

И.И. БЛЕХМАН

**ТЕОРИЯ ВИБРАЦИОННЫХ
ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ**

**ВИБРАЦИОННАЯ МЕХАНИКА
И ВИБРАЦИОННАЯ ТЕХНИКА**



ИД «Руда и Металлы»
Санкт-Петербург, 2013

ББК 22.213
Б 68
УДК 531.3+534

Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. – СПб., Издательский дом «Руда и Металлы», 2013. – 640 с., ил.154.

ISBN 978-5-98191-074-6

В книге рассмотрены, объяснены, физически и математически описаны многочисленные, иногда весьма неожиданные физические эффекты, возникающие при действии вибрации на сыпучие, жидкие и комбинированные среды, а также на механизмы и машины. Эти эффекты находят многочисленные полезные применения в технике, причем возможности здесь далеко не исчерпаны. Иногда такие эффекты вредны и даже опасны.

Особое внимание уделяется приложениям к машинам и технологиям переработки природных и техногенных материалов.

Теоретический анализ проводится в книге на основе нового единого подхода, названного автором вибрационной механикой.

Книга предназначена для изобретателей, конструкторов и технологов, разрабатывающих и эксплуатирующих вибрационные машины. Она может быть полезной специалистам в области нелинейной динамики и теории колебаний, а также студентам и аспирантам указанных специальностей.

Рецензент: чл.-корр. РАН, директор Института проблем машиноведения РАН *Д.А.Индеев*

ISBN 978-5-98191-074-6

ББК 22.213, Б, 68,
УДК 531.3+534

© И.И.Блехман, 2013

© Оформление. ЗАО «Изд.дом
«Руда и Металлы», 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	15
-------------------	----

Часть I

ОСНОВЫ ВИБРАЦИОННОЙ МЕХАНИКИ И ВИБРАЦИОННОЙ РЕОЛОГИИ; ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕОРИИ ВИБРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И УСТРОЙСТВ

Глава 1 Введение: вибрационная механика – новый раздел теории нелинейных колебаний и основа теории вибрационных процессов и машин	21
1.1 Колебательные процессы в природе, технике и в обществе. Наука о колебаниях: открытия и загадки.....	21
1.2 Физические причины эффективности использования вибрации в процессах переработки сырья.....	24
1.3 Действие вибрации на нелинейные механические системы. Основные группы эффектов	25
1.4 Основные идеи вибрационной механики	40
1.4.1 Вибрация «изменяет законы механики» (40). 1.4.2 Медленные и быстрые движения. Наблюдатели O и V (41). 1.4.3 Основное уравнение вибрационной механики. Вибрационные силы (41). 1.4.4 Что понимается под вибрационной механикой и вибрационной реологией? (43). 1.4.5 Реальны ли вибрационные силы и виброреологические эффекты? (46). 1.4.6 Осцилляционная стрободинамика – обобщение вибрационной механики (48).	
Глава 2 Математический аппарат вибрационной механики. Метод прямого разделения движений; сравнение с другими методами	49
2.1 Предварительные замечания	49
2.2 Приведение исходного уравнения движения к системе двух интегродифференциальных уравнений	50
2.3 Основное уравнение вибрационной механики. Вибрационная сила	51
2.4 Об основном предположении вибрационной механики. Способы приближенного решения уравнений быстрых движений и получения выражений для вибрационных сил; чисто инерционное приближение	52
2.5 О других способах получения выражения для вибрационной силы и основного уравнения вибрационной механики.....	55

2.6	О преимуществах основного уравнения вибрационной механики перед исходным уравнением.....	56
2.7	Дополнительные замечания, некоторые обобщения	56
2.8	О потенциальных в среднем динамических системах.....	58
2.9	О механике систем с частично игнорируемыми движениями.....	60
2.10	О случае систем со связями	61
2.11	Об основных особенностях, ограничениях и достоинствах метода прямого разделения движений по сравнению с другими методами теории нелинейных колебаний	61
2.12	О некоторых основных методах теории нелинейных колебаний в сопоставлении с методом прямого разделения движений (на примере задачи о маятнике с вибрирующей осью подвеса).....	63
	2.12.1 Предварительные замечания (63). 2.12.2 Уравнение движения (63). 2.12.3 Метод малого параметра Пуанкаре-Ляпунова (65). 2.12.4 Использование теории Флоке-Ляпунова и диаграммы Айнса-Стрэтта (66). 2.12.5 Асимптотический метод (68). 2.12.6 Метод многих масштабов (69). 2.12.7 Метод прямого разделения движений (70). 2.12.8 Методы гармонического баланса и Бубнова-Галеркина (73). 2.12.9 Обсуждение (74).	
2.13	К вопросу об обоснованности и строгости метода прямого разделения движений и других методов теории нелинейных колебаний	75
2.14	О процедуре практического использования метода прямого разделения движений.....	76
2.15	О применении метода к системам без физического малого параметра	78
2.16	О влиянии медленных движений на быстрые; возможности изучения сложных («хаотических») быстрых движений	79
2.17	Краткая библиографическая справка	79
Глава 3 Примеры использования подхода вибрационной механики и метода прямого разделения движений.....		82
3.1	Предварительные замечания.....	82
3.2	Движение частицы в быстро осциллирующем неоднородном силовом поле.....	82
	3.2.1 Уравнение движения частицы (82). 3.2.2 Решение задачи методом прямого разделения движений. Уравнение медленного движения (84). 3.2.3. Анализ решения. Положения устойчивого квазиравновесия частицы (86). 3.2.4 Элементарное объяснение эффекта притяжения частицы к узлам амплитуды волны (87). 3.2.5 Некоторые обобщения задачи (89).	
3.3	Поведение маятника с вибрирующей осью подвеса (маятника Стефенсона-Капицы). Системы маятникового типа.....	91
	3.3.1 Предварительные замечания (91). 3.3.2 Маятник с вертикально вибрирующей осью подвеса (91). 3.3.3 Случай, когда ось маятника вибрирует по эллиптической траектории (97). 3.3.4 Случай прямолинейной гармонической вибрации оси под углом к вертикали (101). 3.3.5 Общий случай двухкомпонентной вибрации. Эквивалентная эллиптическая траектория (103). 3.3.6 Еще раз об эффекте притяжения маятника к направлению наибольшей вибрации (106). 3.3.7 Маятник под действием вибрации с двумя существенно	

различными частотами. Сопряженные резонансы и бифуркации, о статистических резонансах (107). 3.3.8 Краткая библиографическая справка (112). 3.3.9 Некоторые обобщения (113).	
3.4 Вибрационное перемещение. Простейшая модель – движение частицы по продольно вибрирующей шероховатой плоской поверхности	120
3.4.1 Предварительные замечания (120). 3.4.2 Определение вибрационного перемещения – вопросы терминологии (121). 3.4.3 Элементарное обсуждение задачи (122). 3.4.4 Решение задачи методом прямого разделения движений (124). 3.4.5 Анализ решения. Эффект кажущегося вибрационного преобразования сухого трения в вязкое. Движущая и вибропреобразованная вибрационные силы (126). 3.4.6 Обобщения задачи. Физические механизмы и основные виды асимметрии системы, обуславливающие вибрационное перемещение (128). 3.4.7 Кратко об исследованиях по проблеме (131).	
3.5 Действие вибрации на системы с распределенными параметрами; связь с проблемой создания вибрационных динамических материалов	132
3.5.1 Предварительные замечания (132). 3.5.2 Задача об индийской магической веревке (133). 3.5.3 Струна с пульсирующим натяжением (139). 3.5.4 Труба с пульсирующим потоком жидкости (141). 3.5.5 Рассмотренные системы как вибрационные динамические материалы (143).	
3.6 Электромеханические системы. О поведении проводящих тел в высокочастотном магнитном поле	144
3.6.1 О некоторых новых результатах теории электромеханических систем (144). 3.6.2 Задача о пассивном (резонансном) электростатическом подвесе (145). 3.6.3 Задача о движении маятника с контуром тока в высокочастотном магнитном поле (148).	

Часть II

ВИБРАЦИОННАЯ МЕХАНИКА В ДИНАМИКЕ ПРИВОДА ВИБРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Глава 4 Вибрационное поддержание вращения неуравновешенного ротора	152
4.1 Основные эффекты и закономерности	152
4.2 О приложениях рассмотренных эффектов	155
4.3 Краткая библиографическая справка	155
Глава 5 Вибрационное поддержание планетарного движения. Устройства «ролик-шар» в вибрирующей полости и кольцо на вибрирующем стержне («хула-хуп»)	157
5.1 Схемы и описание устройств	157
5.2 Основные эффекты и закономерности	157
5.3 О приложениях рассмотренных эффектов	159
5.4 Краткая библиографическая справка	160

Глава 6 Вибрационное торможение вращения. Неуравновешенный ротор (механический вибровозбудитель) в колебательной системе; переходные процессы, эффект Зоммерфельда.....	161
6.1 Схема и описание системы	161
6.2 Основные эффекты и закономерности.....	161
6.3 Простейший случай: колебательная часть системы линейна и имеет одну степень свободы. Объяснение эффекта Зоммерфельда.....	164
6.4 Общий случай: колебательная часть системы нелинейна и имеет несколько степеней свободы	168
6.5 О полумедленных колебаниях неуравновешенного ротора при прохождении через резонанс; внутренний маятник.....	169
6.6 О колебаниях системы при выбеге и способах их уменьшения	171
6.7 О приложениях описанных закономерностей	172
6.8 Краткий библиографический обзор	172
Глава 7 Самосинхронизация механических вибровозбудителей и вращающихся тел. Частотная самосинхронизация как универсальное явление самоорганизации.....	175
7.1 О явлении самосинхронизации механических вибровозбудителей. Краткий обзор развития проблемы.....	175
7.2 Основные соотношения теории самосинхронизации вибровозбудителей. Интегральный критерий устойчивости. Некоторые литературные ссылки	180
721. Схема системы, уравнения движения и основные уравнения вибрационной механики в общем случае (180). 7.2.2 Интегральный критерий устойчивости (экстремальное свойство) синхронных движений (183). 7.2.3 Краткий обзор исследований (184).	
7.3 Основные закономерности и парадоксы самосинхронизации вибровозбудителей.....	186
7.4 О понятии стабильности фазировки при самосинхронизации и ее оценке ...	191
7.5 О методике расчета и проектирования устройств с самосинхронизирующимися вибровозбудителями	195
7.6 Расширение области практического использования самосинхронизации вибровозбудителей; основные направления	198
7.7 Приложения теории самосинхронизации вибровозбудителей	200
7.7.1 Создание нового класса вибрационных машин и устройств (200). 7.7.2 Обобщение принципа автобалансировки Лавала (201). 7.7.3 Приложения к проблеме резонансов (синхронизации) в орбитальных движениях небесных тел (205). 7.7.4 Самосинхронизация контактов Джозефсона (205).	
7.8 Частотная самосинхронизация как универсальное явление и как явление самоорганизации. Самосинхронизация и синергетика	205
7.8.1 Открытия явлений частотной самосинхронизации и краткий обзор исследований (205). 7.8.2 Универсальность явления самосинхронизации в природе, технике и общественной жизни (208). 7.8.3 Математическое отражение тенденции к синхронизации (210). 7.8.4 Особенности самосинхронизации как	

явления самоорганизации. Самосинхронизация и синергетика (210). 7.8.5 О некоторых нерешенных проблемах частотной самосинхронизации (212). 7.8.6 Заключение к п.7.8 (213).	
7.9 Общее определение синхронизации	213
7.9.1 Общее понятие о синхронизации, вербальное определение (213). 7.9.2 Об общем математическом определении синхронизации (213).	
7.10 Основные направления развития теории синхронизации.	
Краткий обзор	214

Часть III

ВИБРАЦИОННАЯ МЕХАНИКА ПРОЦЕССОВ

Глава 8 Вибрационное перемещение	216
8.1 Предварительные замечания	216
8.2 Частица на наклонной шероховатой плоской поверхности, совершающей поступательные гармонические колебания в двух взаимно-перпендикулярных направлениях	216
8.2.1 Уравнение движения, постановка задачи (216). 8.2.2 Уравнение вибрационной механики. О режимах движения частицы (218). 8.2.3 Скорость виброперемещения частицы в режимах с подбрасыванием (221). 8.2.4 О характере зависимости скорости виброперемещения от различных параметров (225). 8.2.5 Об оптимальном выборе параметров колебаний (227). 8.2.6 Предельный угол подъема частицы по наклонной вибрирующей плоскости (227).	
8.3 О других случаях колебаний плоскости	228
8.4 Частные случаи: прямолинейные и круговые колебания горизонтальной плоскости в той же плоскости	229
8.5 Более сложные задачи и модели	230
8.5.1 Движение по вибрирующей плоскости твердых тел (230). 8.5.2 Движение тел, содержащих деформируемые элементы. Движение при наличии щетинок, червеобразное движение (231). 8.5.3 Движение частицы, попеременно контактирующей с двумя вибрирующими поверхностями (234). 8.5.4 О движении слоя сыпучей среды и слоя жидкости в вибрирующих лотках (237).	
8.6 Частица в сопротивляющейся среде под действием вибрации – простейший случай	238
8.6.1 Одномерное движение при периодическом воздействии (238). 8.6.2 Случай гармонического воздействия (245).	
8.7 Об оптимизации и управлении процессами виброперемещения	247
Глава 9 Эффекты вибрационного перемещения в технике, технологии и природе	248
9.1 Вибрационное транспортирование	248
9.1.1 О вибрационном транспортировании (248). 9.1.2 Вибрационная механика в теории процессов вибротранспортирования (248). 9.1.3 Особенности и	

достоинства вибрационного способа транспортирования (250). 9.1.4 Вибрационные транспортирующие и транспортно-технологические устройства (252).	
9.2 Вибрационное разделение компонент сыпучих смесей	258
9.2.1 Факторы, определяющие эффективность использования вибрации в процессах разделения компонент сыпучих смесей (258). 9.2.2 Классификация по размеру на вибрирующих ситах (грохочение) (259). 9.2.3 Разделение частиц в слое сыпучего материала под действием вибрации (сегрегация, расслоение, самосортирование) (262). 9.2.4 Общая постановка задачи о разделении частиц сыпучей смеси в вибрирующем сосуде. Краткая характеристика состояния проблемы (265). 9.2.5 Отделение инородной частицы из сыпучей среды под действием круговой горизонтальной вибрации. Псевдорезонансный эффект (266). 9.2.6 Задача п.9.2.5 в случае вертикальных гармонических колебаний среды. Эффект всплывания тяжелой крупной частицы в среде из легких мелких частиц (270). 9.2.7 Кинетика вибрационного разделения многокомпонентной смеси (континуальное описание) (273). 9.2.8 Разделение частиц на вибрирующих поверхностях. Пример-способ отделения шарообразных частиц от частиц со сколами (280). 9.2.9 Разделение частиц в вибрационных и волновых полях, создаваемых в жидкости и газе (288).	
9.3 Процессы вибрационной ассоциации и диссоциации, вибрационная сборка деталей	288
9.4 Вибрационное погружение и внедрение, вибрационное резание	290
9.5 Вибрационная обработка деталей, интенсификация тепло- и массообмена и химических реакций.....	296
9.6 Вибрационное уплотнение и разрыхление, виброкипящий слой	299
9.6.1 О поведении слоя сыпучей среды в вертикально вибрирующем сосуде (299). 9.6.2 Приложения эффектов вибрационного уплотнения и разрыхления. Виброкипящий слой (304).	
9.7 Вибрационное преобразование движения; вибродвигатели	308
9.8 Вибрационное передвижение, вибрационные экипажи	313
9.8.1 Определения, предварительные замечания (313). 9.8.2 Вибрационное передвижение по шероховатой поверхности. Самоходные виброуплотнители грунта, передвижение на скейтбордах (314). 9.8.3 Вибрационное передвижение в жидкости и газе. Вибролет, передвижение живых организмов (317). 9.8.4 Вибрационное передвижение в неоднородных силовых полях. Гравилет, магнитолет (321).	
9.9 Виброструйный эффект, вибрационная инжекция. Вибрационное запыление отверстия в сосуде.....	324
9.10 Вибрационные насосы. К теории насоса Г.Я.Лишанского и объяснение эффекта взвешивания частиц в турбулентном потоке	331
9.10.1 О вибрационных насосах (331). 9.10.2 К теории насоса Г.Я.Лишанского (335). 9.10.3 О взвешивании вибрирующего диска в жидкости (337). 9.10.4 Обобщение задачи; о взвешивании твердых частиц в турбулентных потоках (338). 9.10.5 О случае колебаний жидкости, в которой находится частица (341). 9.10.6 Физическое объяснение эффекта вибрационного взвешивания «тяжелой» частицы в жидкости вблизи стенки. О двух механизмах взвешивания (342). 9.10.7 Сопоставление с эффектом Бьеркнеса и результатами последующих исследований (342).	

9.11 Эксцентрикковые и вибрационные дробилки, вибрационные мельницы	344
9.11.1 Эксцентрикковые и вибрационные дробилки – принципы и методы профилирования камер дробления (344). 9.11.2 Вибрационные мельницы – циркуляционное движение загрузки (351).	
Глава 10 Вибрационное смещение (увод)	353
10.1 О понятии вибрационного смещения (увода)	353
10.2 Общие закономерности увода с позиций вибрационной механики. Связь с вибрационным перемещением	354
10.3 Особенности вибрационного увода в системах с сухим трением	356
10.4 Эффекты вибрационного смещения в приложениях	357

Часть IV

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИИ НА ПОВЕДЕНИЕ ЖИДКОСТИ, СЫПУЧИХ ТЕЛ И КОМБИНИРОВАННЫХ СРЕД

Глава 11 О влиянии вибрации на движение жидкости по лотку и сопутствующих нелинейных эффектах	359
11.1 Предварительные замечания	359
11.2 Экспериментальная установка	360
11.3 Результаты экспериментальных исследований	361
11.4 К теоретическому объяснению возникновения хаоса в рассматриваемой и некоторых других системах; оценка высоты всплесков	365
11.5 Заключение	368
Глава 12 Движение твердой частицы и пузырька газа в колеблющейся жидкости	369
12.1 Предварительные замечания	369
12.2 Модель и уравнение движения частицы	369
12.3 Решение задачи; виброреологическая характеристика сопротивления и уравнения медленного движения частицы	371
12.4 Скорость стационарного падения (всплывания) частицы	372
12.5 Случай кубического закона сопротивления	375
12.6 Заключение	376
Глава 13 Движение несжимаемых пузырьков газа и твердых частиц в колеблющейся газонасыщенной жидкости	377
13.1 Предварительные замечания, краткий обзор исследований	377
13.2 Экспериментальное исследование	378
13.3 Уравнение движения	379

13.4 Решение уравнения методом прямого разделения движений. Уравнение медленного движения	382
13.5 Условие погружения пузырьков. Явление вибрационной неустойчивости системы газ-жидкость в поле силы тяжести	384
13.6 Положения квазиравновесия пузырька и их устойчивость	387
13.7 Условие всплывания частиц, более плотных, чем жидкость	389
13.8 О «прорыве» воздушной подушки и автоколебательном поведении системы	390
13.9 Сопоставление теоретических результатов с экспериментальными данными	391
13.10 Заключение.....	392
Глава 14 Движение сжимаемых пузырьков газа в вибрирующих сосудах с несжимаемой жидкостью.....	393
14.1 Предварительные замечания.....	393
14.2 Схема системы, модель пузырька	393
14.3 Уравнение движения пузырька.....	396
14.4 Решение задачи методом прямого разделения движений	397
14.5 Физическое объяснение эффекта погружения пузырька в жидкости («компрессионный» или «вибрационный» механизм).....	401
14.6 Решение уравнения медленного движения пузырька.....	403
14.7 Обсуждение теоретических результатов	404
14.7.1 Проверка использованных предположений о характере движения пузырька (404). 14.7.2 Об учете сжимаемости пузырька (405).	
14.8 Сравнение с результатами эксперимента	407
14.9 Заключение.....	410
Глава 15 Общий случай: движение сжимаемых пузырьков газа в колеблющейся газонасыщенной жидкости.....	411
15.1 Предварительные замечания.....	411
15.2 Уравнение движения пузырька.....	411
15.3 Пульсация радиуса и объема пузырька.....	413
15.4 О решении задачи методом прямого разделения движений и его основных результатах	414
15.5 Экспериментальное исследование	415
Глава 16 Поведение сыпучей среды в сообщающихся вибрирующих сосудах.....	418
16.1 Основные закономерности.....	418
16.2 Случай, когда один из сосудов имеет форму трубки.....	420
16.2.1 Условия и результаты экспериментов (420). 16.2.2 К теории наблюдаемых эффектов (422). 16.2.3 Обсуждение результатов. О входном и выходном сопротивлениях в трубке (426). 16.2.4 О дополнительных экспериментах (428).	

16.3 Заключение	429
Глава 17 Проникновение вибрации в некоторые среды	430
17.1 Предварительные замечания	430
17.2 Проникновение вибрации в вязкую жидкость	430
17.3 О проникновении вибрации в суспензии	436
17.4 Проникновение вибрации в сыпучую среду	436
17.4.1 Случай круговых колебаний горизонтальной пластины в ее плоскости (436). 17.4.2 Случай прямолинейных продольных колебаний горизонтальной пластины (439). 17.4.3 Случай поперечных колебаний пластины (440).	
17.5 О проникновении вибрации в грунты и в бетонные смеси	441
17.6 О теории вибропроводности	442
17.7 О приближенной оценке характера и глубины проникновения вибрации в некоторые среды	444

Часть V

ВИБРОРЕОЛОГИЯ

Глава 18 О реологии и виброреологии	445
18.1 Реология как раздел механики	445
18.2 Определение виброреологии. Макро- и микровиброреология	445
18.3 Виброреологические уравнения, виброреологические свойства и эффективные виброреологические характеристики	447
Глава 19 Эффективные реологические характеристики при вибрации ...	448
19.1 Эффективные коэффициенты сухого трения при вибрационном и ударном воздействиях; некоторые приложения	448
19.1.1 Эффективные коэффициенты трения покоя. Простейшая модель – абсолютно твердое тело при гармоническом воздействии (448). 19.1.2 Более сложная модель – твердое тело с внутренней степенью свободы (450). 19.1.3 Некоторые другие модели; ударное воздействие, опыт Д.М.Толстого (451). 19.1.4 Вибрационная концепция трения скольжения; вибрационное управление сухим трением (454). 19.1.5 Об износе номинально неподвижных соединений деталей. Приложение к теории и проектированию конструкций, работающих в условиях ударов и вибрации (456). 19.1.6 Возможные приложения к сейсмологии и теории взрывных воздействий (458).	
19.2 Эффективное трение при вибрационном воздействии на нелинейные осцилляторы с позиционно-вязким сопротивлением	459
19.2.1 Предварительные замечания (459). 19.2.2 Вибрационная трансформация характеристики сопротивления колебательной системы с одной степенью свободы (459). 19.2.3 Частный случай – асинхронное подавление автоколебаний (462). 19.2.4 Частный случай – асинхронное возбуждение автоколебаний (463). 19.2.5 Приложение к теории работы сердца (464). 19.2.6 О некоторых других приложениях (464).	

19.3	О двухчастотном воздействии на осциллятор Дуффинга; о сопряженных резонансах и бифуркациях	465
19.4	Сильное параметрическое воздействие на демпфирование (осциллятор Фидлина, эффект преобразования свойств колебательных объектов).....	465
19.4.1	Уравнение осциллятора Фидлина и его особенности (465). 19.4.2 Уравнение медленного и быстрого движений. Решение уравнения быстрых движений в предположении о постоянстве медленных переменных (466). 19.4.3 Уточненное решение с учетом зависимости быстрого движения от медленного времени (467). 19.4.4 Обсуждение результатов; об эффекте преобразования свойств колебательных объектов под действием вибрации (469).	
19.5	Об «ужесточении» упругой характеристики при высокочастотном параметрическом воздействии	470
19.6	Общий случай вибрационного преобразования реологической характеристики (определяющего уравнения) материала. Связь с проблемой динамических материалов.....	470
19.7	Вибрационная гидромеханика и гидравлика.....	471
19.7.1	Уравнение Рейнольдса как виброреологическое уравнение. Эффективная вязкость жидкости при турбулентном движении, влияние внешнего вибрационного воздействия (471). 19.7.2 О других случаях использования понятий об эффективной вязкости при вибрационном воздействии (473). 19.7.3 Вибрационная гидравлика – аналог уравнения Бернулли (473).	
Глава 20 Виброреологическое преобразование нелинейных механических систем с разрывными характеристиками к системам с вязким трением		475
20.1	Виброреология систем с сухим трением.....	475
20.2	Виброреология систем с периодическими соударениями.....	477
20.2.1	О виброреологическом моделировании виброударных взаимодействий силами вязкого трения (477). 20.2.2 Приложения к расчету производительности дробилок (477).	
Глава 21 Виброреология сыпучих тел.....		482
21.1	Виброреологические модели слоя сыпучей среды	482
21.2	Некоторые приложения.....	491
21.2.1	Процесс вибробункеризации сыпучих тел (491). 21.2.2 Движение слоя сыпучего материала в прямоугольном лотке с неоднородно вибрирующим днищем (к теории вибрационных грохотов с гибким резонирующим ситом) (495). 21.2.3 О других приложениях (500).	
Глава 22 Микровиброреология: поведение суспензий при вибрации, эффективная вязкость и эффективная плотность суспензий.....		501
22.1	Предварительные замечания.....	501
22.2	Бесструктурные суспензии – твердые частицы и мелкие газовые пузырьки в вязкой жидкости	501
22.3	Структурированные суспензии – частицы в среде с сопротивлением типа сухого трения.....	505

Глава 23 Заключение. Дополнения	507
23.1 Турбулентная вязкость, воброползучесть, виброрелаксация, вибропластичность, усталость материалов, как виброреологические эффекты	507
23.2 Некоторые общие виброреологические закономерности	509
23.3 Проблема формирования виброреологических свойств нелинейных механических систем, создание вибрационных динамических материалов.....	510
Глава 24 Динамические материалы и композиты, их создание как проблема виброреологии.....	511
24.1 О динамических материалах и композитах.....	511
24.1.1 Понятие о динамических материалах и композитах (511). 24.1.2 Активированные и кинетические динамические материалы и композиты (512). 24.1.3 Примеры реализации кинетических динамических материалов (512). 24.1.4 Пример: стержень из активированного динамического материала. Организация волны свойств (516). 24.1.5 Динамические поверхности (520).	
24.2 Вибрационные динамические материалы и композиты.....	522
24.2.1 Определения, основная особенность (522). 24.2.2 Основная идея получения вибрационных динамических материалов (523).	
24.3 Виды вибрационных динамических материалов. Вибрационные динамические композиты.....	524
24.3.1 Нелинейно-упругий материал; материал с различными модулями упругости при нагружении и разгрузке (524). 24.3.2 Позиционно-вязкий материал (525). 24.3.3 Нелинейно-вязкий материал (526). 24.3.4 Упруго-пластический материал (526). 24.3.5 Параметрически продуцируемый вибрационный материал (526). 24.3.6 Многофазные среды, турбулентные потоки (527). 24.3.7 Идея создания вибрационных динамических композитов (527).	
24.4 Краткий обзор развития проблемы.....	528
24.5 Заключение	529

Часть VI

ОСЦИЛЛЯЦИОННАЯ СТРОБОДИНАМИКА – ОБОБЩЕНИЕ ПОДХОДА ВИБРАЦИОННОЙ МЕХАНИКИ

Глава 25 Об осцилляционной стрободинамике.....	530
25.1 Введение	530
25.2 Краткое описание подхода и определение осцилляционной стрободинамики	531
Глава 26 Некоторые задачи осцилляционной стрободинамики – примеры использования подхода	534
26.1 Влияние осцилляций параметров в алгебраических соотношениях	534

26.1.1 Предварительное замечание (534). 26.1.2 Технологический процесс (534). 26.1.3 Динамика частиц – потенциал Леннарда-Джонса (535). 26.1.4 Пульсация расстояния между массами в законе всемирного тяготения. Гравилет Белецкого- Гиверца (536).	
26.2 Периодическое воздействие на систему хищник-жертва (систему Лотки- Вольтерра).....	537
26.3 Высокочастотные воздействия на колебательные химические реакции (брюсселятор).....	540
26.4 Высокочастотное воздействие на осциллятор Лоренца, о механизме возникновения динамического хаоса в его поведении.....	542
26.5 Система с «пульсацией времени», уравнение В.В.Белецкого.....	544
26.5.1 Предварительные замечания (544). 26.5.2 Линейный осциллятор (544). 26.5.3 Уравнения движения спутника относительно центра масс В.В.Белецкого (546).	
Глава 27 Основные классы задач осцилляционной стрободинамики.	
Краткий обзор результатов.....	548
27.1 Фундаментальные уравнения естественных наук.....	548
27.1.1 Механика (548). 27.1.2 Теплопроводность и диффузия (548). 27.1.3 Электродинамика и электромеханические системы (548).	
27.2 Некоторые междисциплинарные проблемы.....	549
27.2.1 Вибрационное перемещение (549). 27.2.2 Синхронизация колебаний и вращений (550). 27.2.3 Проблема создания динамических материалов (550).	
27.3 Отдельные фундаментальные уравнения и соотношения.....	550
27.3.1 Предварительные замечания (550). 27.3.2 Нелинейные волновые уравнения (551). 27.3.3 Уравнение Синус–Гордона (551). 27.3.4 Уравнение Аэро (552). 27.3.5 Уравнение модели войны Ланкастера (552).	
27.4 Осцилляторы.....	553
27.5 Заключение.....	554
Литература.....	555

ПРИЛОЖЕНИЕ

(Вместо предметного указателя)

Колебательные и вибрационные явления и эффекты, которые рассмотрены в книге.....	615
Именной указатель.....	621