В частности, разработана методика, которая, благодаря сочетанию теоретических и экспериментальных методов, впервые позволит определить в режиме рабочего хода численные значения коэффициентов вязкого сопротивления прямолинейным и поворотным колебаниям корпуса и дробящего конуса вибрационного макета вдоль и вокруг вертикальной оси соответственно. Эти коэффициенты, в свою очередь, позволят определить усредненные значения амплитуд колебаний корпуса и конуса макета в процессе разрушения материала.

2. Получено условие, при выполнении которого в спроектированном по рассмотренной схеме макете реализуются синхронные противофазные движения корпуса и дробящего конуса, необходимые, в частности, для эффективной дезинтеграции материала. Иными словами, полученное условие позволяет определить максимальную суммарную мощность двигателей в рабочем режиме макета, соответствующую его энергетическим затратам в рабочем режиме. График зависимости максимальной мощности от угловой скорости вибровозбудителей для разрабатываемого вибрационного макета с массой дробящего конуса  $m_2 = 4$  кг представлен на рисунке 2. Из приведенного графика видно, что максимальная мощность двигателей при угловой скорости вращения вибровозбудителей 157 рад/с не должна превышать 29 Вт. Данная скорость находится в диапазоне скоростей, отвечающих синхронным противофазным движениям корпуса и дробящего конуса макета.

3. Получены зависимости безразмерного коэффициента запаса по устойчивости синхронно-синфазного режима вращения дебалансных вибровозбудителей, а также угла рассогласования фаз вращения роторов вибровозбудителей от производительности вибрационного устройства. Данные зависимости позволят уточнить амплитуды колебаний рабочих органов системы с учетом технологической нагрузки при различных значениях частоты вращения вибровозбудителей, что уже на стадии рабочего проектирования позволит сделать обоснованный выбор конструктивных параметров и рабочей синхронной частоты.

4. На основании проведенных теоретических исследований разработан многофункциональный вибрационный макет на основе двухмассной динамической системы в соответствии с рисунком 3. К отличительным особенностям вибрационного макета можно отнести следующее:

- изменения жесткости упругой системы в широких пределах;
- возможность замены тарельчатых пружин (нелинейной жесткости) упругой системы на винтовые пружины сжатия-растяжения;
- лёгкую замену элементов макета для установки другой технологической оснастки;
- реализацию базы стенда одномассной вибрирующей платформы.

5. С целью исследования нелинейной жесткости тарельчатых пружин упругой системы вибрационного макета была разработана и изготовлена имитационная модель (рисунок 4.). По результатам испытаний имитационной модели на динамической испытательной машине PROLine 100kN фирмы Zwick/Roell (рисунок 5), была получена зависимость жесткости упругой системы тарельчатых пружин от хода рабочего органа вибрационного макета в соответствии с рисунком 6.

6. Для исследований электромеханических характеристик вибрационного макета была разработана структурная схема системы в соответствии с рисунком 7. К возможностям разработанной системы можно отнести:

- непрерывное измерение виброускорений элементов макета по трем осям с одновременным анализом полученных данных во временной и частотной областях;
- измерение потребляемой мощности и КПД электромоторов;

- спектральный анализ и другие преобразования измеренных сигналов в режиме реального времени;
- изменение частоты вращения приводных двигателей, контроль их синхронного режима;
- реализация замкнутой системы управления колебаниями стенда на базе микроконтроллера реального времени;
- хранение результатов экспериментов и измерений в структурированной базе данных.

7. В результате исследования динамики одномассной многоситовой вибрационной системы со стабильным самосинхронизирующимся приводом, совершающей орбитальные движения, впервые установлена технологическая возможность существенного повышения эффективности классификации сыпучих материалов в толстом слое сырья с принципиально новой последовательностью сепарации «от мелкого класса крупности к крупному». Это открывает перспективу для последующего конструирования высокоэффективных вибрационных сепарирующих машин нового типа.

8. На основе изучения динамики низкочастотных вибрационных колебательных систем спроектирован, изготовлен и испытан действующий макет дезинтегратора, который впервые в мировой практике позволяет адекватно моделировать промышленный процесс получения строительного щебня из прочных и особо прочных горных пород по гранулометрической характеристике и форме получаемых частиц. Использование подобного устройства позволит существенно повысить достоверность и оперативность оценочных работ при разведке и постановке на баланс месторождений нерудных строительных материалов. Этот результат проекта переходит на стадию промышленной реализации.

9. Исследована нелинейная динамика привода вибрационных машин и устройств, приводимых от электродвигателя, расположенного на неподвижном основании, через гибкое сочленение. Показано, как оптимальным образом должны соединяться валы дебалансов машины и приводных электродвигателей, чтобы избежать нежелательных резонансных явлений в приводе.

10. Уточнены современные методы проектирования и расчета вибрационных машин с механическими (дебалансными) возбудителями; получены формулы для определения необходимых и устранимых энергозатрат в таких вибрационных машинах.

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

12. Показано, что явление стохастического резонанса 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, это явление может быть использовано в вибрационных технологиях как способ резонансного усиления периодического воздействия.

13. Обобщение результатов рентгеновских микротомографических исследований позволило выявить некоторые общие зависимости и закономерности, характеризующие взаимосвязь отдельных параметров микроструктуры исследуемых материалов, в данном случае, основных типов изверженных горных пород – гранитов и габбро-диабазов, а именно:

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

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

14. Проведённые рентгеновские микротомографические исследования дают основания и исходные данные для проектирования новых и совершенствования существующих вибрационных машин и устройств, предназначенных для энергоэффективной дезинтеграции природных и техногенных материалов.

15. Рассмотрено поведение слоя сыпучего материала над интенсивно вибрирующей плоскостью и исследованы характеристики его стационарного возбужденного состояния, при котором частицы материала совершают хаотическое газоподобное движение в поле силы тяжести. Рассмотренная система моделирует широко применяемый в различных технологиях «виброкипящий» слой на основе концепции «гранулярного газа».

16. Составлены 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.

17. При исследовании динамики сыпучих сред в условиях вибраций в целом:

- 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 энергии, расходуемой на поддержание стационарного состояния слоя;

- дано количественное описание явления „демона Максвелла“ (конкуренции кластеров).

18. Рассмотрен частный случай движения частицы в слое виброожигенного 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 виброожигенном слое, что позволило установить необходимое время пребывания материала в рабочей области сепаратора для полного извлечения парамагнитных частиц.

19. Разработанные теоретические основы при дальнейшем развитии и валидировании будут являться основной базой при создании энергетической оптимизации вибрационных процессов и технологий для самых различных отраслей промышленности и цифровой экономики.

20. По результатам исследований, выполненных в 2017 г., опубликованы предусмотренные плановым заданием 10 статей в журналах, индексируемых в базах

данных scopus и W.O.S. Проведена школа молодых учёных с тематической направленностью «Вибрационные эффекты в природе и технологиях».