

## ВИБРАЦИЯ «ИЗМЕНЯЕТ» ЗАКОНЫ МЕХАНИКИ

И.И. Блехман

*Илья Израилевич Блехман, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией вибрационной механики Института проблем машиноведения РАН и ОАО «МеханобрТехника» (Санкт-Петербург). Руководитель проекта НШ-1521.2003.8.*

*Первую публикацию см.: «Природа». 2003. №11. С.42—53.*

Автор не собирается утверждать, будто вибрирующие тела следуют иным законам, нежели законы механики, сформулированные великим Ньютоном. Речь пойдет об удобном физическом истолковании и математическом описании ряда удивительных, зачастую парадоксальных явлений, которые сопровождают действие вибрации на нелинейные механические системы. Можно ли оставаться равнодушным, видя, как в результате едва заметной вибрации верхнее положение маятника делается устойчивым, тяжелый металлический шар «всплывает» в слое песка, свая лег ко погружается в грунт под действием собственного веса, массивное тело или слой сыпучего материала движется вверх по наклонной плоскости, вращение ротора устойчиво поддерживается при выключенном электродвигателе и т.п.? Часто (и, как мы увидим, не без оснований) создается впечатление, будто сила тяжести изменила свое направление, известное положение о невозможности ускорить или замедлить движение центра масс системы только за счет внутренних сил перестало действовать, закон механики о равенстве действия и противодействия нарушился, существенно неконсервативная система ведет себя как консервативная и т.д. Неудивительно, что перечисленные эффекты не раз служили поводом для заблуждений, в том числе для «ниспровержения» законов механики. Справедливости ради надо, однако, отметить: иногда такие «ниспровергатели» попутно делали остроумные и полезные изобретения и стимулировали интересные исследования (точно так же, как и их предшественники — изобретатели «вечных двигателей»).

### **Колебания вокруг нас**

Колебательные процессы характерны для всей живой и неживой природы — от клетки до сообществ организмов и от атома до галактик. Они играют заметную роль и в нервно-психической жизни человека, и даже в сфере социальных явлений. Вопрос о том, почему природа часто «предпочитает» колебания моно тонному течению процессов, до сих пор не имеет общего ответа. Только в ряде конкретных случаев можно догадаться, что колебательные процессы характеризуются определенной целесообразностью, а иногда и оптимальностью.

*Вибрация* — один из видов колебательных процессов. Под нею понимают механические колебания с периодом, значительно меньшим промежутка времени, на котором рассматривается движение системы, и амплитудой, значительно меньшей характерного размера системы.

Долгое время вибрация рассматривалась в основном как вредный фактор — причина поломок, аварий, а также производственных заболеваний. И лишь в начале прошлого столетия берет отсчет период бурного развития вибрационной техники, без которой сейчас немислим ряд важных производств при добыче и переработке полезных ископаемых, в химической технологии, в металлургии, в промышленности строительных материалов и при строительстве различных сооружений. Впрочем, отдельные примеры использования вибрации известны с очень давних времен, когда она применялась при просеивании сыпучих материалов, при строительных работах и даже в медицинской практике.

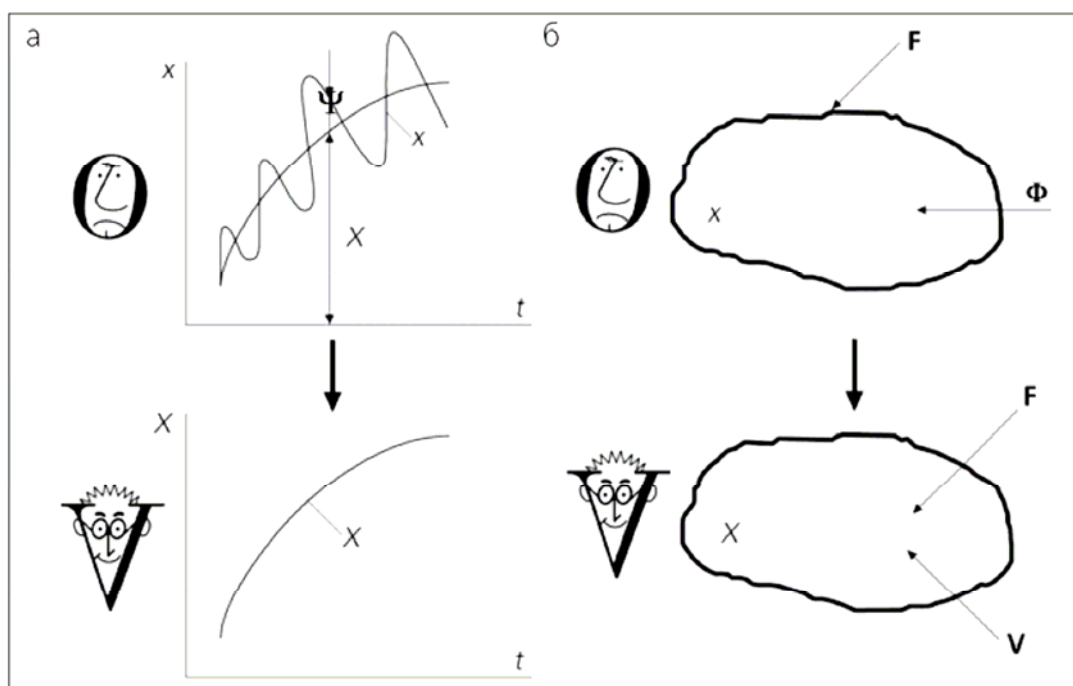
Кратко перечисленные выше (и более подробно — рассматриваемые ниже) вибрационные эффекты как раз и лежат в основе принципов действия ряда высокоэффективных машин;

с другой стороны, те же эффекты могут стать причиной нежелательных и даже катастрофических ситуаций.

Их существенная черта — нелинейный характер: результаты действия двух или нескольких факторов не складываются, а комбинируются, порой достаточно сложным, неожиданным образом (пример: результат одновременного приема двух хороших по отдельности лекарств может быть плохим).

### О вибрационной механике

Для большинства случаев характерно, что возникающее в системе под действием вибрации движение  $x$  естественно представляется в виде суммы двух составляющих — медленной  $X$ , мало изменяющейся за один период колебаний, и быстрой, «вибрационной»  $\psi$ , причем обычно основной интерес представляет именно медленное движение (рис.1).



**Рис. 1.** «Мир» наблюдателей О и V. Наблюдатель О видит реальный процесс  $x$ , а наблюдатель V — только его медленную (среднюю) составляющую  $X$  (а). Наблюдатель О видит систему, на которую действуют медленные силы  $F$  и быстрые  $\Phi$ , а наблюдатель V видит только систему, находящуюся под действием медленных сил  $F$  и  $V$  (б). Здесь и ниже наблюдатель О изображен печальным (O), а наблюдатель V — веселым (V). Этим подчеркивается, что мир наблюдателя V, который он видит через свои очки, гораздо проще, чем мир наблюдателя О. Значительно проще и соответствующие дифференциальные уравнения вибрационной механики.

Вообразим наблюдателя, не замечающего (или не желающего замечать) ни этих быстрых (как правило, малых) движений, ни быстрых сил, т.е. наблюдателя, который либо надел особые очки (сквозь них не видны быстрые движения системы), либо следит за движением при стробоскопическом освещении с частотой вспышек, равной частоте вибрации. Такой наблюдатель V, в отличие от обычного наблюдателя О, который «все видит», будет регистрировать лишь медленную составляющую движения  $X$ . Не желая вступать в противоречия с законами механики, он должен будет объяснить упомянутые парадоксальные эффекты тем, что наряду с обычными медленными силами начали действовать некоторые дополнительные мед-

ленные силы или моменты  $V$ . Следуя П.Л. Капице, будем называть их *вибрационными силами*. Именно эти силы с точки зрения такого «необъективного» наблюдателя и приводят к перечисленным выше эффектам.

Рассматривая соответствующие дифференциальные уравнения движения, можно прийти к положению, аналогичному известной теореме механики относительного движения. Согласно этой теореме, наблюдатель, связанный с ускоренно движущейся системой координат, должен ко всем действующим на систему обычным силам добавить силы инерции. В нашем же случае наблюдатель  $V$ , не замечающий ни быстрых сил, ни быстрых движений, обязан добавить ко всем обычным силам вибрационные силы. Если в механике относительного движения введение сил инерции — своего рода штраф за использование неинерциальной системы отсчета, то добавление вибрационных сил представляет собой штраф за игнорирование быстрых (как правило, малых) движений системы.

Учитывая сказанное, будем называть механику, которой должен руководствоваться наблюдатель, не замечающий быстрых сил и быстрых движений (наблюдатель  $V$ ), *вибрационной механикой* [1, 2].

Одна из основных задач в вибрационной механике – о нахождении выражений для вибрационных сил. Эта задача достаточно эффективно решается в рамках разработанной теории.

Вибрационная механика — новый раздел механики и теории нелинейных колебаний, который интенсивно развивается учеными России, Украины, Германии, Дании и других стран. Она служит, в частности, теоретической основой вибрационной техники и технологии. Возникла в нашей стране эта дисциплина не на пустом месте. Она базируется на фундаментальных исследованиях в области теории нелинейных колебаний и устойчивости движения, в которых отечественная школа физиков, математиков и механиков сыграла (и до сих пор играет) выдающуюся роль. Речь идет о трудах А.М. Ляпунова, Л.И. Мандельштама, Н.Д. Папалекси, А.А. Андропова, А.А. Витта, Н.М. Крылова, Н.Н. Боголюбова, Н.Г. Четаева, И.Г. Малкина, Б.В. Булгакова, А.И. Лурье и многих других, в том числе ныне здравствующих ученых. Автор этих строк не раз слышал на банкетах слова иностранных ученых: «Теория нелинейных колебаний — советская выдумка». В каждой шутке есть доля правды (а в данном случае — большая доля!).

### **Немного истории**

Толчком к развитию вибрационной механики послужила работа П.Л. Капицы, опубликованная в 1951 г. Будучи тогда молодым, начинающим ученым, я восхищался тем, как просто, изящно и физически прозрачно — путем прямого разделения медленного и быстрого движений — в задаче о маятнике с вибрирующей осью подвеса получен яркий результат: установлена устойчивость верхнего положения маятника и найдено соответствующее условие устойчивости (рис.2). В те годы многие видные ученые, преимущественно математики, придерживались мнения, что этот результат, полученный нестрогим путем, не имеет достаточно общего значения. Поэтому в своих диссертационных работах, посвященных теории самосинхронизации вращающихся тел и теории вибрационного перемещения, я предпочел пользоваться методами Пуанкаре—Ляпунова и, где это было возможно, — точными методами.

Каково же было мое удивление, когда оказалось, что те же результаты, найденные путем достаточно трудоемкого исследования, легко получаются посредством приемов (строго не обоснованных!), обобщающих прием Капицы для более сложных систем. Появились и работы других авторов, применивших его подход к решению ряда прикладных задач (отметим в их числе С.С. Духина, М.П. Юшкова, К.М. Рагульскиса, С.М. Зеньковской). Стало очевидно, что успех не случаен. И автор поставил перед собой задачу — распространить прием Капицы на достаточно общие нелинейные системы и по возможности математически обосновать его в духе асимптотических методов нелинейной механики. Это привело, во-первых, к решению ряда сложных и важных для приложений задач о действии вибрации на нелинейные системы

— в диапазоне от теории механизмов и машин до небесной механики. Во-вторых, был математически формализован аппарат метода. На конец, в-третьих, сформировались концепции, названные автором вибрационной механикой и виброреологией.

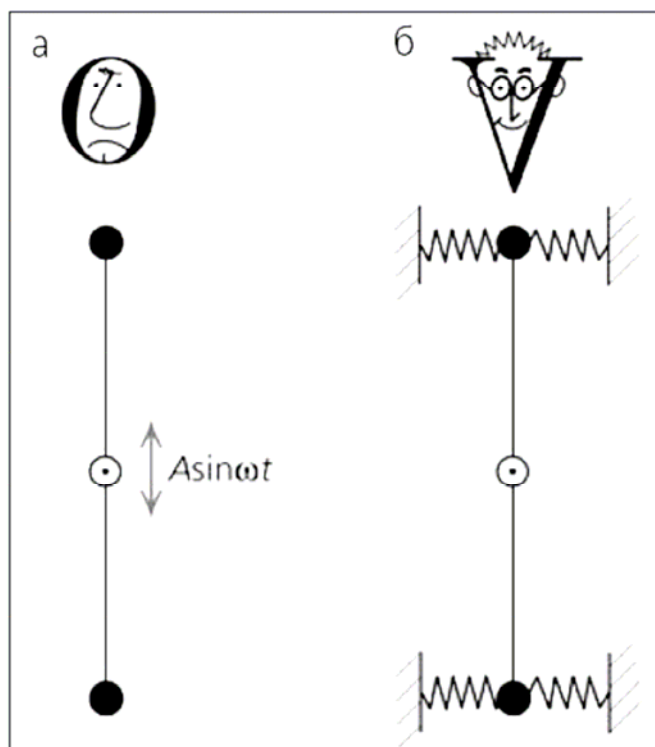


Рис.2. Маятник, точка подвеса которого совершает колебания по закону  $A \sin \omega t$ . Здесь и далее серые стрелки показывают направление вибрации. Верхнее положение маятника может стать устойчивым вследствие вибрации его оси (а). Наблюдатель V считает это результатом того, что маятник подпирается в обоих положениях равновесия незримыми пружинами (б). Наличием пружин объясняется тот факт, что маятниковые часы на вибрирующем основании всегда спешат (тогда как песочные часы в этом случае всегда отстают).

Было установлено, что они представляют собой частные случаи более общей концепции — механики систем со скрытыми (игнорируемыми) движениями.

К сожалению, практически во всех обзорах блестящей деятельности академика Капицы не отмечается значение его работы о маятнике в развитии и становлении нового эффективно-го метода и нового раздела теории нелинейных колебаний. Воистину справедливо известное изречение о том, что талант точно поражает намеченную цель, а гений одновременно поражает и многие другие цели!

### **Когда кпд машины «больше» единицы, а килограмм ваты «тяжелее» килограмма стали**

Подобные эффекты, невозможные для наблюдателя O, представляются реальными для наблюдателя V, не замечающего быстрых движений. Так, если электродвигатель с неуравновешенным ротором находится на вибрирующем основании (рис.3,а), вибрация может тормозить его вращение, т.е. служит дополнительной нагрузкой. Однако при других условиях эта вибрация подталкивает ротор, давая дополнительный вращающий момент. Подталкивание может быть столь значительным, что ротор будет вращаться, даже если двигатель выключен из сети (см. далее раздел о самосинхронизации). Наблюдатель V, не замечающий вибрацию, скажет, что кпд двигателя в этом последнем случае увеличился и, быть может, превысил единицу. Описанный эффект получил название *вибрационного поддержания вращения*. Он же позволяет играть в хула-хуп (рис.3,б). Примечательно, что мощность, которую способна пере-

дать вибрация вращающемуся ротору, может быть весьма велика. Именно это обстоятельство позволило создать в институте «Механобр» принципиально новые машины — конусные инерционные дробилки (рис.3,в) [1—3].

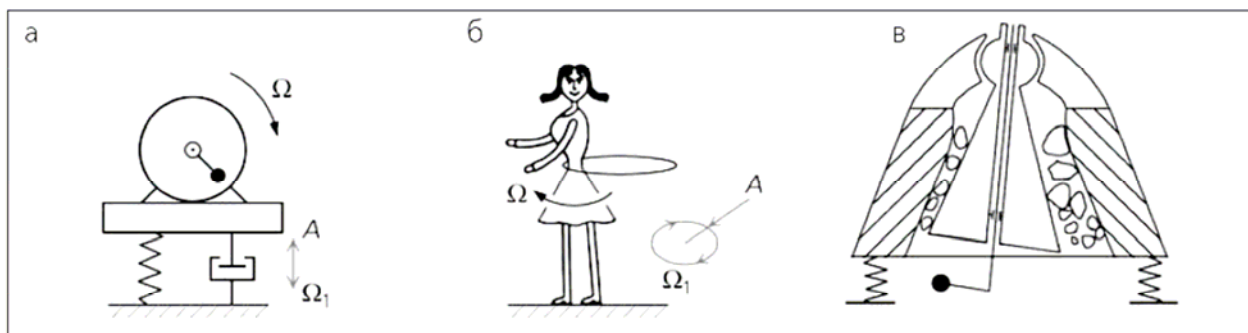


Рис.3. Влияние вибрации на вращение ротора. Измеряемый кпд вследствие вибрации может оказаться как меньше, так и больше действительного значения (измеренного на неподвижном основании) и даже больше единицы! (а). Игра упражнение хула-хуп (б) и инерционная дробилка института «Механобр» (в) — примеры использования эффекта вибрационного поддержания вращения (роль обруча в дробилке играет корпус).

А вот два примера вибрационного торможения из практики. В первом случае судовая машина упорно не выходила на номинальные обороты. После долгих расследований выяснилось, что причиной «отсоса» энергии были интенсивные резонансные колебания троса, лежавшего на палубе. Во втором случае тормозился локомотив, ведущий состав с жидким грузом: здесь энергия тратилась на возбуждение колебаний жидкости, частично заполняющей цистерны.

Все описанные выше эффекты могут быть объяснены как результат появления в уравнении вибрационной механики вибрационной силы (или момента)  $V$ .

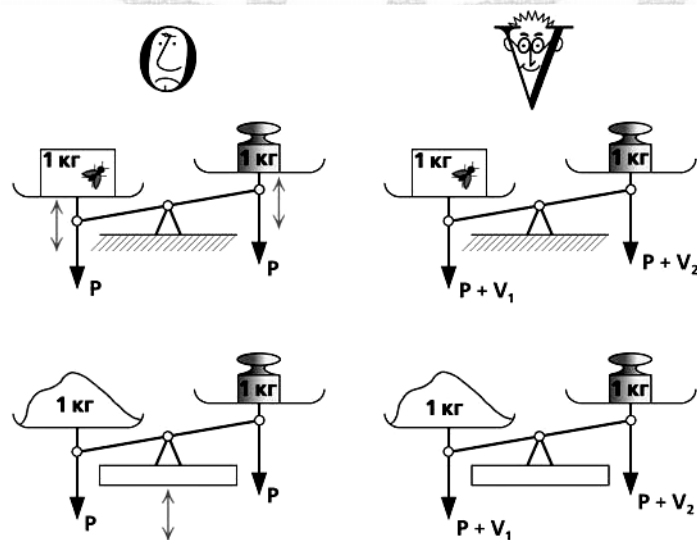


Рис.4. Нарушение равновесия чашек чувствительных весов вследствие вибрации: картины, видимые наблюдателем  $O$  и  $V$ .  $P$  — вес чаши весов с грузом.

Рассмотрим теперь чувствительные весы, схематически изображенные на рис.4,а. Коробочка, в которую помещена муха, в точности уравновешена гирькой, лежащей на другой чашке весов. Изменится ли равновесие, если муха станет летать внутри коробочки? Автору эта задача была предложена на экзамене в институте, и он дал ожидаемый экзаменатором ответ: не изменится, поскольку внутренние силы, возникающие при полете мухи, не могут изменить момента количества движения данной системы. И это действительно так, если не учитывать



наличия внешней силы — сопротивления воздуха движению чашек весов — или допустить, что весы помещены в вакуум. Если же не делать такого допущения, то равновесие может измениться! Это произойдет вследствие «аэродинамической асимметрии» системы: естественно предположить, что сопротивление воздуха движению чашек, во-первых, неодинаково при движении вверх и вниз, а во-вторых, неодинаково для обеих чашек по-разному. Тогда при колебаниях чашек весов вблизи положения равновесия, вызванных полетом мухи, средняя сила  $V_1$ , действующая на левую чашку (т.е. вибрационная сила), будет отличаться от такой же силы  $V_2$ , действующей на правую чашку.

Снова рассмотрим те же весы с уравновешенным гирькой грузом, но теперь заставим вибрировать в вертикальном направлении основание, на котором они стоят (рис.4,б). Равновесие может измениться по тем же причинам, что в предыдущем случае. Автору известен эпизод, когда наблюдение за подобной системой привело экспериментатора к мысли, что вибрация изменяет вес тела.

### **Вибрационное перемещение — полезное и вредное**

Под эффектом *вибрационного перемещения* понимается возникновение направленного в среднем изменения (в частности — движения) за счет ненаправленных в среднем (колебательных) воздействий. На нем основаны: транспортирование отдельных тел и сыпучих материалов в вибрирующих лотках и сосудах; работа устройств, называемых вибрационными преобразователями движения и вибродвигателями; погружение свай, шпунта и оболочек, а также разделение частиц сыпучего материала по плотности, размерам и некоторым другим параметрам за счет вибрации; движение вибрационных экипажей; полет и плавание живых организмов. В качестве примера вредного проявления этого эффекта можно указать возникновение под действием вибрации подвижности номинально неподвижных деталей машин (в частности — самоотвинчивание гаек) [1—6].

В последние годы либо по незнанию предшествующих работ, либо по другим менее простительным причинам ряд авторов присваивает тем же эффектам иные названия: «рэгчет», «прогрессивное движение» и т.п. Первое в переводе с английского означает храповик — стопорящееся при вращении в одном из направлений колесо с наклонными зубцами, используемое, например, в механизме часов. С помощью храповика колебания маятника или балансира преобразуются в направленное движение часовых стрелок.

В литературе встречаются и сомнения в возможности получения направленного движения путем колебательных (в том числе случайных) воздействий. Это, якобы, противоречит второму началу термодинамики. Такие сомнения безосновательны. В общей форме ответ состоит в следующем: для получения вибрационного перемещения необходима та или иная асимметрия системы. Можно различать шесть основных видов асимметрии: силовую, кинематическую, структурную (конструктивную), градиентную, волновую и начальную (т.е. связанную с начальными условиями движения). Характер каждого вида асимметрии частично ясен из его названия; развернутые определения можно найти в книгах [1, 2]. Разумеется, возможно, сочетание сразу нескольких, например, двух видов асимметрии.

Вибрационное перемещение (транспортирование) во всех перечисленных случаях можно трактовать в рамках вибрационной механики: наблюдателю  $V$  представляется, что оно происходит под действием некоторой вибрационной силы  $V$ .

Вот как работает техника, основанная на эффектах виброперемещения. На рис.5,а схематически изображено устройство для вибрационного транспортирования сыпучей среды. Под действием вибрации лотка материал поступает на него из бункера и транспортируется влево. На рис.5,б представлен противоположный процесс — вибробункеризация. В этом случае под действием иным образом ориентированной вибрации лотка бункер заполняется поступающим оттуда материалом. В рамках вибрационной механики оба процесса естественно

объясняются появлением вибрационных напряжений  $\tau_v$ , распределенных по поверхности лотка.

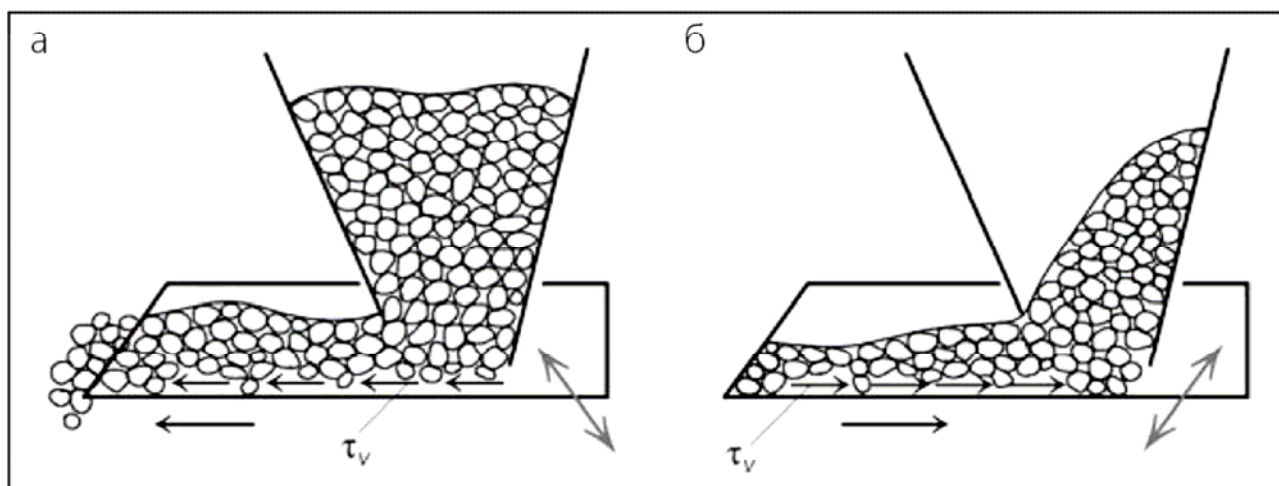


Рис.5. Вибрационное истечение и вибрационное транспортирование сыпучего материала (а) и заполнение бункера сыпучим материалом (вибробункеризация) (б).  $\tau_v$ — вибрационное напряжение.

На рис.6 дана схема вибрационного устройства для заполнения порошком тонкой металлической трубки, что необходимо при изготовлении электродной проволоки. Устройство обеспечивает равномерное и плотное заполнение порошком трубки диаметром 3—7 мм и длиной до 500 м. Это пример технологической задачи, которая вряд ли могла быть эффективно решена без использования вибрации. В описываемом устройстве трубка наматывается на вертикальный цилиндрический барабан и закрывается снизу. Барабану сообщаются винтовые колебания. Подаваемый сверху порошок заполняет трубку.

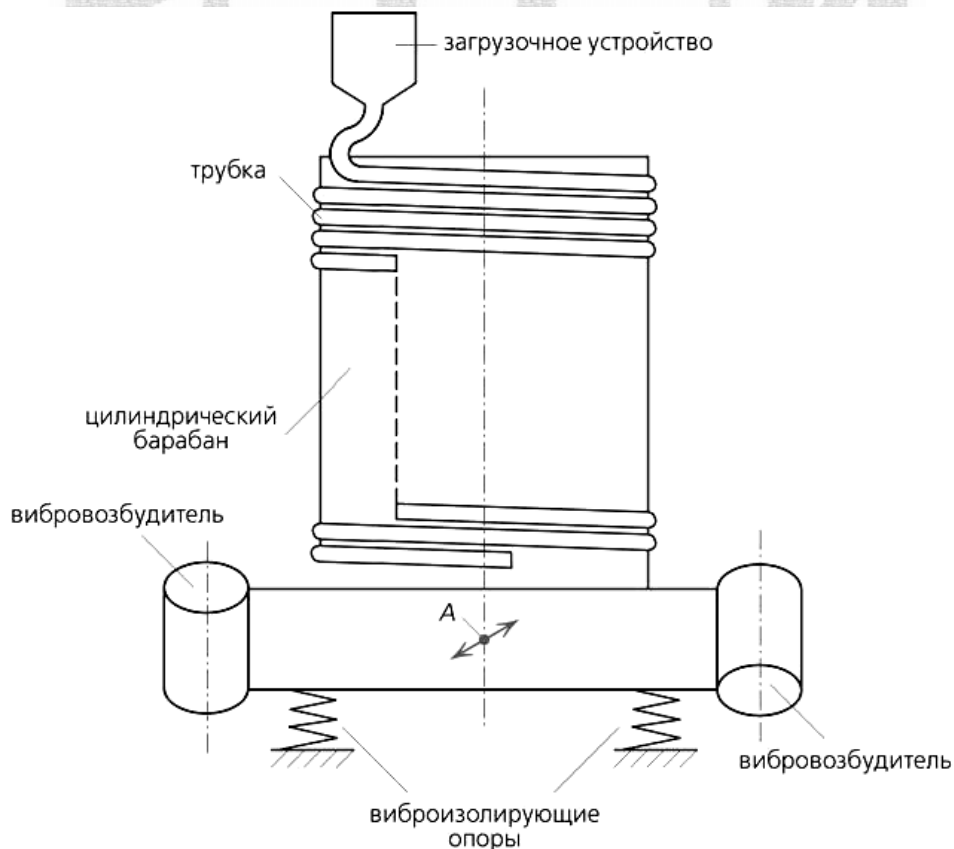


Рис.6. Схема устройства для заполнения порошком тонкой металлической трубки.

Как и по отношению к ряду других вибротранспортирующих устройств, было бы совершенно недостаточно сказать, что порошок становится под действием вибрации текучим, подобно жидкости, т.е. имеет место эффект псевдооживления. Не менее важно, что на каждом участке создается вибрационная сила, обеспечивающая «напор» в нужном направлении.

То же самое относится в процессе виброразгрузки сыпучих грузов из железнодорожных вагонов (рис.7). Характер вибраций, сообщаемых вагону, таков, что они не только «разжижают» материал, но и подают его к месту разгрузки.

Приведенными примерами далеко не ограничивается практическое использование эффектов вибрационного перемещения. Машины, основанные на этих эффектах, широко применяются при переработке полезных ископаемых, на предприятиях строительной, химической и пищевой промышленности.

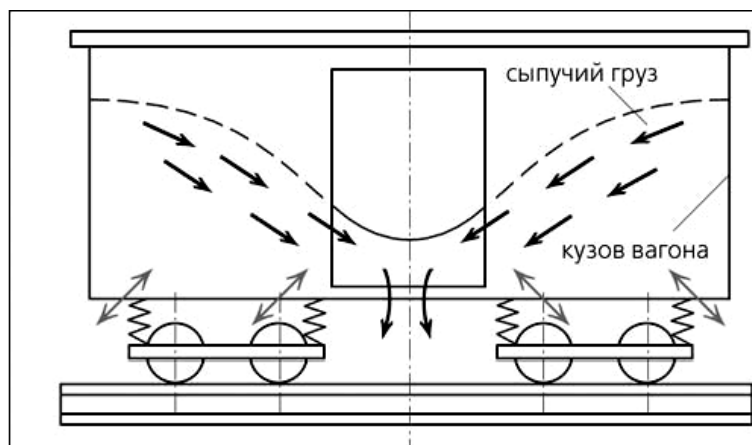


Рис.7. Вибрационная разгрузка железнодорожных вагонов с сыпучими грузами.

### **Можно ли плыть на лодке без весел?**

Одно из проявлений эффекта вибрационного перемещения — *вибрационное передвижение*. Под таковым будем понимать передвижение тела в некоторой среде или силовом поле, происходящее вследствие периодических движений других тел, связанных с исходным. Устройства или живые организмы, которые передвигаются по этому принципу, будем условно называть *вибрационными экипажами*.

Естественно, что взаимодействие самого устройства (организма) или указанных тел с внешней средой или наличие внешнего поля совершенно необходимо для изменения средней скорости движения центра инерции подобного экипажа, ибо иначе нарушался бы известный закон сохранения импульса. Уже отмечалось, что о наличии внешних сил или полей иногда забывают, и тогда это служит поводом для недоразумений, вплоть до выражения сомнений в справедливости законов механики.

Не останавливаясь подробно на проблеме передвижения живых организмов, которой посвящена обширная литература, рассмотрим преимущественно некоторые технические вибрационные экипажи, в том числе несколько экзотические.

Заметим, прежде всего, что если бы ответ на вопрос, поставленный в заголовке раздела, был отрицательным, автор не задавал бы его читателю. Читатель, конечно, знает, что резкими движениями своего корпуса в одном направлении и плавными — в другом, человек может заставить перемещаться лодку, в которой он находится. Точно так же, резко опуская зонтик и плавно поднимая его вверх (рис.8,а), можно если не подняться в воздух, то заметно «уменьшить свой вес» (а в воде — даже и всплыть). Экипажи, основанные на данном принципе, называются *вибролетами*.



Экипаж с рис.8,б, как и предыдущий, характеризуется разным сопротивлением движению вперед  $F_+$  и назад  $F_-$  благодаря наклону жестко связанных с ним плавников. Предполагается, что не показанный на рисунке вибровозбудитель генерирует периодическую вынуждающую силу  $\Phi(\omega t)$  (не обязательно симметричную). Более общая схема рис.8,в отличается от схемы рис.8,б тем, что плавники присоединены к корпусу шарнирно и связаны с ним также упругими элементами некоторой жесткости  $C$ , которая может быть выбрана из условия резонанса плавника с частотой вынуждающей силы  $\omega$ .

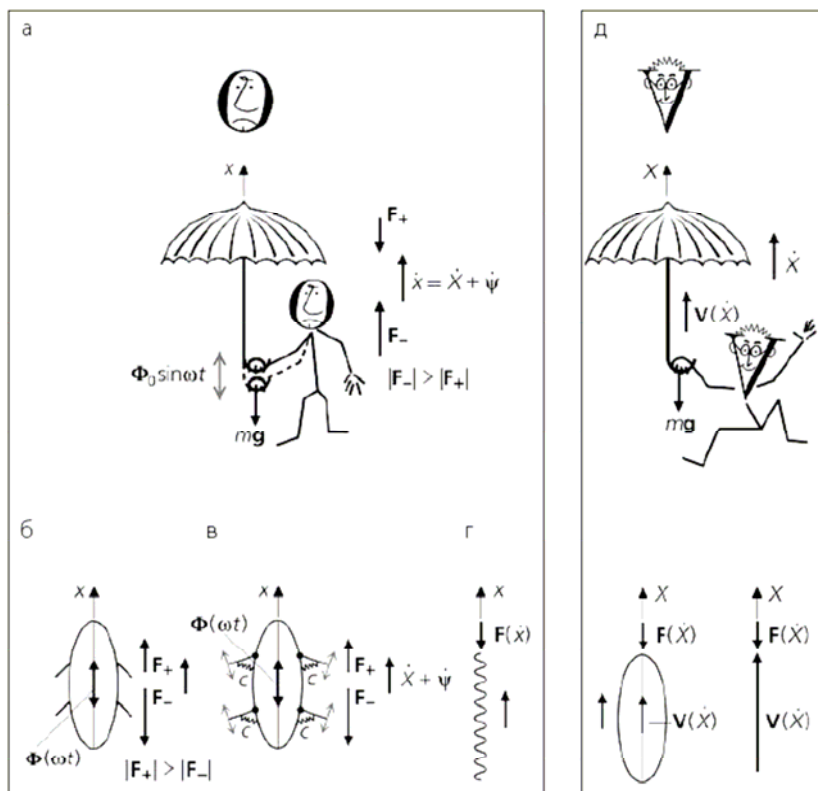


Рис.8. Вибрационные экипажи. Уменьшение веса при взмахах зонтиком ( $mg$  — сила тяжести) и простейшие модели движения живых организмов.

Естественно, в этом случае экипаж может развивать значительно большую скорость. Именно по этой схеме образуется тяга (и подъемная сила) в летательных аппаратах с машущими крыльями, у насекомых и птиц, а у некоторых организмов — при плавании.

Весьма примечательно, что устройства, подобные изображенным на рис.8,б,в, могут передвигаться и без затрат внутренней энергии, и без внутреннего источника возбуждения. Действительно, предположим, что в них отсутствуют вибровозбудители, т.е.  $\Phi(\omega t)=0$ , но их корпуса систематически испытывают извне случайные толчки, равновероятные во всех направлениях. Продвинуться вперед этим устройствам благодаря наклонным плавникам легче, чем назад, поскольку  $|F_+| < |F_-|$ . В результате и в данном случае возникает вибрационная сила, которая заставит устройство медленно двигаться вперед. Этот эффект может быть усилен, если выбрать жесткость упругих элементов в устройстве рис.8,в так, чтобы частота их свободных колебаний в жидкости была близка к преимущественной частоте турбулентных пульсаций в водоеме. Есть данные о том, что китообразные могут регулировать жесткость плавников и хвоста, увеличивая или уменьшая приток крови к соответствующим группам мышц. Возможно, эти животные также черпают часть энергии, затрачиваемой на передвижение, из «возобновляемого источника энергии» — турбулентного потока. Известен и иной, волновой, механизм получения животными энергии из потока.

Схема рис.8,г соответствует механизму плавания жгутиковых. Подобные организмы передвигаются в жидкости, придавая своему удлинённому телу или его частям поперечные колебания в виде бегущей волны (волновая асимметрия).

И во всех случаях наблюдатель V объяснит направленное движение экипажей возникновением вибрационной силы V (рис.8,д).

### **Притяжение ритмов (самосинхронизация)**

Одно из удивительных явлений рассматриваемого класса — *самосинхронизация неуравновешенных роторов* (роторов, ось вращения которых не проходит через центр масс). Оказывается, два или более кинематически и электрически не связанных между собой ротора, установленные на общем подвижном основании и приводимые в движение от независимых асинхронных двигателей, вращаются синхронно — с одинаковыми или кратными средними угловыми скоростями и с определенными взаимными фазами. При этом согласованность вращения роторов возникает, несмотря на различие между их парциальными угловыми скоростями, т.е. теми скоростями, с которыми они вращаются, будучи установленными на неподвижном основании (рис.9). Тенденция к синхронному вращению оказывается во многих случаях столь сильной, что даже выключение одного или нескольких двигателей не приводит к выпадению из синхронизма: роторы с выключенными двигателями могут продолжать вращаться неограниченно долго. Энергия, необходимая для поддержания их вращения, передается от оставшихся включенными в сеть двигателей благодаря вибрации основания, на котором роторы установлены. Эта вибрация может быть едва заметна; у наблюдателя V складывается впечатление, будто между роторами имеются упругие валики или пружины (рис.9,в).

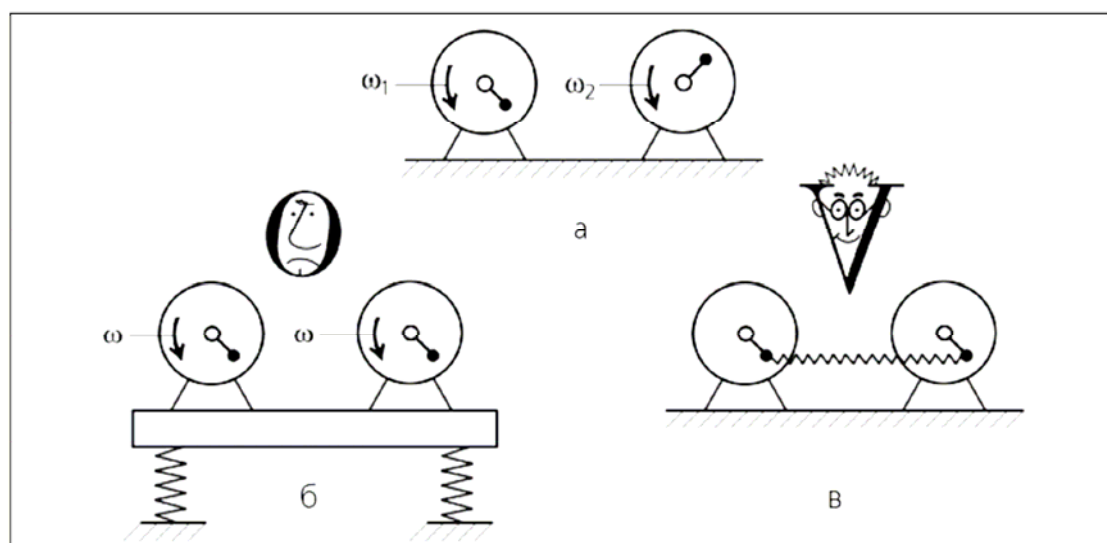


Рис.9. Самосинхронизация механических вибровозбудителей. Два или более неуравновешенных ротора, приводимых в движение асинхронными двигателями, на неподвижном основании имеют разные скорости вращения  $\omega_1$  и  $\omega_2$ (а). Установленные же на общем подвижном основании, они вращаются с одинаковой средней скоростью  $\omega$ (б). Синхронность вращения может сохраняться даже при выключении одного из двигателей ( $\omega_1=0$  или  $\omega_2=0$ ). У наблюдателя V создается иллюзия, будто роторы соединены пружиной (в).

Толчком к обнаружению явления самосинхронизации неуравновешенных роторов как раз и послужило случайное наблюдение описанного эффекта в ленинградском институте «Механобр» в 1948 г. При длительных испытаниях вибрационной машины с двумя механическими вибровозбудителями (неуравновешенными роторами, которые приводились во вращение от асинхронных электродвигателей) оборвался провод, подающий напряжение к одному из двигателей. Наличие обрыва, однако, выяснилось лишь спустя несколько часов, ибо установка продолжала нормально работать.

В том же институте было выполнено и большинство теоретических исследований и экспериментально-конструкторских разработок устройств с самосинхронизирующимися вибро-возбудителями. Его сотрудникам выдано свидетельство на научное открытие явления синхронизации вращающихся тел (роторов) [1—3, 7].

Раньше вращение неуравновешенных роторов в вибрационных машинах согласовывалось лишь путем установки между ними жестких кинематических связей в виде зубчатых зацеплений, цепных передач и т.п. (см. рис.10,а). Результатом становились значительный шум и быстрый износ, сопровождающий работу зубчатой или цепной передачи — из-за наличия знакопеременных или пульсирующих нагрузок. Кроме того, кинематический способ синхронизации сдерживал развитие вибрационной техники, поскольку не мог быть целесообразно применен во многих практически важных случаях, например при значительных расстояниях между вибровозбудителями. При использовании самосинхронизации кинематические связи между роторами оказываются излишними (рис.10,б). Последовавшая вслед за открытием разработка теории и методов расчета устройств с самосинхронизирующимися вибровозбудителями привела к созданию нового класса вибрационных машин — конвейеров, питателей, грохотов, дробилок, мельниц, концентрационных столов, специальных стандов и др.

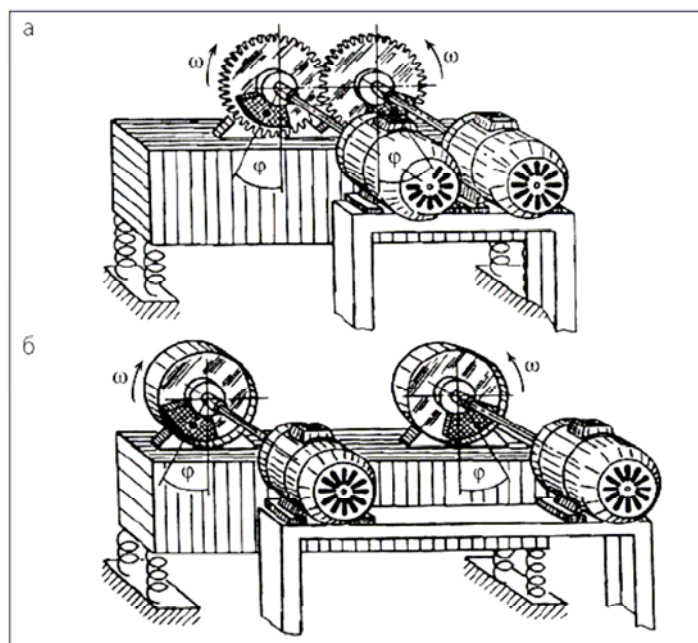


Рис.10. Возможности использования само синхронизации роторов: старый способ согласования вращения роторов вибровозбудителей для получения направленных колебаний (а); новый способ достижения той же цели (зубчатое зацепление излишне) (б).

К настоящему времени зарегистрировано около 300 изобретений и патентов, основанных на использовании эффекта самосинхронизации. Многие из этих изобретений, по-видимому, не были бы сделаны без теоретических исследований. Дело в том, что ряд закономерностей самосинхронизации вибровозбудителей вряд ли может быть предсказан на основе чисто интуитивных соображений или обнаружен на основе нецеленаправленного экспериментирования. Вместе с тем возможности использования самосинхронизации вибровозбудителей еще далеко не исчерпаны — постоянно рождаются новые идеи, разрабатываются новые и совершенствуются известные устройства.

По-видимому, первое наблюдение и описание явления синхронизации колеблющихся объектов принадлежит Х. Гюйгенсу, который еще в начале второй половины XVII в. обнаружил, что пара маятниковых часов, ходивших по-разному, самосинхронизовалась, когда их прикрепляли к легкой балке вместо стены.

В конце 19го столетия Дж. Рэлей заметил, что две органнне трубы с расположенными рядом отверстиями при близкой настройке начинают звучать в унисон, т.е. происходит взаимная синхронизация колебаний. Иногда при этом трубы могут заставить друг друга почти полностью «замолчать». Аналогичное поведение было обнаружено Рэлеем и у двух электрических или механически связанных камертонов. В конце XIX — начале XX в. были открыты явления синхронизации в электрических цепях и в некоторых электромеханических системах. Взаимная синхронизация электрических генераторов и генераторов электромагнитных колебаний до недавнего времени представляла собой главные технические приложения синхронизации, им посвящено значительное число теоретических и экспериментальных исследований\*.

Самосинхронизация вращений характерна не только для неуравновешенных роторов, расположенных на единой колебательной системе, но и для многих других вращающихся взаимодействующих тел (в частности, для небесных тел); см., напр., [8], а также [1—3, 7]. Было установлено, что для возникновения тенденции к синхронизации принципиально важно именно наличие сил взаимодействия, зависящих, помимо прочего, от угловых координат тел. При этом синхронизация вращений, сопровождающаяся установлением определенных фазовых соотношений, часто происходит даже при весьма слабых взаимодействиях. В частности, стало понятным, что в случае небесных тел речь, несомненно, идет об общей закономерности — стремлении гравитационно взаимодействующих вращающихся тел к взаимной синхронизации, причем эта тенденция определяется общим для многих классов вращающихся тел механическим принципом — так называемым интегральным критерием устойчивости синхронных движений.

### **Самосинхронизация всюду и везде?**

Обнаружение синхронизации неуравновешенных роторов и развитие ее теории позволили понять тенденцию к синхронизации как общее свойство материальных объектов различной природы — тенденцию к самоорганизации, противоположную стремлению к хаотическому поведению. По сути дела, возник новый раз дел современной нелинейной механики — *теория синхронизации динамических систем*.

Значительный интерес исследователей ныне привлекают проблемы синхронизации в живых системах. Известны эффекты самосинхронизации излучения жучков-светлячков на одной поляне, скандированные аплодисменты большой аудитории, синхронизация менструальных циклов у женщин, проживающих в общежитии. В настоящее время начались многочисленные исследования синхронизации в сообществах клеток и нейронов, в том числе в связи с попытками понять механизмы памяти эмоций. Еще Н. Винер выдвинул гипотезу о синхронизационном механизме роста раковых клеток; эта гипотеза до сих пор не подтверждена и не опровергнута.

---

\* Совсем недавно пришло сообщение о грандиозной аварии — отключении электростанций на восточном побережье США и Канады. Есть основания предполагать, что причиной было (быть может, спровоцированное) выпадение из ритма одной из электростанций и последовавшая цепная реакция.

Несомненна роль синхронизации в микромире. Изучение таких процессов лишь начинается.

Все сказанное выше относилось к «частотной» или, как иногда говорят, к «гюйгенсово́й» синхронизации, в частности к самосинхронизации. В последние годы появилось большое число работ, посвященных синхронизации в более широком смысле — как согласованному во времени протеканию или согласованию двух и более процессов. Значительное внимание уделяется проблемам управления синхронизацией и синхронизации хаотических движений.

### Как вибрация превращает песок в «жидкость», а веревку в «стержень»

Важным разделом механики является *реология* — раздел, в котором изучается деформация и текучесть вещества. Классическими моделями реологии служат упругое тело Гука, вязкая жидкость Ньютона, пластическое тело Сен-Венана.

Под *виброреологией* понимается раздел механики, в том числе вибрационной, и реологии, анализирующий изменение под влиянием вибрации реологических реакций тел на медленные силы, а также соответствующие медленные движения тел [1—3]. Иными словами, виброреологию можно определить как реологию для наблюдателя V.

Когда говорят, что под действием вибрации изменяются свойства сред, в сущности, имеют в виду разное их восприятие наблюдателями O и V, т.е. изменения свойств, обнаруживаемые путем слежения соответственно за координатами  $x$  и  $X$ . Так, для наблюдателя O вибрируемый песок остается песком, а для наблюдателя V — становится подобным жидкости; для инженера естественна именно точка зрения наблюдателя V.

Следует, однако, отметить, что расхожее утверждение о разжижении сыпучей среды под действием вибрации весьма односторонне: в действительности возникают также поверхностные и объемные вибрационные силы. Именно наличием этих сил объясняются рассмотренные выше эффекты вибротранспортирования и вибробункеризации сыпучей среды. Другое подтверждение их действия — разница уровней среды в сообщающихся вибрирующих сосудах (см. рис.11, на котором представлены два характерных случая).

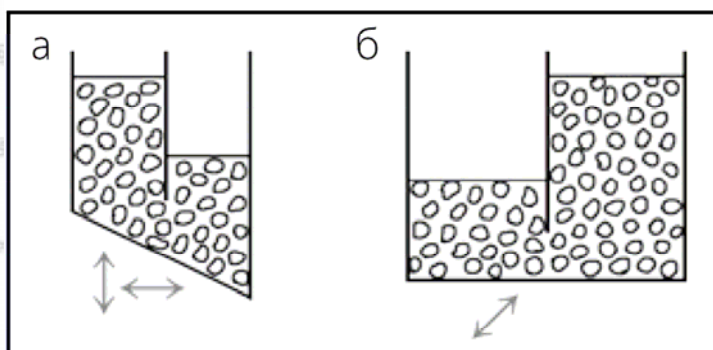


Рис.11. В сообщающихся вибрирующих сосудах сыпучая среда устанавливается на разных уровнях, если асимметричен сосуд (а) или асимметричны колебания (б).

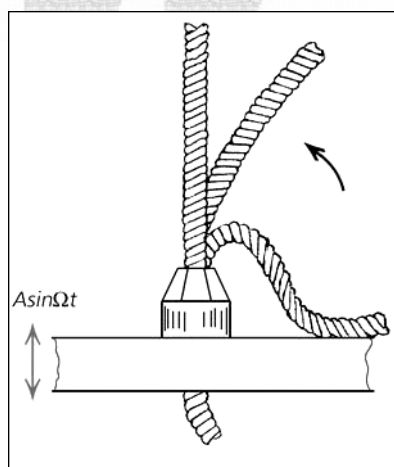


Рис.12. Эффект индийской магической веревки. Вибрация нижнего конца делает ее верхнее вертикальное положение устойчивым. Встречаются публикации, в которых рассказывается, будто индийским факирам удавалось добиваться устойчивости довольно длинной веревки, по которой взбиралась обезьянка.



Особый интерес представляют виброреологические эффекты, состоящие в изменении жесткостных характеристик упругих систем под действием вибрации. По-видимому, первым обратил внимание на такие эффекты академик В.Н. Челомей, указавший на их связь с поведением маятника, имеющего вибрирующую ось (рис.2). Поразительный эффект подобного рода был, однако, известен давно. Речь идет об индийской магической веревке (рис.12). Под влиянием вибрации нижнего конца ее верхнее вертикальное положение становится устойчивым. Вербка «пружинит», принимая это положение, как бы значительно ее ни отклоняли.

Подход вибрационной механики позволяет дать простое и отчетливое физическое объяснение этого эффекта: в результате вибрации веревка приобретает дополнительную изгибную жесткость, зависящую от частоты и амплитуды вибрации  $\Omega$  и  $A$ . Вербка словно превращается в балку. Можно сказать, что, изменяя  $A$  и  $\Omega$ , мы получаем новый материал (рис.13).

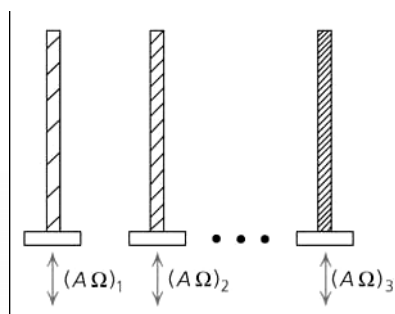


Рис.13. Изменение эффективной изгибной жесткости стержня под действием вибрации. Жесткость увеличивается при увеличении произведения  $A\Omega$  амплитуды  $A$  на частоту колебаний  $\Omega$ .

Тот же эффект имеет место в случае струны, натяжение которой быстро периодически изменяется. В результате струна приобретает дополнительную «вибрационную» жесткость, превращаясь, как и веревка, в упругий «стержень».

Приведенные примеры могут рассматриваться как предельные частные случаи так называемых *динамических материалов*, идея создания которых недавно была высказана К.А. Лурье и автором [1]. Под динамическими материалами понимаются среды, физические параметры которых (плотность, жесткость, электромагнитные свойства и т. п.) изменяются как в пространстве, так и во времени. Это нечто вроде «живых» материалов, в отличие от обычных (те в этом отношении являются «мертвыми»).

Другими примерами могут служить две или более различных сред, взаимно проникающие одна в другую и совершающие относительно друг друга некоторые движения, в частности, колебания (в последнем случае можно говорить о *вибрационных динамических материалах*).

Динамические материалы должны обладать необычными свойствами, существенно отличающимися от свойств исходных веществ. В частности, можно создать объекты, в которых сравнительно длинные волны распространяются только в одном направлении, так что определенная часть среды окажется изолированной от длинноволновых воздействий. Можно организовать среды так, что они будут быстро гасить или, наоборот, формировать ударные импульсы. Разумеется, определенные трудности представляют конкретные технические способы создания динамических материалов. Такие способы уже начали разрабатываться.

Вышесказанным важными для приложений виброреологические эффекты далеко не исчерпываются. Еще не завершено создание теорий *вибропластичности*, *виброползучести*, *виброрелаксации*, эффекта *усталости материалов*, имеющих немалое практическое значение.

### **Может ли вибрация закупорить отверстие в вибрирующем сосуде?**

Другое важное поле приложений вибрационной механики — изучение воздействия вибрации на жидкости, газы, газожидкостные среды и суспензии [9]. Как на классический пример

такого класса явлений можно сослаться на турбулентное течение жидкости. Роль вибрационных сил тогда (при рассмотрении усредненного потока на основе уравнений Рейнольдса) играют так называемые турбулентные напряжения. Благодаря этим напряжениям эффективная вязкость жидкости (по отношению к медленным движениям, т.е. для наблюдателя  $V$ ) резко возрастает. По образному выражению академика В.В. Новожилова, вода как бы превращается в патоку. Налицо типичный виброреологический эффект.

Здесь нет возможности остановиться подробно на крайне сложной проблеме турбулентности, а также на весьма интересном явлении вибрационной конвекции. Скажем лишь несколько слов о вибрационном аналоге основного уравнения гидравлики — уравнении Бернулли. В этом уравнении, описывающем «медленную» составляющую потока, возникает дополнительный член, который соответствует перепаду давления, зависящему от параметров вибрации. Данный перепад может быть и положительным, и отрицательным и поэтому вызывать как увеличение, так и уменьшение скорости потока.

На основе «вибрационного» уравнения Бернулли удалось решить ряд интересных прикладных задач, в частности теории вибрационных насосов. Оно может быть использовано для объяснения и описания двух следующих, весьма своеобразных, процессов.

Сравнительно давно известен *виброструйный эффект*. Он состоит в том, что при вибрации в жидкости пластины с коническими отверстиями возникают медленные потоки жидкости в направлении сужения отверстий. Этот эффект успешно используется в ряде технических устройств. Вместе с тем есть информация, что он был причиной некоторых авиационных катастроф: вследствие вибрации топливо переставало поступать из баков (имел место эффект вибрационного запираания отверстий). В этом случае давление, способствующее истечению топлива, уравновешивается противодействием, возникающим из-за вибрации.

Другое явление — *вибрационная инжекция газа в жидкость* — было обнаружено недавно [10]. Воздух или другой газ засасывается в вибрирующий в этом газе сосуд с жидкостью через отверстия в его нижней части (рис.14). Впрочем, инжекция будет происходить и в случае вибрации сосуда, помещенного в жидкость,

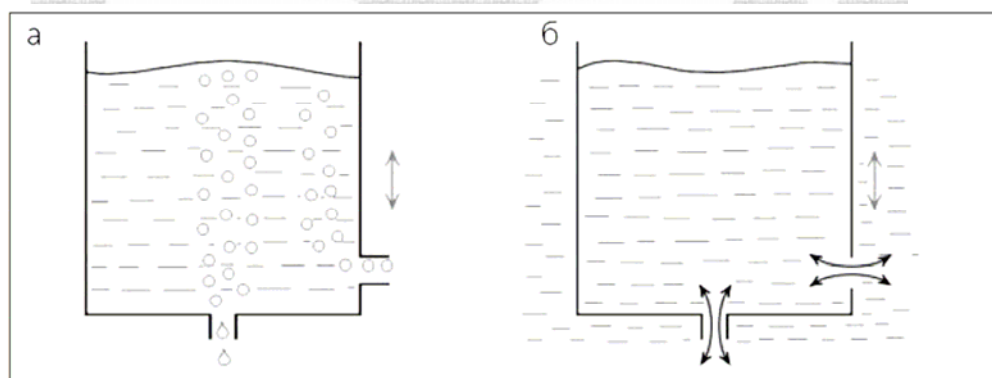


Рис.14. Вибрационная инжекция. При вибрации сосуда в жидкость внутри него инжектируется газ (а) или другая жидкость (б).

т.е. можно говорить также о вибрационной инжекции жидкости в жидкость. В этом варианте оно родственно виброструйному эффекту с той разницей, что отверстие в сосуде не обязательно должно быть коническим и жидкости в сосуде и вне него не предполагаются одинаковыми.

\* \* \*

Нашей целью было осветить широкий мир удивительных явлений, сопровождающих действие вибрации на нелинейные механические системы, а также наметить общий подход к изучению этих процессов. Многие из них уже находят важное практическое применение, но

возможности здесь еще далеко не исчерпаны. Более того, сам список этих феноменов постоянно пополняется.

Ряд изложенных здесь идей и разработок выполнен инженерами и учеными, имена которых не удалось, к сожалению, упомянуть в тексте статьи. Читатель может найти эти имена в приводимом ниже списке литературы по проблеме.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Блехман И.И. *Вибрационная механика*. М., 1994; англ. пер.: *Blekhman I.I., Vibrational Mechanics (Nonlinear Dynamic Effects, General Approach, Applications)*. Singapore, 2000.
- 2 Блехман И.И. *Что может вибрация? О «вибрационной механике» и вибрационной технике*. М., 1988.
- 3 *Вибрации в технике: Справочник в 6 т.* М., 1978—1981.
- 4 Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. *Вибрационное перемещение*. М., 1964.
- 5 Гончаревич И.Ф. *Вибрация — нестандартный путь*. М., 1986.
- 6 Фролов К.В. *Вибрация — друг или враг?* М., 1984.
- 7 Блехман И.И. *Синхронизация в природе и технике*. М., 1981; англ. пер.: *Blekhman I.I. Synchronization in Science and Technology*. N.Y., 1988.
- 8 Белецкий В.В. *Резонансные явления во вращательных движениях искусственных и естественных небесных тел // Динамика косм. аппаратов и исслед. косм. пространства*. М., 1986.
- 9 Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. *Динамика частиц при воздействии вибрации*. Киев, 1975.
- 10 Блехман И.И., Блехман Л.И., Вайсберг Л.А., Васильков В.Б., Якимова К.С. // *ДАН*. 2003. Т.391. №2. С.185—188.

