

УДК 621.01

## ЗАГАДКИ ТЕОРИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ: НА ГРАНИЦЕ МЕХАНИКИ, ФИЛОСОФИИ И ТЕОЛОГИИ

И.И.Блехман

Рассматриваются некоторые фундаментальные закономерности поведения динамических систем, относительно которых как правило можно дать ответ на вопросы “Как?”, но затруднительно ответить на вопросы “Почему?”. Высказывается мнение, что ответы на эти последние вопросы лежат вне сферы механики, а являются предметом философии или даже теологии.

### 1. Почему так распространены колебательные процессы в живой и неживой природе и в обществе? Почему они во многих случаях эффективны в технике?

Исключительно широкая распространенность колебательных процессов в природе хорошо известна. Колебания характерны как для объектов микро – так и макромира – от атома до галактик. Они играют важнейшую роль и в одном из самых современных физических построений – теории суперструн. То же относится и к биологическим объектам – от амёб и клеток до человеческого организма [1–4]. Любопытно, что колебания в общественных явлениях были описаны много столетий тому назад выдающимся политическим деятелем эпохи возрождения Николо Макьявелли [5]. Врачами давно замечены колебания в нервно-психическом состоянии человека. Возникает вопрос о причинах такой глобальной распространенности колебаний: почему Природа так часто “предпочитает” колебания монотонному изменению.

Одно из иногда выдвигаемых объяснений звучит примерно так: если система движется (изменяется) и не уходит на бесконечность, то что ей еще остается делать, как не колебаться? Другое соображение состоит в том, что колебания порождаются двумя свойствами динамических объектов, аналогами которых в механике являются инерция и упругость. Оба эти соображения небезосновательны, однако представляется, что они еще не дают удовлетворительного ответа на поставленный вопрос.

Более конкретно можно ответить на вопрос о принципиальных причинах эффективности использования в технике такого вида механических колебаний как вибрация [6]. Представляется, что можно указать три такие причины [7]:

- 1) Силы типа сухого трения преобразуются (по отношению к “медленным” воздействиям) в силы типа вязкого трения.
- 2) Возникают особые медленные силы – так называемые вибрационные силы. Появлением этих сил объясняется ряд важных нелинейных эффектов. В частности, устойчивыми оказываются положения, соответствующие не точкам минимума, а точкам максимума “обычной” потенциальной энергии (классический пример – маятник с вибрирующей осью подвеса).
- 3) Силовые и энергетические барьеры между устойчивыми состояниями системы (см. п. 2) преодолеваются значительно меньшими усилиями, а иногда и со значительно меньшими энергозатратами.

Все перечисленные эффекты широко используются в технике (см., например, [2, 6, 7]).

## **2. Устойчивость. Потенциальные и силовые барьеры между устойчивыми состояниями систем.**

Устойчивость является фундаментальным свойством всего сущего. Можно говорить и об определенном роде устойчивости “творений духа”, т.е. методов, моделей, понятий ( в том числе и самого понятия об устойчивости) [8].

Под устойчивостью в общем случае понимают способность объекта не слишком сильно изменять свое состояние при действии определенного рода возмущений. Существует значительное число различных формализованных определений устойчивости. Наиболее “устойчивым” из них оказалось определение устойчивости движения, данное А.М. Ляпуновым. С математической точки зрения все определения существенно связаны с понятиями непрерывности и близости [8].

Многие объекты могут находиться в нескольких устойчивых состояниях. При этом относительно большинства объектов можно сказать, что переход от одного устойчивого состояния к другому требует преодоления потенциальных и силовых барьеров, т.е. приложения усилий или затраты, часто необратимой, определенного количества энергии. Между тем указанные переходы составляют содержание большинства технологических процессов (перемещение грузов, дробление горных пород, химические реакции) [9].

Верующий человек скажет, что ситуация понятна: создавая Мир, Бог обеспечил своим творениям устойчивость, соорудив соответствующие барьеры. Атеист же припишет все эволюции, в процессе которой сохранились только устойчивые формы.

Представляется, что наличие барьеров является одной из иллюстраций известной мысли Н.Г.Четаева:”устойчивость, явление принципиально общее, как-то должно, по-видимому, проявляться в основных законах природы” [10]. Другая иллюстрация принадлежит самому Н.Г.Четаеву, который показал, что из необходимого условия устойчивости движения частицы в поле консервативной силы следует уравнение Шредингера. Это приводит к мысли о родственности механизма квантования в микро- и макросистемах, развиваемой в наше время в работах [11–14].

Квантование орбит, по крайней мере в макросистемах, тесно связано с явлением самосинхронизации и так называемым экстремальным свойством устойчивых синхронных движений (см. ниже).

Подводя итог, можно сказать, что со свойством устойчивости в настоящее время связан ряд загадок. Разгадка некоторых из них лежит в области механики и математики, а часть, как представляется, – в области философии и теологии.

## **3. Экстремальность.**

Экстремальные свойства процессов являются одной из удивительных закономерностей нашего мира. Замечательны слова Леонарда Эйлера по этому поводу:”... в мире не происходит ничего, в чем не был бы виден смысл какого-нибудь максимума или минимума; поэтому нет никакого сомнения, что все явления мира с таким же успехом можно определить из причин конечных при помощи методов максимумом и минимумов, как и из самих причин производящих. Повсюду существуют столь яркие оказания этой истины, что для ее подтверждения нам нет нужды в многочисленных примерах; скорее надо будет направить усилия на то, чтобы в каждой области физических вопросов отыскать ту величину которая принимает наибольшее или наименьшее значение: исследование, принадлежащее, по видимому, скорее к философии, чем к математике”. (Леонард Эйлер “Об упругих кривых”, 1728).

Во многих случаях экстремальность является следствием законов механики или их эквивалентом. Таковы вариационные принципы механики.

Особую роль экстремальные свойства играют в теории устойчивости. Основополагающей здесь является знаменитая теорема Лагранжа-Дирихле об устойчивости положений равновесия. Эта теорема послужила толчком для многих обобщений и новых подходов к изучению устойчивости. Одним из них является второй метод Ляпунова.

Примечательно свойство потенциальности в среднем динамических систем, движение которых могут быть представлены как наложение “быстрых” движений на “медленное” движение [7,15]. При определенных условиях медленная составляющая движения соответствует движению некоторой потенциальной системы, несмотря на существенную неконсервативность полной (исходной) системы. В результате для движений таких систем оказывается справедливым аналог упомянутой выше классической теоремы Лагранжа-Дирихле об устойчивости положений равновесия. Существенно, что, казалось бы, особым свойством потенциальности в среднем обладают некоторые достаточно широкие классы динамических систем, в частности синхронизирующиеся системы [7,15,17] (см. также ниже). Роль потенциальной энергии в таких системах играет некоторая другая функция. В результате, например, может оказаться, что устойчивым положениям равновесия (или квазиравновесия, т.е. равновесия для осредненной системы) отвечают не минимумы, а максимумы обычной потенциальной энергии. Простейшим примером является широко известный маятник Стефенсона-Капицы [7,18].

По понятным причинам важнейшую роль экстремальные свойства играют в теории оптимального управления. Поразительно, однако, что при определенном, достаточно естественном выборе целевой функции, такой эффективный метод поиска экстремума как метод скоростного градиента, приводит к некоторым основным законам механики и физики [19].

Как отмечалось, известен ряд экстремальных принципов, непосредственно не вытекающих из общих законов механики, а также принципов, справедливых при определенных ограничениях. Одним из таковых является, на наш взгляд, принцип минимума расхода энергии. Автору известны случаи, когда система стремится к состояниям, соответствующим не минимуму, а максимуму энергозатрат. Эти случаи относятся к проблеме износа контактирующих тел и к проблеме самосинхронизации вибровозбудителей [20].

Несомненна связь с экстремальными принципами удивительной способности технических систем к адаптации (аналогичного такому свойству живых организмов); эта связь обсуждается в той же работе [20].

Проблеме оптимальности и экстремальности посвящена обширная литература; мы коснулись выше лишь ее малой части.

В качестве заключения к разделу отметим наличие двух точек зрения на природу экстремальных принципов. Одна из них, соответствующая взглядам Эйлера, Мопертюи и некоторых других классиков механики, формулируется примерно так: “поскольку наш мир сотворен Богом, то он является наилучшим из миров, и в нем действуют экстремальные принципы”. Точка зрения материалиста состоит в том, что эти принципы – продукт человеческого ума, ибо практически все математически выраженные физические закономерности можно интерпретировать как реализации некоторых экстремальных положений. Так, например, решения  $u(x)$  уравнения

$R(u) = f(x)$ , где  $R$  – некоторый оператор, а  $f(x)$  – некоторая функция, соответствуют равным нулю минимумам интеграла  $\int_{\Omega} [R(u) - f(x)]^2 dx$  по некоторому промежутку  $\Omega$ .

#### 4. Частотная самосинхронизация.

Явление самосинхронизации состоит в том, что несколько объектов, генерирующих колебания или вращения с различными частотами, при объединении в единую систему генерируют колебания или вращаются с одинаковой или кратными частотами  $n_1\omega, n_2\omega, \dots, n_k\omega$ , где  $\omega$  – так называемая синхронная частота, а  $n_1, n_2, \dots, n_k$  – целые числа. Тенденция к синхронизации, даже при слабости связей между объектами, оказывается во многих случаях столь сильной, что даже отключение одного или нескольких объектов от источников энергии не приводит к выпадению из синхронизма [7,21].

Самосинхронизация маятниковых часов была обнаружена Христианом Гюйгенсом еще в начале второй половины XVII века. В настоящее время понятно, что речь идет о всеобщем явлении (“притяжении ритмов”), характерном для взаимодействующих объектов как живой, так и неживой природы – неуравновешенных роторов, турбинных лопаток, электрических генераторов, небесных тел, птиц, насекомых, сообществ клеток и даже сообществ людей (сканированные аплодисменты, шаги солдат “в ногу”, массовый психоз). Обзор теории, приложений, истории развития и обобщение понятия о синхронизации можно найти в книгах [7,16,21,23,24].

Если понимать под тенденцией взаимодействующих объектов к синхронизации наличие у соответствующей системы хотя бы одного устойчивого в малом по А.М.Ляпунову синхронного движения [21], то для определенных классов динамических объектов удастся доказать наличие такой тенденции. Так, для системы объектов с почти-равномерными вращениями тенденция к синхронизации вытекает из так называемого интегрального признака (экстремального свойства) синхронных движений [7,16,17,21,22], который является частным случаем свойства потенциальности в среднем (см.п.3). Образно говоря, синхронным движениям при этом отвечают потенциальные ямы некоторой функции. Важными классами таких систем являются механические вибровозбудители и “орбитальные (планетные и спутниковые) системы” в небесной механике. Однако это еще не ответ на вопрос, почему Природа “предпочитает” синхронизм разнобою. Этот вопрос и представляет одну из загадок теории частотной синхронизации. Отметим к тому же, что для многих классов динамических объектов наличие тенденции к синхронизации остается не доказанным.

Частотная (“гюйгенсова”) самосинхронизация является частным случаем синхронизации, понимаемой как согласованное во времени функционирование нескольких объектов [21]. Обобщением является также возникшая позднее теории синхронизации популярная ныне наука синергетика. Основным предметом этой науки является изучение изменения в поведении нескольких объектов в результате их объединения в единую систему [25]. В случае самосинхронизации одинаковых автономных объектов удивительным фактом является то, что при одном типе взаимосвязи устойчивым оказывается синфазное (“взаимно усиливающее”) движение объектов, а при другом – противофазное (“взаимно компенсирующее”) движение [7,21].

Частотная самосинхронизация как фундаментальное явление, несомненно, должна играть важную роль не только в макро-, но и в микромире. Одна из важных

идей в этом направлении состоит в попытке общего описания механизма квантования орбит [11- 14]. Синхронизацией атомов водорода объясняются ключевые эффекты при использовании такого мощного современного метода медицинской диагностики как ядерно-магнитная томография. Очевидно, что синхронизация играет огромную роль в биологических и физиологических процессах. Однако и здесь еще много загадок. В частности, не подтверждена и не опровергнута гипотеза Н.Винера о синхронизационном механизме злокачественного роста [21].

## 5. О некоторых других загадках теории в механике и физике.

Кратко перечислим здесь некоторые другие фундаментальные загадки, на обсуждении которых нет возможности остановиться в рамках данного сообщения:

1. Непрерывен или дискретен наш мир; реальны ли соответствующие представления или они являются моделями “удобными” в зависимости от рассматриваемых явлений;
2. То же относительно детерминированности или вероятности мира (“играет ли Бог в кости?”);
3. “Матрешечная” структура мира. Вопрос о “возможности построения единой теории, объединяющей единую теорию относительности с квантовой механикой (“струнная теория”)” [4]. Некоторые, далеко не исчерпывающие соображения по этим вопросам можно найти, в частности, в книгах [4,8, 26] ;
4. Наличие широко известных ( $2, 3, \pi, e, \dots$ ) и некоторых новых примечательных и фундаментальных чисел в математике и физике. По поводу этих последних чисел один из творцов теории суперструн – Б. Грин – пишет [4, с.15-16]:

“...почему масса тау-частицы в 3520 раз больше массы электрона? Почему масса  $t$ -кварка в 40200 раз больше массы  $b$ -кварка? Все эти числа выглядят странно, они кажутся случайными. Являются ли они игрой случая, связаны ли они с каким-то божественным выбором, или эти фундаментальные свойства нашей Вселенной имеют какое-то разумное научное объяснение?” Там же автор приводит ряд других вопросов “почему?”, не имеющих ответа.

## 6. Заключение.

Подводя итог, можно заключить, что современные представления теории динамических систем, также как и представления об общей картине мироздания, содержат ряд кардинальных загадок. Несомненно, что часть этих загадок получит разгадку в рамках естественных наук, в частности, механики. Однако, по мнению автора, всегда будут оставаться некоторые прежние и возникать новые загадки. Поэтому человечество, в том числе ученые, всегда будут нуждаться в дополняющих “мировоззренческих” моделях (пусть и гипотетических), которые являются областью философии и религии. Как представляется, важной дополняющей моделью – средством постижения мира – является и искусство [27].

## Литература

1. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. –М.:Физматгиз, 1959.
2. Фролов К.В. Вибрация – друг или враг? –М.:Наука, 1984.

3. Goldacre R. The Control of Rhythm and Homeostasis in Biology and Medicine.–  
Cibernetica, No.2, 1960.
4. Грин Б. Элегантная Вселенная. – М.:УРСС, 2005.
5. Макьявелли Н. История Флоренции. – Л.: Наука. Ленингр. отд-е, 1973.
6. Вибрации в технике: Справочник: В 6-ти томах. –М.:Машиностроение, 1978-  
1981.
7. Блехман И.И. Вибрационная механика.–М.: Физматлит, 1994.– 400 с.  
(англ.перев.: Vibrational Mechanics. Nonlinear dynamic effects, general approach,  
applications. –World Scientific, Singapore, 2000).
8. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. Прикладная математика: Предмет,  
логика, особенности подходов с примерами из механики: Учебное пособие. –  
М.:КомКнига, 2005.
9. Блехман И.И., Иткин Г.Е. Energetic and force barriers at the transitions between the  
stable states of dynamic systems.– Presentation at XXXIII Summer School –  
Conference on Advanced Problems in Mechanics (APM2005), Repino, St.Petersburg,  
June 28–July 5, 2005.
10. Четаев Н.Г. Устойчивость движения. Работы по аналитической механике. –М.:  
Изд-во АН СССР, 1962.
11. Чечельницкий А.М.Экстремальность, устойчивость, резонансность в  
астродинимике и космонавтике. – М.:Машиностроение, 1980.
12. Блехман И.И., Довгеля Е.Г., Дрогуш С.Я., Кремер Е.Б., Сазонов Г.Т., Семешкин  
С.С. Гипотеза о механизме квантования частот обращения тел в орбитальных  
системах. Ассоциация авторов научных открытий, № А-043 от 15 февраля 1995.
13. Рабинович Б.И., Суперэлитные плазменные кольца и орбиты планет и  
спутников, изоморфные орбитам электронов в водородоподобных атомах. –М.:  
Институт космических исследований, 2005.
14. Гареев Ф.А. Геометрическое квантование микро- и макросистем. Планетарно-  
волновая структура адронных резонансов// Сообщение Объединенного  
института ядерных исследований, Дубна, 1996.
15. Блехман И.И., Малахова О.З. О квазиравновесных положениях маятника  
Челомея// ДАН СССР. – 1986. – Том 287, № 2.
16. Белецкий В.В. Очерки о движении космических тел. –М.:Наука, 1977.
17. Белецкий В.В., Хентов А.А. Резонансные вращения небесных тел. – Нижний  
Новгород: Нижегородский гуманитарный центр, 1995.
18. Блехман И.И., Шперлинг Л. Поведение маятника Стефенсона-Капицы со  
внутренними степенями свободы// В сборн. Управление в физико-технических  
системах/Под ред. А.Л.Фрадкова – СПб.: Наука, 2004.
19. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. – СПб.: Наука,  
2003.
20. Blekhman I.I., Vaisberg L.A. Adaptive properties of dynamic objects. – Presentation  
at XXXIII Summer School – Conference on Advanced Problems in Mechanics  
(APM2005), Repino, St.Petersburg, June 28–July 5, 2005.
21. Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. – М.:Наука,1981. (Англ.  
перевод: Blekhman I.I. Synchronization in Science and Technology. – New York:  
ASME Press, 1988)
22. Белецкий В.В. Шесть дюжин. – Москва-Ижевск, 2005.

23. Blekhman I.I., Fradkov A.L. On general definition of Synchronization. In Selected Topics of Vibrational Mechanics. –Singapore: World Scientific, 2004.
24. Пиковский А.А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. – М.: Техносфера, 2003.
25. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1985.
26. Пенроуз Р. Новый ум короля. – М.: УРСС, 2005.
27. Фейнберг Е.Л. Кибернетика, логика, искусство. – М.: Радио и связь, 1981.

*Институт проблем машиноведения РАН, НПК “Механобр-Техника”,  
Россия, Санкт-Петербург*

*Поступила: 27.02.08.*