ВИБРАЦИЯ ПРЕОДОЛЕВАЕТ БАРЬЕРЫ

ПСЕВДОТУННЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ

И. И. Блехман

Илья Израилевич Блехман, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий совместной лабораторией вибрационной механики Института проблем машиноведения РАН и Научно-производственного комплекса «Механобртехника» (СанктПетербург). Руководитель проекта 04-01-00053.

Между устойчивыми состояниями равновесия материальных систем существуют потенциальные и силовые барьеры. Можно утверждать и обратное: состояния равновесия устойчивы, потому что между ними существуют барьеры. Для того чтобы перевести систему из одного устойчивого состояния в другое, необходимо преодолеть потенциальный или силовой барьер. Многие технические и природные процессы могут рассматриваться как переход от одного устойчивого состояния к другому. Эти переходы, сопровождающиеся преодолением барьеров, обычно связаны с необратимыми затратами энергии. Снижение этих энергозатрат, по существу, представляет собой проблему энергосбережения — одну их основных проблем 21 столетия.

Мы рассмотрим способы и закономерности перехода от одного устойчивого состояния равновесия к другому посредством вибрационных воздействий. Речь пойдет об использовании так называемого эффекта вибрационного перемещения.

Об эффекте вибрационного перемещения

Понятие вибрационного перемещения было сформулировано Г. Ю. Джанелидзе и автором еще в 1964 г. [1, 2]. Согласно этому определению, *под вибрационным перемещением понимается возникновение «направленного в среднем», как правило, медленного изменения (в частности, движения) при действии «ненаправленных в сренем», как правило, быстрых воздействий*. Примерами такого перемещения являются: вибрационное транспортирование отдельных тел и сыпучих материалов в вибрирующих лотках и сосудах; работа устройств, называемых вибрационными преобразователями движения и вибродвигателями; вибрационное погружение свай, шпунта и оболочек; вибрационное разделение частиц сыпучего матери ала по плотности, размерам и некоторым другим параметрам; движение вибрационных экипажей; полет, плавание и передвижение по суше живых организмов. В качестве примера вредного проявления эффекта можно привести самоотвинчивание гаек под действием вибрации. К настоящему времени опубликовано несколько тысяч исследований, посвященных вибрационному перемещению и его многочисленным приложениям [2].

Здесь мы коснемся эффектов вибрационного перемещения только в связи с проблемой преодоления потенциальных и силовых барьеров. Приведем несколько примеров, связанных также со свойством нелинейных механических систем изменять под действием вибрации положения равновесия и их характер [2, 3].

Вибрация и барьеры: характерные и частные случаи

Частица в поле силы тяжести и быстро осциллирующей стоячей или медленно бегущей волны (рис. 1). Уравнение движения такой частицы в случае стоячей волны имеет вид

$$m\ddot{x} = -mg - b\dot{x} + \Psi(x)\sin\omega t, \qquad (1)$$

где x — координата частицы, m — ее масса, g — ускорение силы тяжести, h — коэффициент вязкого сопротивления, $|\Psi(x)|$ — амплитуда волны, ω — часто та. Предполагается, что ω достаточно велико.

Уравнение (1) довольно просто решается методом прямого разделения движений [2]. Согласно этому методу, решение представляется в форме

$$x(t, \tau) = X(t) + \psi(t, \tau),$$

где X — «медленная», а ψ — «быстрая» периодическая по «быстрому времени» $\tau = \omega t$ составляющая с нулевым средним по τ. В результате получается следующее дифференциальное уравнение для основной медленной составляющей:

$$m\ddot{X} = -mg - b\dot{X} + \Pi_V'(X),$$

где штрих означает дифференцирование по X, а $\Pi_V'(X) = \Psi^2(X)/4m\omega^2$ — так называемая вибрационная потенциальная энергия.

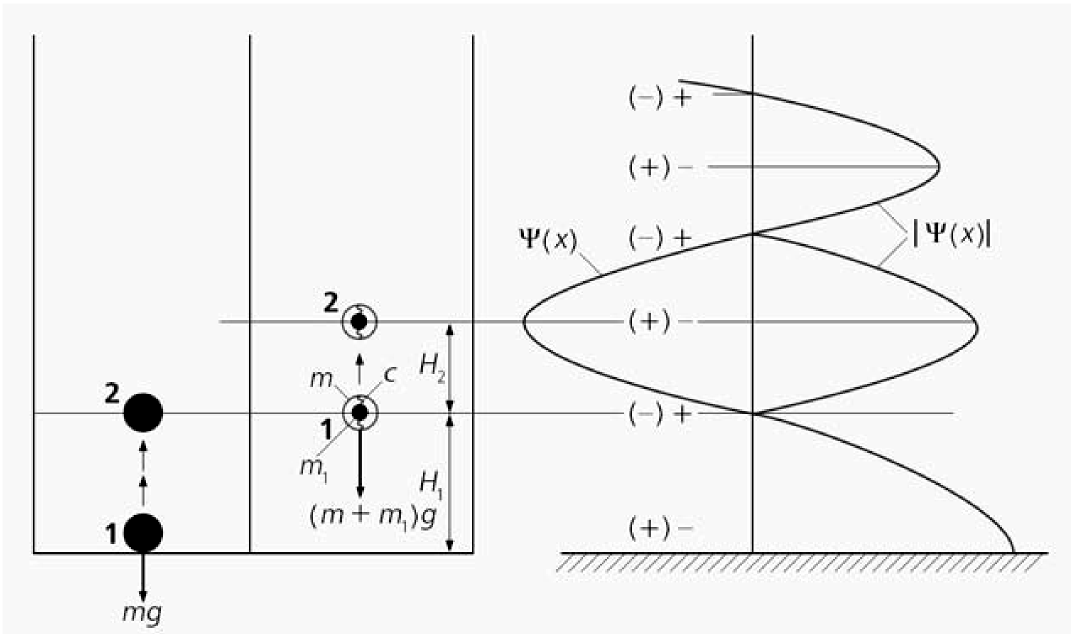

Рис. 1. Положения квазиравновесия частицы в поле быстро осциллирующей сто ячей волны. (+, – — устойчивые и неустойчивые положения для сплошной частицы, (+) и (–) — соответственно для частицы с внутренней степенью свободы).

Наиболее интересен случай, когда $\Pi_V'(X)$ превосходит силу тяжести mg. Тогда в соответствии с классической теоремой Лагранжа—Дирихле получается, что частица «притягивается» к точкам, близким к точкам минимумов амплитуды волны $|\Psi(x)|$, как к положениям устойчивого квазиравновесия (такие точки отмечены на рис. 1 значком «+»). Точкам же, близким к точкам максимумов функции $|\Psi(x)|$, соответствуют положения неустойчивого квазиравновесия (точки со значком «–» на рис. 1). Таким образом, частица под действием высокочастотного поля преодолеет потенциальный барьер $\Delta\Pi = mgH_1$, поднявшись от уровня 1 до уровня 2 (см. рис. 1).

Рассмотренный эффект весьма примечателен. При отсутствии быстро осциллирующего поля частица упадет вниз под действием силы тяжести, тогда как при его наличии она зависает в определенном положении, т. е. левитирует. Частица ведет себя подобно гробу Магомета, который, согласно преданию, висел в воздухе, лишенный какой-либо опоры. Точно так же заряженная частица, в соответствии с классической теоремой Ирншоу, не может быть устойчивой в электростатическом поле только под действием электрических сил. В быстро же осциллирующем поле такая частица устойчива в определенных положениях. Обнаружение этого эффекта в 1989 г. было удостоено Нобелевской премии (так называемый Paul trap) [4—7].

Интересно отметить, что в случае, когда частица обладает дополнительной степенью свободы, т. е. содержит внутри некоторую массу m_1, связанную с частицей m упругим элементом c, то в определенном диапазоне частот устойчивые и неустойчивые положения частицы меняются местами: устойчивым положениям соответствуют точки, близкие к точкам максимума амплитуды $|\Psi(x)|$, а неустойчивым — точки ее минимума [6, 7]. Соответствующие точки помечены на рис. 1 значками «(+)» и «(–)». В этом случае частица может преодолеть потенциальный барьер $\Delta\Pi = (m_1 + m)gH_2$.

Заметим, наконец, что если волна является не стоячей, а медленно бегущей, например, в направлении оси x, то частица, находящаяся в какой-либо устойчивой точке волны, увлекается ею в направлении своего движения (в этом случае функция Ψ в уравнении (1) зависит как от x, так и от медленного времени t).

Маятник с вибрирующей осью подвеса (рис. 2). Рассмотренная выше задача родственна классической задаче о поведении маятника с вибрирующей осью подвеса. Имеются определенные основания называть такой маятник маятником Стефенсона—Капицы [2, 6]. Уравнение движения маятника, ось которого совершает колебания вдоль оси O_1O_2, наклоненной к вертикали под некоторым углом β, имеет вид

$$ml^2\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + mgl\sin\varphi + mlA\omega^2\sin\omega t\sin(\varphi - \beta) = 0, \quad (2)$$

где φ — угол отклонения маятника от вертикали, l — длина маятника, A — амплитуда, а φ — частота вибрации.

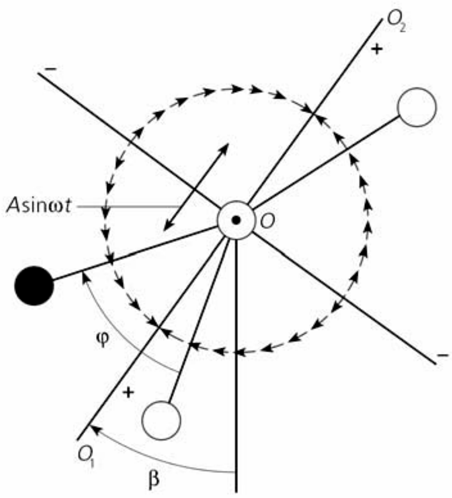

Рис. 2. Положения квазиравновесия маятника с вибрирующей осью подвеса.

Сравнивая уравнения (1) и (2), нетрудно видеть, что роль функции $\Psi(x)$ в данном случае играет выражение

$$\Psi(\varphi) = m(A\omega^2/l)\sin(\varphi - \beta).$$

Отсюда следует основной вывод: в результате вибрации оси вдоль некоторого направления O_1O_2 маятник «притягивается» к направлениям OO_1 и OO_2 как к устойчивым [2, 6]. Устойчивость верхнего и нижнего положений маятника при вертикальной вибрации ($\beta = 0$) представляет собой следствие этой закономерности. При наклонном направлении вибрации ($\beta = 0, \pi$) вследствие действия силы тяжести положения устойчивого квазиравновесия будут несколько отклоняться от направления вибрации.

Очевидно, что при вертикальном направлении вибрации маятник может преодолеть потенциальный барьер $\Delta\Pi = mgl$. Если же направление вибрации O_1O_2 будет медленно поворачиваться, т. е. угол β будет зависеть от медленного времени t, то может быть преодолен и барьер $2mgl$.

Влияние дополнительной степени свободы маятника вполне аналогично этому влиянию для частицы [9].

Гравилет (рис. 3). Экзотическим, но весьма интересным с принципиальной точки зрения примером является так называемый гравилет, предложенный В. В. Белецким и М. Е. Гиверцем [10].

Представим себе искусственный спутник Земли, обращающийся по эллиптической орбите. На спутнике расположены две одинаковые массы, расстояние между которыми определенным образом изменяется с периодом, равным периоду обращения спутника. Как показано авторами, такие манипуляции могут привести к изменению орбиты спутника и даже к его выходу из поля притяжения Земли! Может создаться впечатление, что это противоречит известному положению механики, согласно которому не возможно изменить движение системы за счет внутренних сил. Еще больше будет озадачен наблюдатель, который не видит движущихся в спутнике масс: ему представится, что нарушены все законы классической механики, в том числе закон сохранения энергии. На самом деле никакого противоречия в данном случае нет, поскольку имеется внешняя сила — сила гравитационного взаимодействия масс. Можно показать, что периодическое движение масс в спутнике требует затраты энергии, а также что в результате такого движения появляется средняя сила («вибрационная сила»), эквивалентная силе тяги [2].

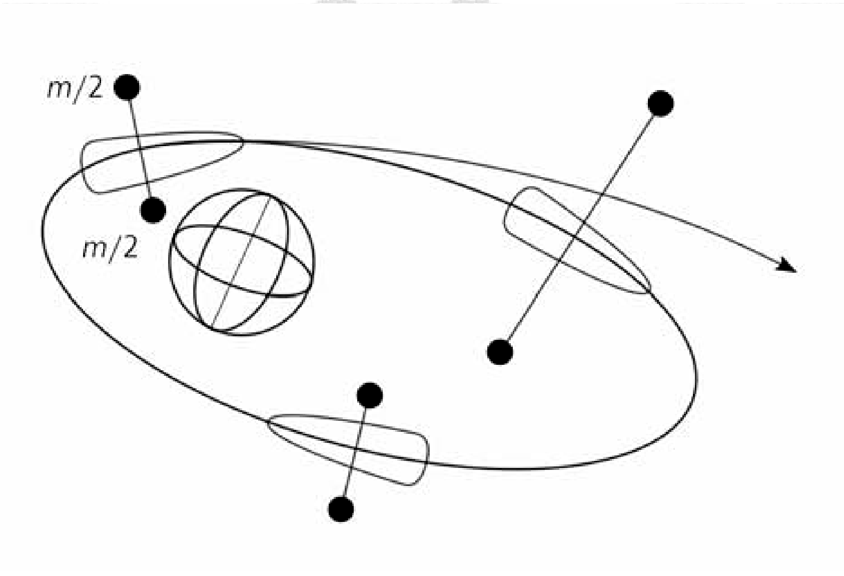

Рис. 3. Гравилет.

То обстоятельство, что описанный эффект, явно подпадающий под понятие вибрационного перемещения, сравнительно слаб, не лишает его принципиального интереса. В частности, несколько развивая идею гравилета, представим себе, что мы заставляем двигаться массы в спутнике (или в частице, обращающейся вокруг центра, притягивающего ее с силой, обратно пропорциональной расстоянию между нею и центром) не за счет внутренних сил, а за счет внешнего переменного поля. Понятно, что таким путем также можно заставить спутник (частицу) изменить свою траекторию, т. е. преодолеть потенциальный барьер. Можно показать также, что описываемые эффекты можно значительно усилить путем использования резонанса.

Модели вибрационного перемещения в системах с сухим трением и неудерживающими связями (рис. 4). Выше мы рассмотрели вибрационное преодоление барьеров в «гладких» системах. Здесь мы обсудим четыре модели вибрационного перемещения в системах с сухим трением и ударами.

Основной, базовой моделью процессов вибрационного транспортирования служит тело, лежащее на шероховатой плоской поверхности, наклоненной к горизонту на некоторый угол α и совершающей прямолинейные поступательные колебания по гармоническому закону под некоторым острым углом β (рис. 4,*а*). В процессе движения тело может не только скользить по плоскости, но и отрываться от нее и соударяться с нею. Теоретические рас четы и эксперименты показывают, что тело может подниматься вверх по плоской поверхности при ее наклоне до 30—40° [1].

Если плоскость совершает чисто продольные гармонические колебания, тело тем не менее, также может подниматься по ней вверх (рис. 4,*б*). Это обеспечивается наличием у тела внутренней степени свободы: предполагается, что внутри него находится дополнительная масса, связанная с ним посредством упругого элемента *с*. Эта масса может перемещаться внутри тела вдоль направления, наклоненного к плоскости под некоторым углом β.

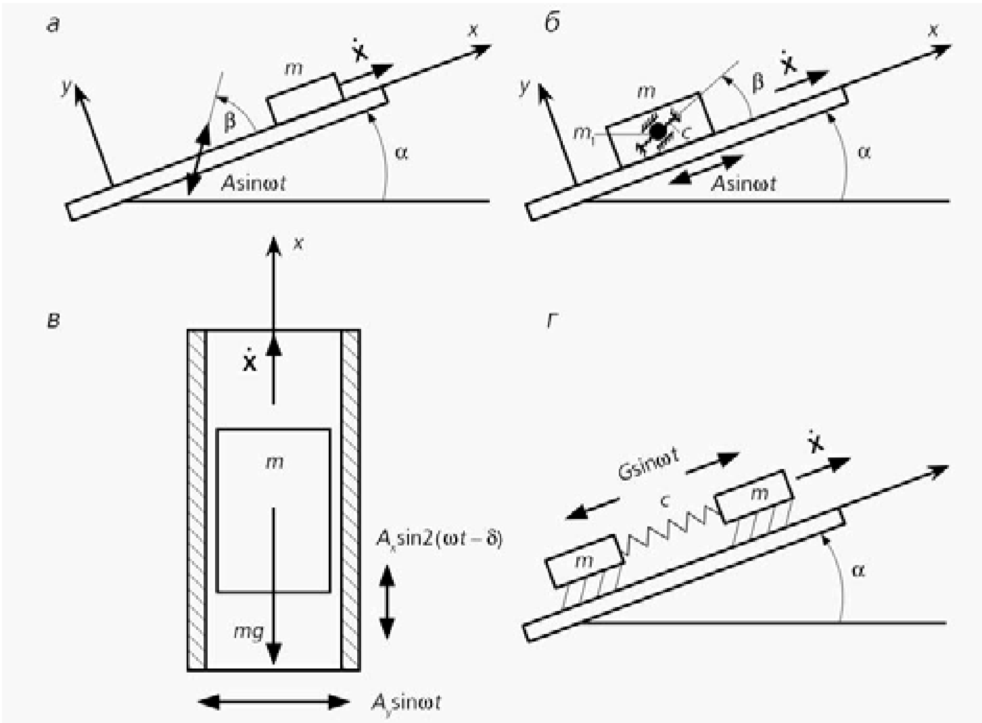

Рис. 4. Модели вибрационного перемещения в наклонном или вертикальном направлении: а — движение тела вверх по наклонной плоскости при наклонном направлении вибрации; б — движение тела с внутренней степенью свободы при чисто продольной вибрации; в — движение тела вверх по вертикальной трубе, вибрирующей в осевом и по перечном направлениях; г — модель движения червеобразных.

Система, называемая «трубой Брумберга» [2], представляет собой вертикальную трубу, гармонически вибрирующую с некоторой частотой ω в попе речном направлении и одновременно с частотой 2ω в осевом направлении с некоторым сдвигом фаз δ (рис. 4,*в*). Тело в этом случае может перемещаться по трубе вертикально вверх.

На рис. 4,*г* показана простейшая модель движения червеобразных [11, 12]. Две одинаковые массы *m* соединены пружиной с жесткостью *c*. Массы взаимодействуют посредством гармонической вынуждающей силы $G(t) = \Phi\cos\omega t$. Предполагается, что между массами и плоскостью действует сила сухого трения, причем при движении тел в положительном направлении оси *x* она меньше, чем в отрицательном. Это обстоятельство обеспечивает движение системы вдоль оси *x* и в том случае, когда плоскость наклонена к горизонту. Описанная система, в частности, моделирует передвижение челнока по кровеносным сосудам при их медицинском обследовании, а также при хирургических операциях.

Многочисленные практические приложения имеют и другие рассмотренные модели. Примером приложения модели движения тела вверх по наклон ной плоскости при наклонном направлении вибрации (рис. 4,*а*) служат процессы вибрационной разгрузки и вибробункеризации (рис. 5). При направлении вибрации лотка, показанном на рис. 5,*а*, происходит истечение сыпучей среды из бункера — это обычный процесс *вибрационной разгрузки*. Если же вибрация направлена так, как показано на рис. 5,*б*, то материал движется внутрь бункера, т. е. против направления действия силы тяжести. Это так называемый процесс *вибробункеризации*.

Характерная особенность всех представленных на рис. 4 моделей состоит в том, что при отсутствии вибрации они обладают континуумом устойчивых положений равновесия; при достаточно интенсивной вибрации эти положения исчезают. Такая ситуация характерна для систем с сухим трением.

Все эти модели могут быть сравнительно просто изучены аналитически посредством метода прямого разделения движений [2].

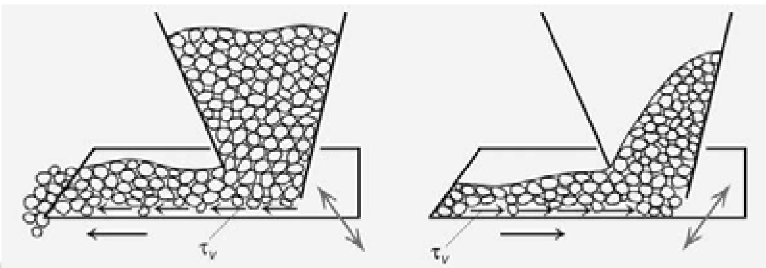

Рис. 5. Виброразгрузка и вибробункеризация.

Вибрация и скрытые движения: некоторые размышления

Подводя итог, обратим внимание на следующие обстоятельства.

1. С прикладной точки зрения использование вибрации для преодоления барьеров между устойчивыми положениями равновесия системы может дать ряд существенных преимуществ по сравнению с монотонными воздействия ми. Эти преимущества связаны с возможностью снижения уровня постоянного усилия, необходимого для преодоления барьера, а в ряде случаев — и со снижением общих энергозатрат. Данное обстоятельство во многом предопределяет эффективное использование вибрации в ряде технологических процессов.
2. Эффективному преодолению барьеров посредством вибрации может существенно способствовать наличие в системе внутренних степеней свободы и скрытых движений. Это обстоятельство может быть успешно использовано при создании новых, более совершенных вибрационных устройств.
3. С принципиальной точки зрения наиболее примечательно, что наблюдателю, не знающему о наличии вибрации и скрытых степеней свободы в системе, представляются нарушенными основные законы классической механики. В частности, у него возникает иллюзия, что при преодолении потенциальных барьеров имеет место туннельный эффект. Такой наблюдатель может начать придумывать (и такие случаи известны) новую механику. Наблюдатель же, знающий о наличии вибрации и скрытых степеней свободы, но сознательно не замечающий «быстрых» сил и «быстрых» движений, объяснит преодоление барьеров и другие кажущиеся несоответствия механике Ньютона появлением дополнительных «медленных» сил. Такой наблюдатель понимает, что лишь осредненный учет за-

конов механики приводит к кажущимся, вполне объяснимым на основе классических представлений, аномалиям.

В связи со сказанным отметим, что попытки объяснить основные наблюдаемые факты физики микромира наличием скрытых движений уже предпринимались выдающимися физиками нашего времени. Сочувственно к этим попыткам относился А. Эйнштейн, а в последнее время — Р. Пенроуз. Приведем несколько выразительных цитат [13. С. 247, 248].

«Хорошо известно отвращение, которое Эйнштейн питал к вероятностному аспекту квантовой теории, и которое он в сжатой форме сформулировал в одном из писем Максу Борну в 1926 году: “Квантовая механика производит очень внушительное впечатление. Но внутренний голос говорит мне, что это еще не настоящая «вещь». Квантовая теория дает очень многое, но вряд ли способна приблизить нас к разгадке секрета Старика. Я глубоко убежден, что Он не играет в кости”»*.

«Такая картина была неприемлема для Эйнштейна, который был глубоко убежден в том, что объективный физический мир должен действительно существовать, даже на микроскопических масштабах квантовых явлений. В своих многочисленных дискуссиях с Бором Эйнштейн пытался (но неудачно) показать, что квантовой картине присущи внутренние противоречия и что за квантовой теорией должна стоять какая-то более глубокая структура, возможно, более похожая на картины классической физики. Возможно, вероятностное поведение квантовых систем является проявлением статистических эффектов более малых компонентов, или частей, системы, о которых мы не располагаем непосредственным знанием. Последователи Эйнштейна, в особенности Давид Бом, развили высказанную им идею о «скрытых переменных», согласно которой должна существовать некоторая вполне определенная реальность, но параметры, точно определяющие систему, не доступны нам непосредственно, и квантовые вероятности возникают из-за того, что значения этих параметров неизвестны до измерения.

Согласуется ли теория скрытых переменных со всеми наблюдаемыми фактами квантовой физики? Похоже, что ответ на этот вопрос должен быть утвердительным…»

«Наиболее успешная теория скрытых переменных известна как модель де Бройля. Я не буду обсуждать здесь эти модели, так как в этой главе моя цель состоит только в том, чтобы дать общий обзор стандартной квантовой теории, а не различных соперничающих с ней положений. Если кто-нибудь жаждет физической реальности, но готов пожертвовать детерминизмом, то самой стандартной теории вполне достаточно».

Интересны также соображения, высказываемые по этому поводу Б. Б. Кадомцевым [14].

В заключение хочется задать вопрос: не пришло ли время вновь обратиться к этим идеям с учетом новейших достижений нелинейной динамики (в частности, теории синхронизации динамических систем, теории детерминированного хаоса, вибрационной механики), которые еще не были известны два-три десятилетия тому назад? А также с учетом подсознательного убеждения цитированных выше знаменитых ученых (вполне разделяемого автором), что микромир и макромир скроены и сшиты по одному, а не по различным шаблонам.

---

* Хочется привести здесь четверостишье, сочиненное под влиянием этого высказывания видным санкт-петербургским ученым-патентоведом, писателем и поэтом, профессором В. Я. Ионасом:

«Если Бог играет в кости,
То на это есть резон:
Кости, как Вы их не бросьте,
Лягут так, как хочет Он».

ЛИТЕРАТУРА

1 *Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. М., 1964.*
2 *Блехман И. И. Вибрационная механика. М., 1994.*
3 *Blekhman I. I. Vibrational Displacement, Overcoming the Potential Barriers // Fifth EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC). Eindhoven, August 2005.*
4 *Paul W. // Revs. Mod. Phys. 1990. V. 62. P. 531—540.*
5 *Levi M. // Physica D132. 1999. P. 150—164.*
6 *Selected Topics in Vibrational Mechanics / Ed. I. I. Blekhman. Singapore, 2004.*
7 *Блехман И. И. // Химическая промышленность. 2004. Т. 81. №7. С. 329—331.*
8 *Kremer E. B. Vibrational LiquidBubble Interaction and Acoustic Induced Flow of Gas Suspension // IUTAM Symposium LiquidParticle in Suspension Flows. Grenoble, April 1994.*
9 *Blekhman I. I., Sperling L. // Technische Mechanik. 2004. Bd. 24. Heft. 3—4. S. 277—288.*
10 *Белецкий В. В. Очерки о движении космических тел. М., 1972.*
11 *Zimmerman K., Zeidis I., Steigenberger J. An Approach to WormLike Motion // Proc. of the XXI ICTAM. Warsaw, August 2004.*
12 *Chernousko F. L. Internal Movements as Means to Control the Motion of a Body in a Resistive Medium // Second Intern. Conference PHYSICS and CONTROL. St. Petersburg, August 2005.*
13 *Пенроуз Р. Новый ум короля: о компьютерах, мышлении и законах физики. М., 2005.*
14 *Кадомцев Б. Б. Динамика и информация. М., 1999.*