

Физические забавы с падающей пружиной

А. Е. ДУБИНОВ, И. Д. ДУБИНОВА

Объекты и элементы природы зачастую рождаются и существуют в спиральной форме, например, спиральные течения часто наблюдаются в жидкостях и плазме, а спиральные кристаллы и дислокации были найдены в твердой материи. Спиральные органы имеются у многих растений и животных, а открытие двойной спирали у молекул ДНК стало одним из наиболее важных достижений биологической науки XX века.

Подражая природе, человечество активно использует спиральные формы в науке, технике, производстве. Этому также имеется огромное множество примеров: упругие пружины и нано-пружины как демпфирующие элементы приборов и машин, спиральные волноводы, спиральные антенны электромагнитных волн и спиральные контакты в электронике, управляемые акустические метаматериалы, содержащие спирали и др. Спиральные пружины широко используются и в медицине, например, в качестве катетеров и стентов. Кроме того, спиральные мотивы часто встречаются в искусстве и архитектуре.

В 1947 г. американец Ричард Джеймс запатентовал забавную игрушку на основе мягкой цилиндрической спирали, названную им «слинки» (slinky, то есть «облегающий»). С тех пор эта ярко окрашенная игрушка получила всемирную популярность у детей и их родителей. Сообщается, что за первые 60 лет фирма, выпускающая слинки, продала более 300 млн. экземпляров.

Нашлось немало поклонников игрушки-слинки и среди ученых. В настоящее время вышло

несколько десятков серьезных научных статей в ведущих научных журналах, в которых представлены исследования их необычного поведения. Было найдено множество новых механических эффектов. Известно, что астронавты НАСА неоднократно брали слинки с собой в полет и проводили с ними различные опыты в условиях невесомости.

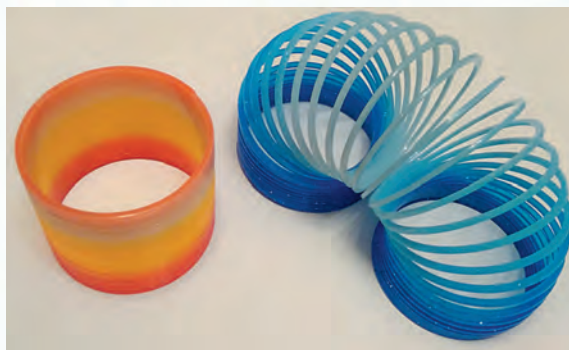
Что же необычного найдено в механике мягких пружин? Например, если подвесить мягкую пружину за один из ее концов и дать ей успокоиться, то можно заметить, что ее растяжение под собственным весом будет неоднородным: соседние витки в верхней части пружины будут отстоять друг от друга на расстоянии большем, чем соседние витки в нижней ее части. Иными словами, плотность витков в нижней части больше, чем в верхней. Было найдено, что центр масс вертикально подвешенной пружины в однородном гравитационном поле отстоит от нижнего конца ровно на четверть ее длины, а плотность витков этой пружины возрастает с расстоянием от верхней точки подвеса по квадратичному закону.

А что произойдет, если быстро разорвать подвес в верхней части пружины? Как будет двигаться ее верхний конец и как будет двигаться нижний конец пружины? Представим предварительные соображения о характере движения концов пружины.

С момента, когда нить подвеса разрезается, верхний конец пружины начинает падать сразу же после этого момента. Вместе с тем информация об разрезании нити подвеса должна распространиться к нижнему концу пружины за конечное время, прежде чем и он начнет падать, поэтому нижний конец будет оставаться некоторое время неподвижным. Промежуток времени τ между моментом разрезания нити и моментом



Упаковка одного из первых экземпляров игрушки-слинки



Современные ярко окрашенные пластиковые игрушки-слинки

старта нижнего конца пружины называется временем левитации. Какова длительность левитации?

Оказывается, передача информации о разрезании нити от верхнего конца к нижнему происходит в виде некой ударной волны сжатия пружины, бегущей с постоянной скоростью вниз. При этом время левитации можно оценить как время пробега ударной волны по всей растянутой пружине. Несложные выкладки дают, что время левитации $\tau \propto (M/k)^{1/2}$, где M – масса пружины, k – ее жесткость, \propto – знак, определяющий пропорциональность. Оно может составлять до нескольких сотен миллисекунд. Следовательно, для экспериментального изучения динамики падения потребуется высокоскоростная видеорегистрация.

Представим примеры проведения и обработки нескольких экспериментов с падением пружины. Для исследований в магазине игрушек была приобретена мягкая стальная игрушка-слинки цилиндрической формы, имеющая следующие размеры и параметры: внешний диаметр 60 мм, длина в сжатом состоянии 50 мм, длина висящей пружины 510 мм, количество витков 73, масса 82 г.

Для подвеса пружины на заданной высоте использовалась стандартная тренога, которая имеется у каждого фотографа-профессионала. В верхней части треноги закреплялась горизонтальная штанга, имеющая упругий зажим. В зажиме закреплялась нить подвеса пружины. Сама нить подвеса была зацеплена за перемычку, натянутую вдоль диаметра первого витка пружины, что не допускало перекоса верхнего витка.

Вдоль диаметра нижнего витка пружины также была натянута перемычка, к которой с помощью нити мог подвешиваться дополнительный то-

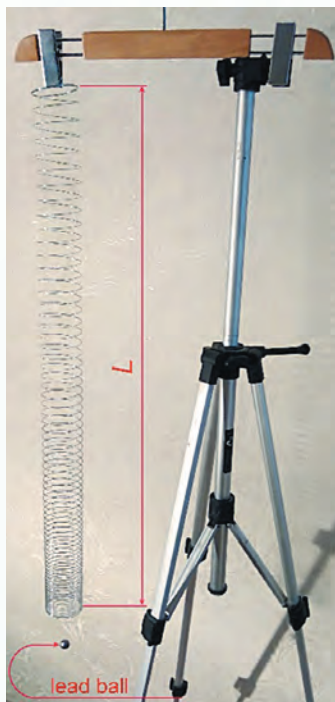


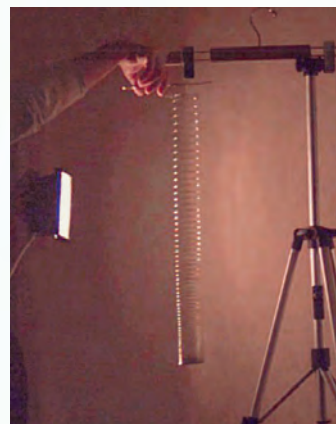
Схема подвеса пружины; заметна неоднородность плотности витков пружины по вертикали

чечный грузик. Такой способ подвеса грузика также не допускал перекоса и нижнего витка пружины. В качестве грузиков использовались калиброванные по массе m несколько свинцовых шариков. На грузиках для удобства их крепления имелись стальные петли. Такие грузики с петлями имеются в любом магазине для рыбаков.

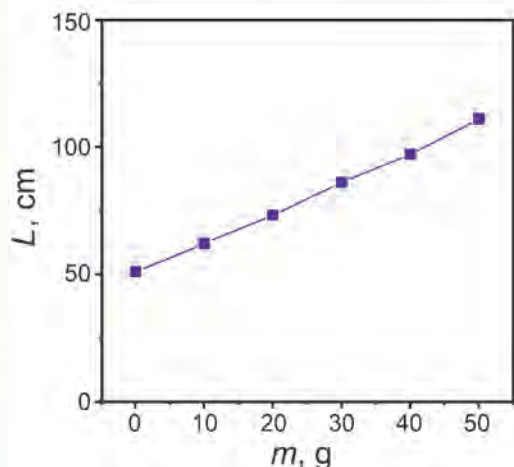
Для визуализации процесса падения пружины использовалась высокоскоростная камера Chronos-1.4. Экспериментально было найдено, что оптимальным для исследования был режим записи с периодом ~ 350 мкс (частота 2873 кадров/с) и с пространственным разрешением 800×600 пикселей.

Обратим внимание начинающих исследователей на одну важную фотографическую особенность высокоскоростной видеозаписи. За малый период времени для видеозаписи одного кадра с временем экспозиции < 350 мкс количество поступающих на CMOS-матрицу камеры фотонов может оказаться очень невелико. Следовательно, для получения качественного изображения необходимо позаботиться о дополнительной подсветке изучаемого процесса. Оказывается, что подсветка с помощью ламп дневного света или светодиодов не годится для высокоскоростной видеозаписи, т. к. яркость таких источников света существенно колеблется на промышленной частоте (в России – на частоте 50 Гц). Рекомендуется использовать естественный солнечный свет, мощные лампы накаливания или мощные галогенные лампы, в которых колебания яркости отсутствуют. Галогенная лампа мощностью 100 Вт использовалась в данных экспериментах. Кроме того, с помощью специально подобранного направления подсветки можно добиться отблеска каждого витка пружины с тем, чтобы следить за ее сжатием в каждом сечении.

Для определения жесткости пружины k сначала проводились статические измерения зависимости длины подвешенной пружины L от массы грузика m . Построенная зависимость $L(m)$ в соответствии с законом



Процесс разрезания нити подвеса пружины; подсветка обеспечивает отблеск каждого витка пружины



Измеренная статическая зависимость $L(m)$ длины висящей пружины от массы груза

Гука получилась линейной. Котангенс угла наклона прямой на графике дал значение $k \approx 0,82$ Н/м.

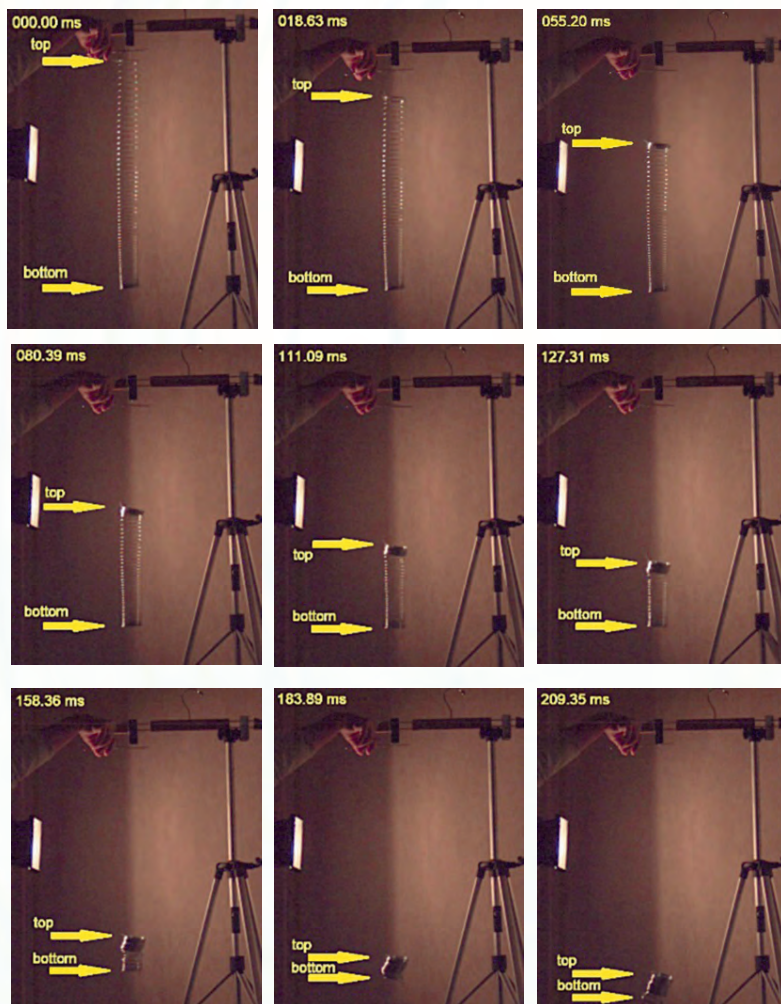
Было проведено несколько экспериментов с падающей пружиной без грузиков со скоростной видеозаписью. Отдельные кадры одной из видеозаписей демонстрируют процесс падения пружины, в котором действительно верхний конец пружины движется вниз, формируя ударную волну сжатия, а часть пружины перед волной сжатия остается при этом неподвижной. Стадия левитации нижнего конца пружины длится до тех пор, пока ударная волна сжатия не достигнет нижнего конца пружины. После этого должно происходить свободное падение пружины, как целого.

Однако ситуация после выхода ударной волны к нижнему концу пружины оказывается несколько хитрее: происходит, что называется, «отстреливание» нижнего конца пружины от ударной волны. После этого пружина начинает расширяться книзу. Любопытно, что этот процесс аналогичен известному из взрывных экспериментов явлению выброса вещества, возникающего при выходе ударной волны на его край.

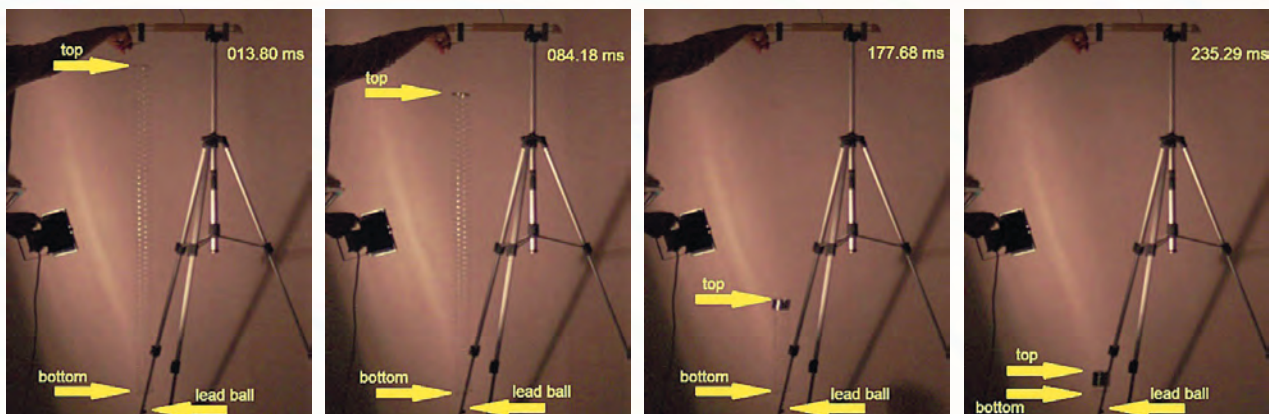
После обработки всех кадров видеозаписи проводилась оцифровка динамики движения верхнего и нижнего концов пружины, а также фронта ударной волны сжатия. Результаты

оцифровки представлены на графике движения пружины. Видно, что на большей части времени движения скорость верхнего конца пружины и скорость ударной волны постоянны. Из этих графиков можно определить время левитации τ , скорости движения верхнего конца и фронта ударной волны, а также другие характеристики движения. В частности, из графиков, представленных на рисунке, получено $\tau \approx 176$ мс.

Возникает вопрос: можно ли увеличить время левитации? Для этого, согласно указанной выше оценке τ , следует увеличить распределенную по длине массу пружины M и/или уменьшить ее жесткость k , сохранив при этом ее длину L_0 неизменной. Иными словами, нужно заменить пружину на другую, отличающуюся от первой параметрами M и/или k . Мы предлагаем иной, менее очевидный, но более эффектный подход, при котором допускается использовать одну и



Отдельные кадры одной из видеозаписей падения пружины без грузика; стрелками помечены мгновенные положения верхнего и нижнего концов пружины



Отдельные кадры одной из видеозаписей падения пружины с грузиком $m = 50$ г; стрелками помечены мгновенные положения верхнего и нижнего концов пружины

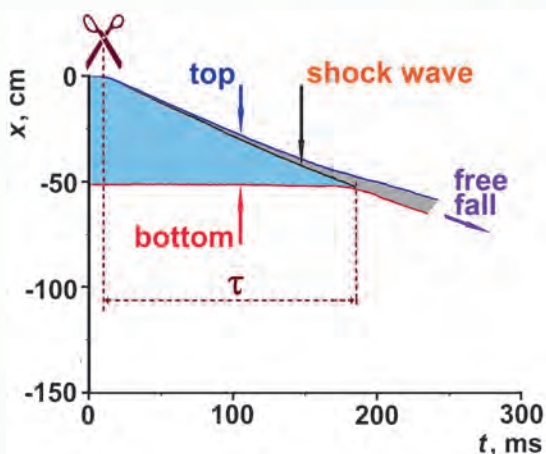
ту же пружину и иметь при этом возможность увеличения времени ее левитации τ . Для этого следует закреплять на последнем витке пружины дополнительный точечный грузик массой m . Экспериментальные исследования динамики падения пружины, снабженной дополнительным грузиком, представлены ниже.

Для динамических экспериментов исследования падения нагруженной пружины использовались грузики с массой до $m = 140$ г, часть из которых превышали по массе массу самой пружины. В таких случаях длина растянутой пружины заметно превышала 2 м.

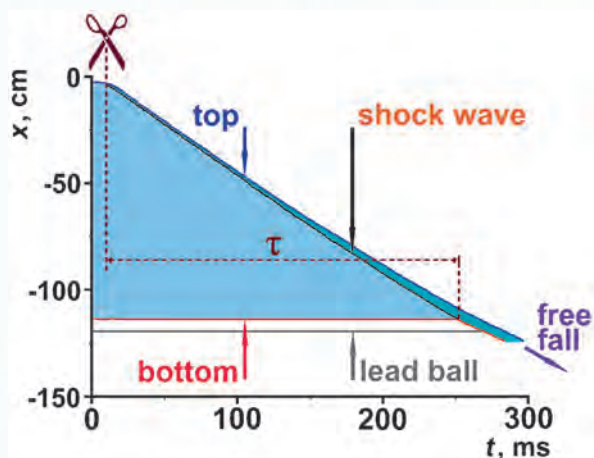
Поэтому эксперименты с небольшими грузиками в виде свинцовых шариков могли проводиться в комнатных условиях, а эксперименты с большими грузиками проводились на открытом воздухе для того, чтобы обеспечить попадания

растянутой пружины в апертуру видеокамеры во всей ее длине, для чего необходимо было проводить видеозапись с расстояния более 10 м.

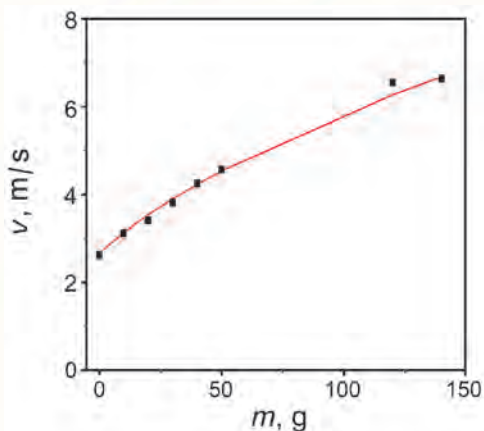
Ниже показаны отдельные кадры видеозаписи падения пружины с грузиком $m = 50$ г. Качественно динамика падения пружины аналогична падению ненагруженной пружины. Однако, обращает на себя внимание неожиданное поведение самого грузика. На стадии левитации пружины грузик неподвижен, т. е. расстояние между нижним концом пружины и шариком сохраняется. После выхода ударной волны к нижнему концу пружины левитация пружины заканчивается, и пружина переходит в свободное падение с отстреливанием нижнего конца, но даже и в это время шарик остается по-прежнему неподвижным. В результате чего шарик попадает в «отстреленную» полость падающей пружины



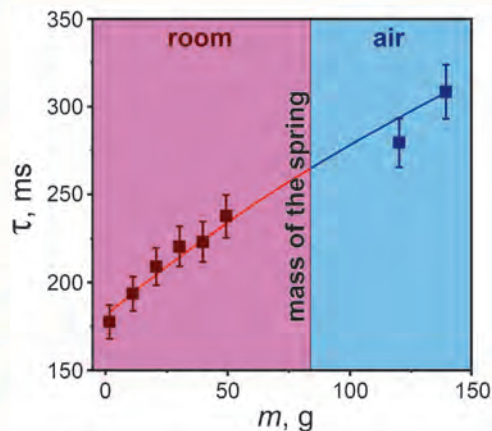
Графики движения верхнего и нижнего концов пружины и фронта ударной волны; время левитации τ отсчитывалось с момента разрезания нити подвеса (показано символом ножницы) до момента начала движения нижнего конца пружины



Графики движения верхнего и нижнего концов пружины, фронта ударной волны и свинцового шарика массой 50 г; время левитации τ отсчитывалось с момента разрезания нити подвеса (показано символом ножницы) до момента начала движения нижнего конца пружины



Зависимость скорости верхнего конца пружины от массы груза $v(m)$: точки – данные эксперимента, линия – аппроксимация



Зависимость времени левитации пружины от массы груза $\tau(m)$: точки – данные эксперимента, линия – аппроксимация

ны, а после этого наблюдать за ним становится невозможно.

Оцифрованное видео падения пружины с грузиком массой $m = 50$ г позволило построить графики движения обоих концов пружины, ударной волны сжатия и шарика. Графики выполнены в одном пространственно-временном масштабе, что и для пружины без грузика.

Сравнивая графики движения нагруженной и ненагруженной пружин, можно заметить следующее. Длина пружины существенно увеличилась согласно закону Гука $L \propto (M + m)$, скорость ударной волны также незначительно возросла (но не уменьшилась!), что видно по наклону графика ее движения. Возрастание скорости с ростом m происходит на меньшую относительную величину, нежели растягивание пружины, поэтому в итоге и время левитации возрастает. Простой анализ равномерного движения тела с нарастающей массой дает оценку $v \propto (M + m)^{1/2}$.

После обработки видеозаписей нескольких серий падения пружины, нагруженной разными грузиками, были построены графики зависимостей скорости верхнего конца пружины от массы груза $v(m)$ и времени левитации $\tau(m)$.

Из графиков видно, что обе зависимости $v(m)$ и $\tau(m)$ являются возрастающими, но обе они растут гораздо медленнее линейной. При этом оказалось, что произведение $v(m)\tau(m)$ выстраивается в линейную зависимость. Этот факт доказывает согласование оценок L , v , τ между собой.

Проведенные эксперименты со скоростной видеорегистрацией падения предварительно растянутой стальной мягкой спиральной пружины, снабженной дополнительным точечным грузиком, показали, что падение пружины с грузиком также, как и без грузика, имеет стадию левитации

нижней части пружины и грузика. При этом в верхней части пружины формируется ударная волна сжатия, движущаяся вниз с почти постоянной скоростью. Измерена зависимость скорости ударной волны от массы груза. Зависимость оказалась возрастающей, но этот рост медленнее, чем линейная зависимость.

Измерена также зависимость длительности стадии левитации от массы груза. Зависимость также оказалась возрастающей, но медленнее линейной. Верхней границы роста этой зависимости мы не достигли, однако следует предположить, что ее рост все же ограничен сверху, по крайней мере, пределом пластичности материала пружины.

Основной результат работы заключается в том, что дополнительный грузик увеличивает длительность стадии левитации пружины, и чем больше масса груза, тем дольше левитация. Чем больше груз – тем дольше он висит!

Обе найденные зависимости $v(m)$ и $\tau(m)$ согласованы друг с другом, а их произведение дает линейный рост. Это согласуется с законом Гука для пружины.

Представленные экспериментальные исследования динамики левитации и падения пружины познавательны и безопасны, они доступны студентам и школьникам. В этих исследованиях учащиеся приобретут навыки высокоскоростной видеорегистрации ударных волн и познакомятся с явлением выброса вещества при выходе ударной волны на его поверхность.

ДУБИНОВ Александр Евгеньевич –

заместитель директора НПЦФ

РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук

ДУБИНОВА Ирина Дмитриевна –

сотрудник СарФТИ