

Описание выполненных в отчетном году работ и полученных научных результатов для публикации на сайте РНФ

Рассмотрена механико-математическая модель колебательной системы вибрационного макета с энергетически эффективным типом возбуждения колебаний рабочих органов. Вибрационная система состоит амортизированного корпуса и присоединенного к нему при помощи специальных пакетов винтовых пружин рабочего органа. 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. Впервые получены законы вынужденных колебаний вибрационной установки с учетом присоединенной массы (технологической нагрузки) при учете вязкого сопротивления движению, а также уравнение баланса энергозатрат 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.

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. Получены зависимости коэффициента запаса по устойчивости синхронно-синфазного режима вращения дебалансных вибровозбудителей, а также угла рассогласования фаз вращения роторов вибровозбудителей от производительности вибрационного устройства.

На основании проведенных теоретических исследований разработан многофункциональный вибрационный макет на основе двухмассной динамической системы. К уникальным отличительным особенностям вибрационного макета можно отнести следующие возможности: изменение жесткости упругой системы в широких пределах; замену тарельчатых пружин с нелинейной жесткостью на винтовые пружины сжатия-растяжения; замену платформенных элементов макета для установки различной технологической оснастки. Для всесторонних исследований электромеханических характеристик вибрационного макета и хранения результатов экспериментов и измерений в базе данных была разработана структурная схема контрольно-управляющей цифровой системы.

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.

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. Рабочими органами дезинтегратора являются две синхронно работающие щеки, совершающие сложные возвратно-поступающие и эллиптические движения. 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.

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. Получены приближенные формулы для присоединенной массы и для коэффициента присоединенного вязкого трения рабочего органа вибрационной машины с технологической нагрузкой, то есть с обрабатываемым сыпучим материалом. Уточнены современные методы проектирования и расчета вибрационных машин с механическими (дебалансными) возбудителями; получены формулы для определения необходимых и устранимых энергозатрат в таких вибрационных машинах. 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.

Обобщены результаты неразрушающих рентгеновских микротомографических исследований природных твердых материалов, что позволило выявить некоторые общие зависимости и закономерности, характеризующие взаимосвязь отдельных параметров микроструктуры исследуемых материалов, влияющих на процессы их вибрационной дезинтеграции. В работе с этой точки зрения исследованы основные типы прочных и особо прочных изверженных горных пород – гранитов и габбро-диабазов, используемых для производства высококачественного строительного щебня. Впервые установлены технологически важные явления:

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

- 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;

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

Проведенные 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.

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».

Впервые 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.

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.

Рассмотрен частный случай движения частицы в слое виброожиженного материала при действии объемной силы — движение парамагнитной частицы в рабочей области электромагнитного сепаратора. 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.

Разработанные теоретические основы при дальнейшем развитии и валидировании послужат базой энергетической оптимизации вибрационных процессов и технологий для самых различных отраслей промышленности и цифровой экономики.

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».

на английском языке

A mechanical and mathematical mock-up model of a vibrational system with energy-efficient vibration excitation for movable operating elements was studied. The vibrational system consists of a cushioned housing and an operating element attached to it by means of special coiled spring packages. The system is driven by two self-synchronizing unbalanced exciters mounted on the housing. The absence of rigid kinematic ties between the two exciters makes such a vibrational system extremely simple to maintain and reliable in operation; it is also fully balanced. For the first time, the laws of forced vibrations of a vibratory unit were established, with account of the attached mass (process load) and the viscous drag, and the energy balance equation for the operating mode of the system and equations for determining the equivalent coefficients of viscous friction were obtained. In addition, conditions were established for maintaining the synchronous antiphase motion regime for the movable operating elements required for effective and stable operation of the vibrational mock-up model in the quasi-resonance regime.

The research results enable estimation of the influence of the process load< for example, of the material being crushed on the dynamics and stability of the operating regime of the vibrational system in the vibrational mock-up model on the basis of a two-mass system with spatial motions of its movable operating elements. Dependencies were established between the stability safety factor for the synchronous in-phase rotation of unbalanced exciters, the angle of misalignment of the rotation phases of the vibrator exciter rotors and the performance of the vibratory device.

On the basis of the theoretical studies conducted, a multifunctional vibrational mock-up was developed based on a two-mass dynamic system. The following represent the unique distinctive features of the vibrational mock-up: a wide range of changes in the rigidity of the elastic system; substitution of disc springs with non-linear rigidity with compression/tension helical springs; replacement of platform elements of the mock-up model for the installation of various process equipment. For a comprehensive study of the electromechanical characteristics of the vibrational mock-up model and for the storage of the related experimental and measurement results in the database, a structural diagram was developed for a digital control system.

The results of the study of the dynamics of a single-mass multiscreen vibrational system with a stable self-synchronizing drive performing orbital movements enabled establishing for the first time the process feasibility of a significant improvement in the classification efficiency of granular materials in a thick layer of raw materials with a fundamentally new “fine-to-coarse” separation sequence. This opens the prospect for the subsequent design of high-efficiency vibratory separation machines of a new type.

Based on the study of the dynamics of low-frequency vibrational oscillating systems, a working model of a disintegrating mill was designed, manufactured and tested, which, for the first time in global practice, enables adequately simulating the industrial process of obtaining construction crushed stone from strong and particularly strong rocks in terms of the grain-size distribution characteristic and the shape of the particles produced. The movable operating elements of the disintegrating mill are represented by two synchronously operating jaws, performing complex reciprocating and elliptical motion. The use of such a device will significantly improve the reliability and efficiency of all estimations in the exploration and recognition of deposits of non-metallic building materials. This project result is currently transferred to the stage of industrial implementation.

Nonlinear drive dynamics was studied for vibratory machines and devices driven from an electric motor located on a stationary base and connected via a flexible joint. The optimal connection layouts were demonstrated for the unbalanced shafts of the machine and the electrical motors that prevent undesirable resonant phenomena in the drive. Approximate formulas were obtained for the attached mass and for the coefficient of attached viscous friction of the movable operating element of a vibratory machine upon availability of a process load (that is, of the granular material processed). Advanced design and calculation methods were refined for vibratory machines with mechanical (unbalanced) exciters; formulas were derived for determining the necessary and avoidable energy costs for such vibratory machines. It was shown that the phenomenon of stochastic resonance should be explained and studied on the basis of the vibration mechanics approach, since it represents a result of the change caused by the high-frequency disturbance in the effective rigidity of the system. In addition, it was shown that this phenomenon is typical for a wide range of nonlinear oscillators. Stochastic resonance studies are interdisciplinary in nature; this phenomenon may be used in vibrational technologies as a method of resonant amplification of periodic effects.

The results of non-destructive x-ray microtomographic studies of natural solid materials were summarized, enabling identification of a number of general dependencies and regularities characterizing the interrelationship of individual microstructure parameters of the materials being studied that affect the processes of their vibrational disintegration. From this point of view, the study covers the main types of strong and particularly strong igneous rocks (granites and gabbro-diabases) used in the manufacture of high-quality construction crushed rock. The following technologically important phenomena were first established:

- The concentration of pores decreases exponentially with increased pore sizes; there is, however, no unique dependence between the porosity and the pore concentration, which is associated with different pore sizes in the rock structure;
- Small capillary pores make the greatest contribution to the capacity of fine-porous samples: with increasing pore size, the proportion of larger pores in the sample also increases;
- The spherical shape factor of pores decreases exponentially with the increase in their sizes;
- The rock strength depends on the parameters of the pore space structure; lower compressive strength limits of granites, as compared to those of gabbro-diabases, are associated with low-sphericity pores, which leads to an increase in the coefficient of attenuation of the bond between mineral grains.

The X-ray microtomographic studies conducted provide the groundwork and initial data for designing new and improving existing vibratory machines and devices used for energy-efficient disintegration of natural and man-made materials.

The behavior of a bed of a granular material over an intensely vibrating plane was examined; the characteristics of its stationary excited state were studied, in which the material particles perform a chaotic gas-like motion within the gravity field. The system simulates the vibrofluidized bed, which is widely used in various technologies, on the basis of the concept of a granular gas.

For the first time, equations for the spatial variation of the particle concentration and their kinetic energy (the so-called granular temperature) were compiled and a general analytical solution was found for these equations, as well as a solution for the boundary problem of a bed with a free top surface and a given bottom plane motion.

In the studies of the dynamics of granular media under vibration conditions in general:

- Equations were obtained for the stationary state of a vibro-excited bulk material (granular gas), taking into account the non-Maxwellian law of velocity distribution and the availability of significant gradients of both concentration and granular temperature;

- Nonlinear boundary conditions were established for the vibrating and fixed planes;

- The problem of a bed with a free surface was formulated and analytically solved;

- Simple formulas were derived for calculating the granular temperature, concentration and pressure near the vibrating plane and at any point along the height of the bed, as well as for the Leidenfrost concentration surge near the exciting plane;

- A formula was derived for the energy consumed when maintaining the steady state of the bed.

A special case of particle motion in a bed of a vibrofluidized material under the effects of a volume force, the motion of a paramagnetic particle in the working area of an electromagnetic separator, was studied.

The mean time of particle recovery was estimated; the delay in recovery caused by collisions between the particles to be recovered with other particles of the initial material in the vibrating bed was statistically estimated, which allowed establishing the residence time of the material in the working area of the separator required for the complete recovery of paramagnetic particles. With further development and validation, the theoretical groundwork developed will serve as the basis for energy use optimization in vibration processes and technologies in a wide variety of industries and in the digital economy.

Based on the results of the research carried out in 2017, ten articles were published in journals indexed in the Scopus and WoS databases, as envisaged by the target plan.

The School for Young Scientists event was held, focusing on Vibration Effects in Nature and Technology.