

На правах рукописи

ИВАНОВ Кирилл Сергеевич

**ВИБРОУДАРНОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ СЫПУЧИХ СРЕД  
И ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ – ПРИЛОЖЕНИЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ  
И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СИТОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ**

01.02.06 – динамика, прочность  
машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем машиноведения Российской академии наук и Научно-производственной корпорации «Механобр-техника»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
БЛЕХМАН Илья Израилевич

Официальные  
оппоненты: ПАНОВКО Григорий Яковлевич, доктор  
технических наук, профессор, ФГБУН «Имаш  
РАН», зав. лаб. «вибрационной механики»

БАШКАРЕВ Альберт Яковлевич, доктор  
технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «СПбПУ», советник ректората,  
заместитель председателя НТС

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт проблем  
комплексного освоения недр Российской  
академии наук

Защита состоится «26» декабря 2013 г. в 18 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.229.13 при ФГБОУ ВПО «Санкт-  
Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:  
Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, 1 учебный корпус ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке  
ФГБОУ ВПО «СПбПУ» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул.  
Политехническая, д. 29.

Автореферат диссертации доступен на официальном сайте ФГБОУ ВПО  
«СПбПУ» ([http://www.spbstu.ru/science/council\\_defends.html](http://www.spbstu.ru/science/council_defends.html)).

Автореферат разослан «    » ноября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 212.229.13 д.т.н., профессор



Борис Семенович  
ГРИГОРЬЕВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Разнообразные технологические процессы, направленные на переработку сыпучих материалов, играют первостепенную роль как в строительстве, дорожном деле и обогащении руд, так и в достаточно тонких областях, включая фармакологию, чем и объясняется большая прикладная значимость механики сыпучих сред.

Одной из важных практических задач является разработка теории вибрационного грохочения. Решению этой и смежных проблем посвящен ряд работ отечественных и зарубежных исследователей. Решающий вклад в теорию и практику вибрационной классификации сыпучих материалов внесли ученые СССР и Российской Федерации – Л.А. Вайсберг, Д.Н. Лифлянд, В.А. Перов, В.А. Олевский, В.В. Гортинский, И.И. Блехман, Р.Ф. Нагаев, Д.Г. Рубисов, В.А. Огурцов а также ряд зарубежных ученых, в первую очередь, А. Годен, Дж. Феррара, Т. Бреретон. В результате работы над данной диссертацией разработана теория вибрационного грохочения, опирающаяся на широкий научный и производственный опыт НПК «Механобр-техника» и применение подходов классической механики совместно с методами компьютерного моделирования и оптимизации. Также в диссертации рассматривается ряд смежных задач о вибрационном перемещении твердых тел. В частности, предлагается новое объяснение до сих пор вызывающего полемику движения в системе, известной под названием маятник Челомея.

**Цель работы** состоит в изучении поведения под действием вибрации систем, включающих в себя сыпучую среду, разработке и применении для практических целей методов моделирования и поиска оптимальных параметров таких систем, а также решении ряда смежных задач, включая разработку теории грохочения и совершенствование методов расчета вибрационных грохотов.

В соответствии с целью работы были поставлены следующие **научные задачи диссертации:**

- 1) сравнительное исследование двух математических моделей, описывающих поведение сыпучей среды в сообщающихся сосудах под действием вибрации: полной системы и “медленной” системы, полученной методом прямого разделения движений;

- 2) разработка математической модели и программы расчета узлов нового типа колосникового грохота для разделения техногенного сырья;
- 3) исследование вибрационного перемещения, возникающего в частном варианте маятника Челомея;
- 4) разработка алгоритма и программы для исследования движения упругой частицы по вибрирующей шероховатой плоскости, изучение особенностей поведения такой системы;
- 5) создание эффективной численной модели низкой ресурсоемкости для процесса вибрационного грохочения;
- 6) разработка метода автоматической оптимизации параметров вибрационных грохотов в соответствии с заданными критериями.

**Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов.** Разработка расчетных моделей исследуемых систем проводилась на основе методов вибрационной механики, а также классических методов теории грохочения. Для анализа систем применялись стандартные методы численного интегрирования на основе использования математических пакетов, методы из семейства Рунге-Кутты, адаптированные для негладких систем, а также ряд оригинальных алгоритмов, предложенных и разработанных в процессе работы над диссертацией. Оптимизация параметров вибрационного грохота производилась с использованием метода роя частиц. Экспериментальные исследования производились с использованием оригинального оборудования лаборатории вибрационной механики ИПМаш РАН и НПК «Механобр-техника».

Достоверность полученных научных результатов обеспечена применением проверенных методов решения и анализа задач вибрационной механики и теории грохочения, научно-обоснованным выбором расчетных моделей и подтверждена согласованностью результатов экспериментальных, численных и аналитических исследований.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- 1) изучен и описан новый эффект неполного выравнивания уровней сыпучей среды в сообщающихся сосудах под действием вибрации, выполнено сравнительное численное исследование дифференциальных уравнений полной и упрощенной методом прямого разделения движений систем, установлено хорошее согласие решений этих уравнений;

2) создана методика и программа расчета колосников вибрационного грохота для разделения техногенного сырья, предложен ряд усовершенствований

конструкции, на которые получены патенты;

3) предложено новое объяснение эффекта перемещения шайбы, насаженной на продольно вибрирующий стержень («маятник Челомея») как результата поперечных деформаций стержня при его растяжении и сжатии;

4) составлен алгоритм и программа для моделирования поведения частицы на вибрирующей наклонной шероховатой плоскости, позволяющая изучать процесс вибрационного перемещения частицы в двумерном случае;

5) продемонстрировано наличие хаотических режимов поведения частицы, подпрыгивающей над вертикально вибрирующей плоскостью, предложено описание механизма возникновения хаоса в системах подобного типа;

6) установлено соответствие уравнений безотрывного движения частицы на вибрирующей плоскости и движения шайбы вдоль стержня, подверженного продольному вибрационному возбуждению;

7) разработана новая модель процесса грохочения и соответствующая компьютерная программа, обладающая преимуществом большей вычислительной простоты сравнительно с распространенными численными методами, и большей гибкости применения по сравнению с известными аналитическими подходами;

8) с использованием созданной программы, разработан метод, позволяющий автоматически производить предварительную оценку оптимальных по заданным критериям параметров вибрационных грохотов.

**На защиту выносятся** следующие положения:

1) математическая модель одного из эффектов неполного выравнивания уровней сыпучей среды в сообщающихся сосудах; применимость метода прямого разделения движений к исследованию этой модели;

2) методика и программа для расчета колосников вибрационного грохота-сепаратора для разделения техногенного сырья;

3) новое физическое объяснение и математическая модель перемещения шайбы, насаженной с натягом на продольно вибрирующий стержень;

4) алгоритм и соответствующая программа для моделирования поведения частицы на вибрирующей наклонной шероховатой плоскости;

5) описание механизма возникновения хаоса в системе, состоящей из частицы, подпрыгивающей над вертикально вибрирующей плоскостью;

- 6) соответствие уравнений, описывающих поведение частицы на вибрирующей плоскости и движение шайбы вдоль стержня, подверженного продольному вибрационному возбуждению;
- 7) новый подход к моделированию процесса вибрационного грохочения и компьютерная программа на основе этого подхода;
- 8) методика и программа автоматической оценки оптимальных по заданным критериям параметров вибрационного грохота.

**Практическая полезность работы** состоит в возможности использовать ее результаты для создания новых вибрационных машин для переработки сыпучих материалов. Частично эти результаты уже использованы – при разработке колосникового грохота-сепаратора для разделения техногенного сырья и разработке классических вибрационных грохотов. Результаты исследования маятника Челомея могут быть использованы при разработке рекомендаций по снижению риска аварийных ситуаций в машинах, работающих в условиях ударов и вибрации.

Методическая ценность диссертации состоит в возможности использовать разработанные методы моделирования при исследовании ряда технологических процессов, в которых участвует сыпучая среда.

Диссертация выполнялась при поддержке грантов РФФИ: 06-08-01015-а, 09-08-00620-а, 12-08-01009-а, 12-05-31376-а; федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (госконтракт № 02.740.11.0027), «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (госконтракт № 16.515.12.5002).

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены и обсуждались на Международной научно-практической конференции Горного института, Санкт-Петербург (2009); на V международной научной конференции «Инновационное развитие и востребованность науки в современном Казахстане», Алматы, Казахстан (2011); на Международной школе-конференции «Актуальные проблемы механики» (Advanced Problems in Mechanics), Санкт-Петербург (2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013); на международном симпозиуме Rare Attractors and Rare Phenomena in Nonlinear Dynamics (2011), Рига, Латвия; на Международных конференциях «International Conference On Vibration Problems», Прага, Чешская Республика (2011) и Лиссабон, Португалия (2013).

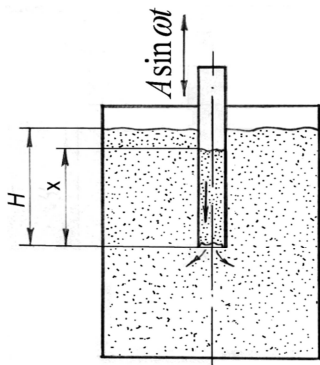
**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, 4 из которых в журналах, входящих в перечень ВАК, получено два патента. В совместных работах автор принимал непосредственное участие в исследовании и компьютерном моделировании рассматриваемых систем. Автором разработана теория рассматриваемых процессов и основные алгоритмы численных исследований, написаны соответствующие программы. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных обозначений, списка использованных источников, содержащего 52 наименования и трех приложений. Общий объем работы составляет 148 страниц, включая 38 рисунков, 2 таблицы и 3 приложения.

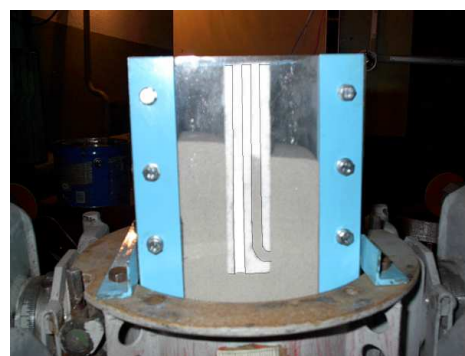
## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертации, дана общая характеристика работы, указаны основные положения, выносимые на защиту, дана постановка задачи, приведены сведения об апробации работы.

**Первая глава посвящена** изучению эффекта установления неодинаковых уровней сыпучей среды в сообщающихся сосудах под действием вибрации. Принципиальная схема изучаемой системы приведена на рисунке 1. Демонстрационная установка представлена на рисунке 2.



**Рис. 1** Схема системы



**Рис. 2** Экспериментальная установка

Жесткая вертикальная трубка, соединенная с сосудом, была опущена в сыпучую среду. Сосуду сообщались вертикальные колебания по закону  $A \sin \omega t$ . Наблюдалось истечение сыпучей среды из трубки с установлением определенного уровня, отличного от уровня среды в основном сосуде.

Для координаты  $x$ , соответствующей столбу среды (рисунок 1), было записано уравнение:

$$\rho S x \ddot{x} = -\rho g S x + \rho S x A \omega^2 \sin \omega t + F(\dot{x}, x) + R_e(\dot{x}, x, \omega t), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность сыпучего материала,  $S$  – площадь сечения трубки,  $g$  – ускорение свободного падения,  $A$  – амплитуда и  $\omega$  – частота колебаний

сосуда,  $F(\dot{x}, x)$  – сила трения материала о внутреннюю поверхность трубки:

$$F(\dot{x}, x) = \begin{cases} -F(x) & \text{при } \dot{x} > 0 \\ F(x) & \text{при } \dot{x} < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

$$-F(x) < F(\dot{x}, x) < F(x) \quad \text{при } \dot{x} \equiv 0.$$

Через  $R_e(\dot{x}, x, \omega t) = R_0(\omega t) + R(\dot{x}, x)$  обозначена сила, действующая на нижнее сечение столба материала в трубке, где  $R_0(\omega t) = S \rho g H$  – сила, действующая на данное сечение со стороны материала в основном сосуде, а  $R(\dot{x}, x)$  – сила «торцевого сопротивления» при прохождении выходного сечения трубки, считающаяся неодинаковой для входа и выхода материала.

Исследование системы с помощью метода прямого разделения движений позволяет привести уравнение (1) к виду

$$S \rho X \ddot{X} = S \rho g (H - X) - \frac{1}{2} (R_+ - R_-) - \frac{1}{\pi} [f \rho g l X^2 + (R_+ + R_-)] \arcsin \frac{\dot{X}}{A \omega}, \quad (|\dot{X}| < A \omega) \quad (3)$$

где  $R_+$  и  $R_-$  – входное и выходное сопротивление соответственно. Отсюда получается выражение для квазиравновесного уровня среды

$$X_* = H - \frac{1}{2} \frac{(R_+ - R_-)}{S \rho g} \quad (4)$$

С использованием экспериментальных данных, из последнего выражения и оценки средней скорости истечения материала из трубки были получены значения для  $R_+$  и  $R_-$ .

Серия вычислительных экспериментов при варьируемом параметре  $H$  с использованием полной системы (1) и упрощенной (3) подтвердила хорошую применимость метода прямого разделения движений. Наложенные графики решений для полной (красные линии) и упрощенной (цветные линии) систем представлены на рисунке 3.



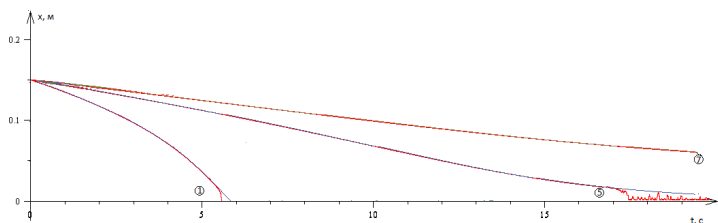


Рис. 3

Изученный эффект может быть использован в устройствах для переработки сыпучих тел, в том числе в вибрационных насосах и дозирующих устройствах.

Во второй главе рассмотрены некоторые элементы теории нового колосникового грохота-сепаратора для разделения отходов. Просеивающая поверхность грохота составлена из нескольких рядов колосников (рисунок 4). Колосник представляет собой консольную балку прямоугольного сечения и постоянной толщины, ширина которой уменьшается по направлению к концу (рисунок 5).

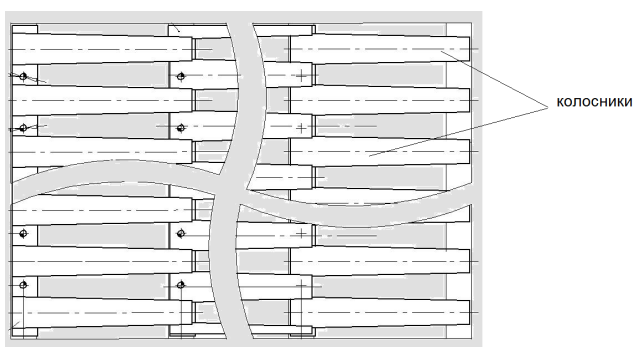


Рис. 4 Просеивающая поверхность грохота, вид сверху

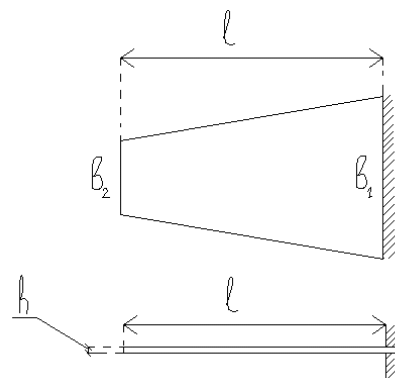


Рис. 5 Схема колосника

В предположении о малости суммарной массы колосников по сравнению с массой корпуса, рассматривалось уравнение колебаний отдельного колосника, записанное в следующем виде:

$$\frac{E \left( b_1 - (b_1 - b_2) \frac{x}{l} \right) h^3}{12} \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} - \frac{E (b_1 - b_2) h^3}{6l} \frac{\partial^3 w(x, t)}{\partial x^3} + \rho \left( b_1 - (b_1 - b_2) \frac{x}{l} \right) h \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + C \left( b_1 - (b_1 - b_2) \frac{x}{l} \right) \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} = 0, \quad (5)$$

здесь  $b_1$  и  $b_2$  – ширина основания и конца колосника соответственно,  $l$  – его длина,  $h$  – толщина,  $E$  – модуль Юнга материала, а  $\rho$  – плотность. Через  $C$  обозначен коэффициент сопротивления перерабатываемого материала, отнесенный к единице площади сечения колосника.

С применением метода Релея составлена компьютерная программа для вычисления частот свободных колебаний колосников, также численно исследованы вынужденные колебания колосников при наличии диссипации,

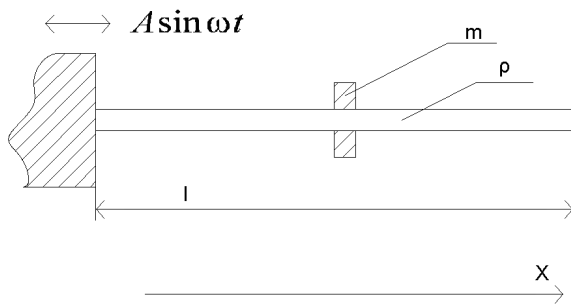
получены амплитудно-частотные характеристики системы. С помощью разработанных программ и экспериментальных исследований найдено значение коэффициента диссипации  $C$ , соответствующее работе лабораторного образца устройства под нагрузкой.

Была получена оценка для максимального напряжения в колоснике:

$$\sigma_{\max} = \frac{Eh}{b_1 l^2} \left( -\frac{1}{(b_1 - b_2)} - \frac{2b_2}{(b_1 - b_2)^2} \left( \ln \frac{b_2}{b_1} - 1 \right) + \frac{2b_1 b_2}{(b_1 - b_2)^3} \ln \frac{b_2}{b_1} \right)^{-1} A \quad (6)$$

В результате исследований были предложены усовершенствования в конструкции грохота, на которые получены патенты (ПМ 112651 от 20.01.2012 и ИЗ 2484905 от 20.06.2013).

**В третьей главе** представлен новый механизм возникновения вибрационного перемещения в системе, представляющей собой частный случай маятника Челомея, при чисто продольных колебаниях стержня. Схема модели представлена на рисунке 6.



**Рис. 6 Конфигурация модели**

Показано, что вибрационное перемещение в такой системе может возникнуть из-за расширения стержня при его деформации под действием сил в заделке при продольных колебаниях. Рассмотрение проведено в предположении о квазистатической деформации стержня, что допустимо,

если частота возбуждения вибрации заметно меньше первой собственной частоты колебаний стержня. Уравнение движения было записано в следующем виде:

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t + F_f, \quad (7)$$

где

$$F_f = \begin{cases} -\eta f S_c E \left( \varepsilon_n^0 - \frac{\rho A \omega^2 (l-x)}{2E} \sin \omega t \right) & \text{при } \dot{x} > 0, \\ \eta f S_c E \left( \varepsilon_n^0 - \frac{\rho A \omega^2 (l-x)}{2E} \sin \omega t \right) & \text{при } \dot{x} < 0, \\ -\eta f S_c E \left( \varepsilon_n^0 - \frac{\rho A \omega^2 (l-x)}{2E} \sin \omega t \right) < F_f < \\ < \eta f S_c E \left( \varepsilon_n^0 - \frac{\rho A \omega^2 (l-x)}{2E} \sin \omega t \right) & \text{при } \dot{x} \equiv 0, \end{cases}$$

здесь  $x$  – координата сечения стержня в подвижной системе отсчета, связанной с колеблющимся основанием и одновременно координата шайбы вблизи этого сечения,  $mA\omega^2\sin\omega t$  – сила инерции в относительном движении,  $F_f$  – сила трения, возникающая между шайбой и стержнем,  $m$  – масса шайбы,  $A$  – амплитуда колебаний основания стержня,  $\omega$  – их частота,  $f$  – коэффициент трения скольжения, а  $S_c$  – площадь контакта стержня и шайбы, а  $\varepsilon_n^0$  – начальная деформация стержня, характеризующая «натяг» посадки шайбы. Рассматривалось кулоновское трение.

Задача исследовалась методом поэтапного интегрирования. Вычисления показали, что для определенного достаточно узкого диапазона значений параметров системы величина проскальзывания шайбы за период в одном направлении превышает величину проскальзывания в обратном, чем и объясняется вибрационное перемещение. Пример типичного графика перемещений за период возмущения колебаний стержня представлен на рисунке 7. Также было исследовано влияние изменения параметров системы на результирующую среднюю скорость перемещения шайбы. Зависимость скорости от коэффициента трения представлена на рисунке 8.

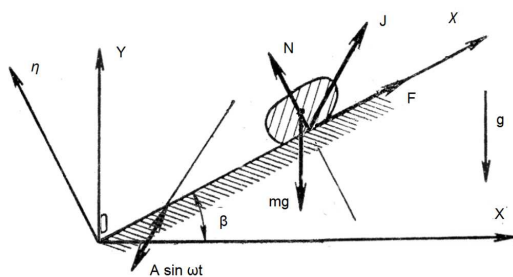
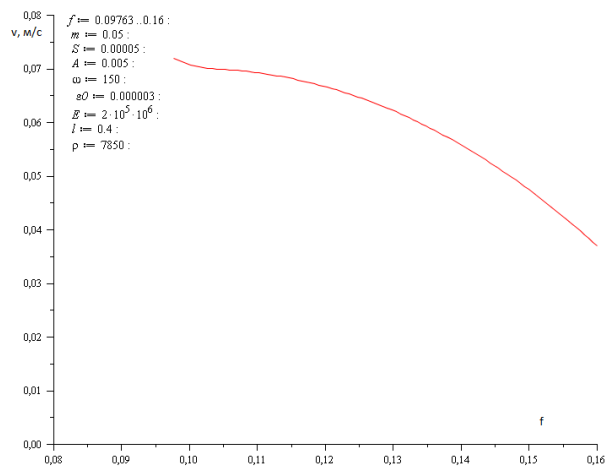
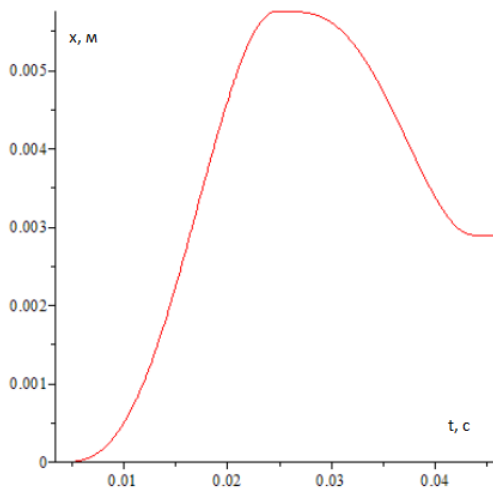


Рис. 7

Рис. 8

**Рис. 9 Общая схема системы** В четвертой главе приводится описание модели движения упругой частицы на вибрирующей шероховатой поверхности. Схема системы представлена на рисунке 9. Моделирование проводилось прямым методом с постоянным временным шагом интегрирования. Учитывались следующие физические параметры системы:  $\nu$  – коэффициент трения скольжения,  $\lambda$  – коэффициент мгновенного трения при ударе,  $r$  – коэффициент восстановления при ударе,  $\beta$  – угол наклона плоскости к горизонту. Разработанное программное обеспечение допускает моделирование произвольных колебаний поверхности.

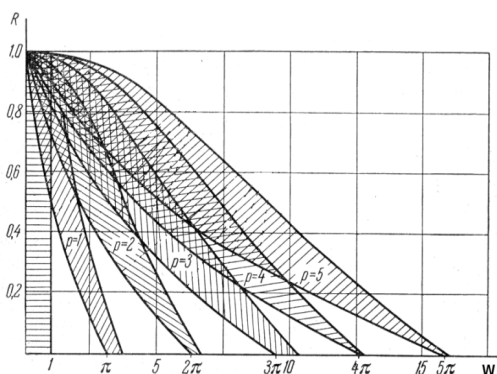
Установлена аналогия уравнения безотрывного движения частицы в такой системе и уравнения движения шайбы в системе, рассмотренной в предыдущей главе. Так уравнение движения частицы на наклонной плоскости имеет вид:

$$m\ddot{\eta} = mA\omega^2 \cos \alpha \sin \omega t + F \quad (8)$$

Здесь колебания плоскости задаются через их амплитуду  $A$  и угол наклона к горизонту оси вибрации  $\alpha$ . Если «пометить» параметры маятника Челомея звездочкой, можно вывести:

$$\begin{aligned} m &= m^*, \\ A \cos \alpha &= A^*, \\ fm &= \eta^* f^* S_c E^* \varepsilon_n^{0*}, \\ mA\omega^2 \sin \alpha &= \frac{\rho^* A^* \omega^{*2} l^*}{4E^*}, \end{aligned} \quad (9)$$

Также рассмотрен частный случай движения частицы по горизонтальной плоскости, совершающей вертикальные гармонические колебания. При коэффициенте восстановления, близком к единице, существует большое (в



**Рис.10 Области устойчивости периодических режимов**

пределе – бесконечно большое) число устойчивых в малом движении с периодом, кратным периоду колебаний плоскости (диаграмма областей устойчивости режимов с  $p = T/T_0$  колебаниями плоскости на один подскок частицы для параметров  $R$  и  $w = A\omega^2/g$  на рисунке 10). Показано, что этого достаточно, чтобы при численном моделировании, вследствие погрешности

вычислений, поведение системы выглядело как хаотическое. Так, например, на рисунках 11 и 12 можно наблюдать изменение характера движения частицы для значений коэффициента восстановления 0 и 0.95. Части диаграмм, примыкающие к осям  $\dot{y}$ , представляют скачкообразное изменение скорости частицы при ее падении на плоскость  $\eta = 0$ . На рисунке 12 можно наблюдать переход к хаотическому поведению.

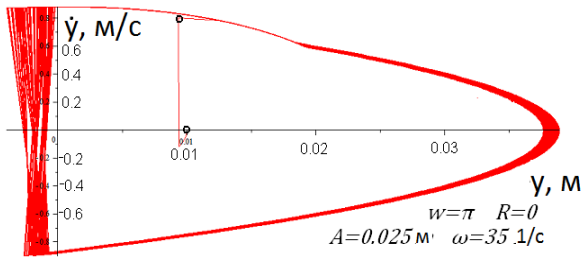


Рис. 11

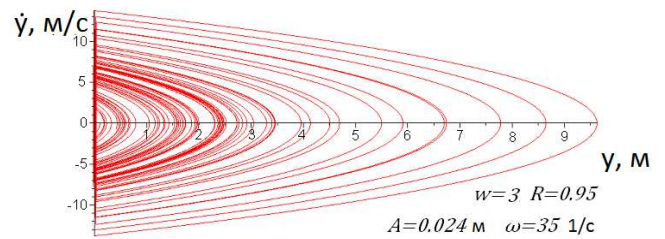


Рис. 12

В пятой главе представлена новая модель процесса вибрационного грохочения. Преимуществом разработанной модели является сравнительно низкая ресурсоемкость вычислений при высокой точности. В основе лежит обобщение ряда классических феноменологических моделей процесса грохочения, сыпучая среда представляется в виде набора пространственных ячеек (рисунок 13).

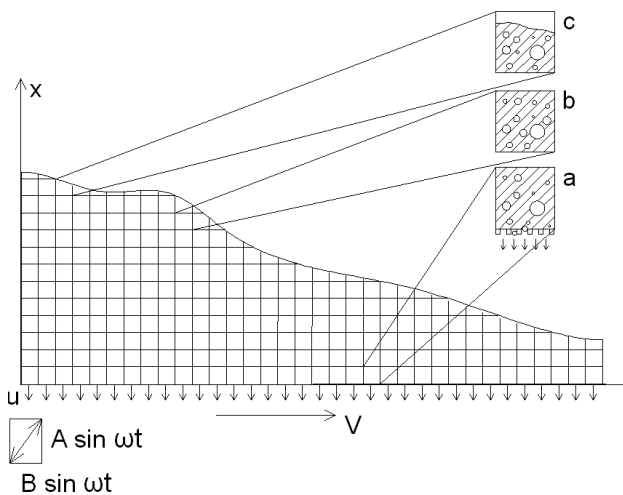


Рис. 13. Продольное сечение слоя материала: разбиение на ячейки

Различается моделирование ячеек двух классов: ячеек в толще слоя сыпучего материала (13. b, c), контактирующих только с другими ячейками, и ячеек из области контакта с ситом (13. a). На входе алгоритм принимает следующие параметры: интенсивность подачи материала, параметры вибрации и скорость прохождения материала через отверстия просеивающей поверхности (предполагается, что

эта величина постоянна для заданного типа устройств и перерабатываемого материала), размеры просеивающей поверхности и угол ее наклона,

площадь живого сечения и диаметры отверстий сита, а также исходный гранулометрический состав материала в виде набора узких классов задаваемой крупности. Отдельно задаются параметры, характеризующие интенсивность процессов сегрегации и перемешивания в слое материала. На выходе программа позволяет получить извлечения для каждого из узких классов задаваемой крупности, производительность, а также все остальные производные параметры, характеризующие протекание процесса грохочения.

Отток материала из ячеек области контакта характеризуется в основном «вероятностью просеивания»  $P(d_i)$  для набора классов исходного материала ( $d_i$ ). Традиционно используемая для этого параметра формула Годена не учитывает возможности совместного прохождения через отверстие нескольких мелких частиц сыпучего материала:

$$P^{d_0}(d_i) = \varphi \left( 1 - \frac{d_i}{d_0} \right)^2$$

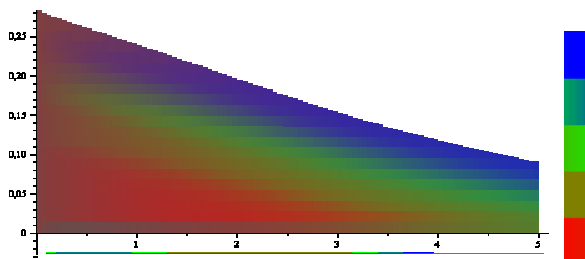
Поэтому для увеличения точности разрабатываемого подхода была использована усовершенствованная формула А.Е. Пелевина:

$$P(d_i) = P^{d_0}(d_i) + \sum_{j, (d_j+d_i \leq d_0)} F_{k,0}(d_j) P^{d_0}(d_j) P^{d_0-d_j}(d_i), \quad (10)$$

где через  $P^{d_l}(d_m)$  обозначена условная «вероятность» прохождения частицы класса  $d_m$  при прохождении частицы класса  $d_l$ .

Сегрегация и перемешивание рассматривались как процессы, протекающие равномерно с заданной интенсивностью.

Помимо упомянутых выше параметров процесса грохочения на выходе программа составляет диаграмму распределения частиц по



**Рис. 14. Диаграмма распределения частиц по крупности в слое**

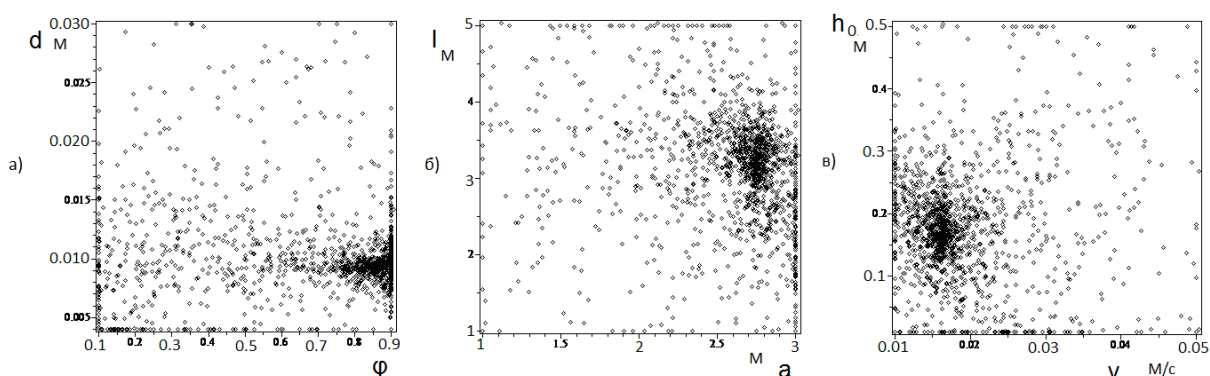
крупности в продольном сечении слоя материала (см. рисунок 14, преобладание мелких частиц соответствует красному цвету, а крупных – синему). Дискретное представление материала позволяет проводить расчеты для нестандартных изогнутых поверхностей сита и переменных

полей вибрации. Дополнительным преимуществом метода является низкая ресурсоемкость вычислений.

**Шестая глава** посвящена описанию возможностей совместного использования алгоритма моделирования процесса вибрационного грохочения, представленного выше, и методов численной оптимизации. Составлена программа для предварительного выбора оптимальных технологических параметров разрабатываемых классических грохотов.

Представленный метод базировался на применении метода роя частиц в качестве исходного алгоритма численной оптимизации. Этот метод имитирует поведение стаи роящихся насекомых. Моделирование движения производится с учетом «социальных», «индивидуальных» и случайных, «импульсивных», аспектов поведения особей в рое. Целевая функция задается на выходных параметрах разработанной модели грохочения.

Примеры расчетов по программе представлены на рисунке 15. За целевую функцию была взята эффективность извлечения самого мелкого класса. Области сгущения точек соответствуют оптимальному значению параметров. На рисунке а) живое сечение и диаметр отверстия сита, б) длина и ширина сита, в) скорость движения материала по ситам и толщина слоя материала под питателем.



**Рис. 15** Результат применения метода роя частиц совместно с предложенной моделью грохочения

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Разработана теория и составлена компьютерная модель эффекта неполного выравнивания уровней сыпучей среды в сообщающихся сосудах под действием вибрации. Проведено исследование упрощенной системы, полученной с помощью метода прямого разделения движений. Показано, что результаты моделирования полной и упрощенной системы хорошо

согласуются с экспериментальными данными. Найдена зависимость устанавливающегося уровня сыпучей среды от параметров системы.

2. Разработаны элементы теории нового колосникового грохота-сепаратора для разделения отходов. Приведены основные соотношения для определения технических параметров устройства. Даны рекомендации по совершенствованию грохота, оформлены патентные заявки, получены два патента.

3. Сформулировано новое физическое объяснение эффекта вибрационного перемещения в частном варианте маятника Челомея. Представлено математическое описание системы, получены условия возникновения в ней микропроскальзывания. Проведена серия вычислений, показывающая влияние параметров системы на характер движения в ней.

4. Составлен алгоритм и соответствующая программа для моделирования поведения частицы на вибрирующей наклонной шероховатой плоскости при произвольных продольных и поперечных колебаниях плоскости. Выявлена аналогия между рассматриваемой системой и изученным в предыдущей главе частным вариантом маятника Челомея. Продемонстрировано наличие хаотических режимов поведения такой системы, предложено описание механизма возникновения хаоса.

5. Разработана новая модель и соответствующая программа для изучения процесса грохочения, обладающая преимуществом большей вычислительной простоты по сравнению с дискретноэлементными методами, и лучшей общностью и гибкостью применения по сравнению с распространенными аналитическими подходами.

6. На основе представленной модели процесса грохочения разработан метод автоматической оптимизации по заданным критериям конструктивных и технологических параметров вибрационного грохота или, в случае нестандартных грохотов, формы просеивающей поверхности и поля вибрации.

#### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Блехман И.И. Об износе оборудования в условиях вибрации и ударных нагрузок / И.И. Блехман, Л.И. Блехман, В.Б. Васильков, К.С. Иванов, К.С. Якимова // Обогащение руд.– 2011.– №6.– С. 40–45.

2. Арсентьев В.А. Методы динамики частиц и дискретных элементов как инструмент исследования и оптимизации процессов переработки



природных и техногенных материалов / В.А. Арсентьев, И.И. Блехман, Л.И. Блехман, Л.А. Вайсберг, К.С. Иванов, А.М. Кривцов // Обогащение Руд.– 2010.– №1.– С. 30–35.

3. Феоктистов А.Ю. Применение метода дискретных элементов для моделирования процессов в горнометаллургической промышленности / А.Ю. Феоктистов, А.А. Каменецкий, Л.И. Блехман, В.Б. Васильков, И.Н. Скрыбин, К.С. Иванов // Записки Горного института.– 2011.– Т. 187.

4. Иванов К.С., Вайсберг Л.А., Мельников А.Е. Совершенствование подходов к математическому моделированию процесса вибрационного грохочения / К.С. Иванов, Л.А. Вайсберг, А.Е. Мельников // Обогащение руд.– 2013.– №2.– С. 22-26.

5. Ivanov K.S. Optimization of Vibrational Screening Process / K.S. Ivanov // Proc. int. conf. ICOVP 2011, Technical University of Liberec.– 2011.– P. 174–179.

6. Ivanov K.S. Vibrational translation due to transversal strain in a Chelomei pendulum-like system/ K.S. Ivanov // Proc. of the XXXVIII Summer School “Advanced Problems in Mechanics” (APM – 2010).– St. Petersburg: IPME RAS, 2009.– P. 289–298.

7. Blekhman I.I. Behavior of granular materials in communicating vessels with vibrations: mathematical formulation/ I.I. Blekhman, K.S. Ivanov //Book of Abstracts of the XXXVI Summer School “Advanced Problems in Mechanics” (APM – 2008).– СПб.: КОМИЛЬФО, 2008.– С. 36.

8. Blekhman I.I., Ivanov K.S. On a vibroimpact system in which chaos is caused by the rare attractor packing / I.I. Blekhman, K.S. Ivanov // Proc. of 2nd Intern. Symp. «Rare Attractors and Rare Phenomena in Nonlinear Dynamics» (RA'11).– Riga–Jurmala: 2011.– P. 95–100.

9. Иванов К.С. Перспективы использования методов стохастической оптимизации при решении задач разработки вибрационного оборудования / К.С. Иванов // Сб. трудов V международной научной конференции «Инновационное развитие и востребованность науки в современном

Казахстане», часть 4.– Алматы: Фонд Первого Президента Республики Казахстан – Лидера Нации, 2011.– С. 70–73.

10. Ivanov K.S. Modeling and optimization of vibrational screening process / K.S. Ivanov // Proc. of the XXXIX International Summer School Conference APM 2011.–СПб.: 2011.– Р. 213–218.

**Также получены патенты:**

1. Вибрационный грохот для сортировки твёрдых бытовых отходов : патент РФ ПМ 112651 от 20.01.2012.

2. Вибрационный грохот для сортировки твёрдых бытовых отходов : патент РФ ИЗ 2484905 от 20.06.2013.