

**Автономная некоммерческая общеобразовательная организация "Физтех-лицей"  
(АНОО «Физтех-лицей» им. П.Л. Капицы)**

## **XX научно-практическая конференция**

### **«Старт в инновации»**

#### **Упругость и жесткость твердых тел**

Выполнили:

Лындин О.

Родин О.

Горбачев Т.

Снежкин Н.

7 Б класс

Руководитель:

Куросов В.М.

Московская область, г. Долгопрудный

2021 г.

## Содержание

|   |                                 |
|---|---------------------------------|
| Введение .....                              | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1. Основная часть .....                     | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.1. Деформация в природе, жизни и технике. | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.2. Разновидности деформаций.....          | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.3. Что такое сила упругости? .....        | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.4. Сила упругости и закон Гука. ....      | Ошибка! Закладка не определена. |
| 1.5. Сила упругости в природе.....          | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2. Исследовательская часть .....            | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.1. Пружина .....                          | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.1.1. Растяжение .....                     | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.1.2. Сжатие .....                         | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.1.3. Кручение.....                        | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.1.4. Изгиб.....                           | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.1.5. Сдвиг.....                           | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.2. Проволока из алюминия.....             | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.2.1. Растяжение .....                     | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.2.2. Сжатие .....                         | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.2.3. Кручение.....                        | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.2.4. Сдвиг.....                           | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.2.5. Изгиб.....                           | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.3. Деревянная линейка.....                | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.3.1. Растяжение .....                     | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.3.2. Сжатие .....                         | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.3.3. Кручение.....                        | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.3.4. Изгиб.....                           | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.3.5. Сдвиг.....                           | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.4. Капроновая струна.....                 | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.4.1. Растяжение .....                     | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.4.2. Кручение.....                        | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.4.3. Сжатие .....                         | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.4.4. Изгиб.....                           | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.4.5. Сдвиг.....                           | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.5. Ластик .....                           | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.5.1. Растяжение .....                     | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.5.2. Сжатие .....                         | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.5.3. Кручение.....                        | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.5.4. Изгиб.....                           | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.5.5. Сдвиг.....                           | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.6. Деревянный круглый стержень .....      | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.6.1. Растяжение .....                     | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.6.2. Сжатие .....                         | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.6.3. Изгиб.....                           | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.6.4. Кручение.....                        | Ошибка! Закладка не определена. |
| 2.6.5. Сдвиг.....                           | Ошибка! Закладка не определена. |
| 3. Анализ полученных данных.....            | Ошибка! Закладка не определена. |
| 4. Заключение .....                         | Ошибка! Закладка не определена. |
| Список литературы.....                      | Ошибка! Закладка не определена. |
| Приложения.....                             | Ошибка! Закладка не определена. |
| Приложение 1 .....                          | Ошибка! Закладка не определена. |

|                      |    |
|----------------------|----|
| Приложения 2,3 ..... | 15 |
| Приложения 4,5 ..... | 16 |
| Приложения 6,7 ..... | 17 |

## Введение

Очень часто в жизни происходят явления и процессы, которые нам настолько привычны, что мы не обращаем на них внимания и не задумываемся об их происхождении. Одним из таких процессов является проявление силы упругости. Об этом мы однажды задумались, когда сломалась любимая ручка одного из нас.

Основные результаты опытов по исследованию упругости тел Гук изложил в сочинении «Лекции о восстановительной способности или об упругости», вышедшим в 1678 году [2]. По признанию автора, результаты, приведенные им в этом труде, были получены почти за 20 лет до их публикации. Опыты, в ходе которых Гук проверял свой вывод о том, что сила упругости пропорциональна удлинению (а это, как известно, и есть закон Гука), по признанию самого Гука, такие же простые, как и сам вывод [4]. Их можно разделить на несколько групп. В опытах первой группы Гук использовал металлические пружины различной длины, которые изготавливал, наматывая стальную или латунную проволоку на тело цилиндрической формы. Концы пружин экспериментатор сворачивал в петли, за одну из которых подвешивал пружину, а ко второй привешивал грузы. Последовательно прикрепляя к пружине грузы равной массы, можно было наблюдать, как каждый раз пружина растягивается на одну и ту же длину. Вторую группу опытов Гук проводил со спиральными часовыми пружинами [6]. Спиральная пружина встраивалась в легкий латунный обод. Внешний конец пружины крепился к внутренней поверхности обода, а внутренний конец – к неподвижной оси, укрепленной в стальной рамке. На внешнюю поверхность обода ученый наматывал тонкую нить, к свисающему концу которой крепилась легкая чашка для перегрузов. Кроме того, на обод крепилась легкая стрелка, по которой можно было судить об угле поворота обода. Гук последовательно помещал в чашку несколько достаточно легких перегрузов (использовались грузы массой в одну драхму каждый, 1 драхма  $\approx$  1,772 г) и каждый раз фиксировал угол, на который поворачивался обод. В результате стало очевидно, что при добавлении грузов равной массы обод поворачивался (а значит, спиральная пружина закручивалась) на одинаковые углы. В третьей группе опытов Гук использовал достаточно длинные металлические струны (длина проволоки в разных опытах составляла от 20 до 40 футов, 1 фут = 30,48 см). Струна растягивалась при последовательном подвешивании к ней грузов равной массы, аналогично тому, как это делалось в первой группе опытов с пружинами. Результаты получились такими же: при добавлении грузов одинаковой массы удлинения струны были одинаковыми. Однако с позиций сегодняшнего дня мы должны указать границы применимости закона Гука: этот закон действует при условии, что деформации малы по сравнению с размерами тела.

**Цель нашей работы:** исследовать все возможные виды проявлений силы упругости, выяснить причины, источники упругости, попробовать найти пределы упругости, найти полезные применения, а также вредные и опасные последствия проявлений упругости.

### Задачи:

- изучить имеющуюся литературу по этому вопросу;
- провести эксперименты с разными предметами на исследование деформации и упругости;
- проанализировать данные экспериментов, и обобщить результаты.

### Методы исследования:

- изучение литературы;
- проведение экспериментов;
- анализ полученных данных.

Работа рассчитана на 3 этапа. Первый этап заключается в изучении литературы для понимания теоретической основы исследуемых явлений и процессов. На втором этапе на основе полученных знаний строим эксперименты. На третьем этапе идёт анализ, сравнение и обобщение полученных результатов.

## 1. Основная часть

Изучение учебной и научно-популярной литературы по нашей теме дало нам не только понимание теории и законов упругости, но и множество примеров проявления и применения этих явлений.

### 1.1. Деформация в природе, жизни и технике.

Из опытов известно, что твердые тела под действием приложенных сил могут изменять свою форму и размеры, то есть деформироваться. Легко сжать резиновую игрушку, ластик или изогнуть линейку. Если нагрузку устранить, то эти тела восстанавливают свою форму. Свойство тел восстанавливать свое первоначальное положение после удаления нагрузки называют упругостью. Сила, противодействующая внешней нагрузке и восстанавливающая форму тела, называется силой упругости.

Упругостью характеризуются твердые тела, жидкости и газы. Человек давно использует упругость в своих целях: лук для охоты и для спорта, длинные пролеты мостов, автомобильные шины, различные пружины, надувные матрасы, подошвы для обуви и многое, многое другое.

С точки зрения экологических проблем важно вот что: знание физики позволяет изменять свойства материалов, меняя их упругость и прочность так, как нам это удобно и нужно.

Упругость металла, а вместе с тем и прочность, можно изменить, вводя в него примеси других элементов. Мы уже знаем, как из железа делают сталь. Так же мягкая медь превращается в твердую латунь и упругую бронзу, если в нее добавить цинк, олово, алюминий и другие металлы.

Идея комбинирования, сочетания используется и в строительстве при использовании армированных материалов, например, железобетона. При изготовлении лыж склеивание слоев из различных пород дерева улучшает их упругость. Такой же эффект достигается при армировании пластмасс и металлов различными волокнами. Такие материалы называются композитными.

За счет повышения прочности и упругости деталей возможно увеличение нагрузки, продление срока их службы. На их изготовление тратится меньше материалов и энергии. А это значит, что уменьшается потребность в руде, нефти. Улучшение свойств стали и других материалов позволило строить мощные локомотивы, повысить грузоподъемность самолетов.

### 1.2. Разновидности деформаций.

Давайте вспомним, что такое деформация?

Деформацией называют изменение объема или формы тела под действием внешних сил.

А причиной возникновения деформации является то, что различные части тела движутся не одинаково, а по-разному. При одинаковом движении тело постоянно имело бы свою первоначальную форму и размеры, то есть оно бы не деформировалось.

К тому же, деформация делится на два типа. В этом случае деформация может быть упругой или пластической. Если, к примеру, взять и растянуть пружину, а потом ее отпустить, то после такой деформации пружина восстановит свои прежние размеры и форму. Это и будет примером упругой деформации. То есть, если мы видим, что после прекращения действия на тело деформация полностью исчезает, то такая деформация является упругой.

### 1.3. Что такое сила упругости?

Силой упругости называют такую силу, которая возникает через деформации тела и направленная в сторону, противоположную перемещениям частиц тела при деформации.

Для более наглядного примера, чтобы лучше понять, что такое сила упругости, возьмем яркий пример из повседневной жизни.

Представьте, что перед вами обычная бельевая веревка, на которую вы повесили мокрое белье. Если на хорошо натянутую горизонтально веревку мы повесим мокрое белье, то увидим, как под весом вещей эта веревка начинает растягиваться и провисать. Как только белье будет снято, то веревка займет первоначальное положение

#### 1.4. Сила упругости и закон Гука.

От величины деформации, которой подвергается какое-либо тело, зависит и величина силы упругости. Следовательно, деформация и сила упругости находятся в тесной взаимосвязи. Если подверглась изменениям одна величина, то значит, появились изменения и в другой.

Чтобы найти соотношение между силой упругости и деформацией упругого тела, нужно воспользоваться формулой, которая была открыта известным английским ученым Робертом Гуком. Ученый установил простую связь между увеличением длины тела и силой упругости, которая была вызвана этим удлинением.

$$F=kx$$

#### 1.5. Сила упругости в природе.

Сила упругости довольно значимую роль играет и в природе. Ведь только благодаря этой силе, ткани растений, животных и человека способны выдерживать огромные нагрузки и при этом не ломаться, и не разрушиться. Все, находящиеся на Земле тела, способны выдерживать силу атмосферного давления только благодаря силе упругости. Обитатели глубоких водоемов способны выдерживать еще большую нагрузку. Поэтому можно прийти к закономерному выводу, что только благодаря силе упругости все живые организмы в природе имеют возможность не только переносить механические нагрузки, но и сохранить свою форму в целостности. Сидящие на ветках деревьев стайки птиц, висящие на кустах грозди винограда, огромные шапки снега на еловых лапах - это наглядная демонстрация сил упругости в природе.

Знаменитый закон Гука применяется практически во всех сферах нашей жизни. Без него никак нельзя обойтись ни в повседневном быту, ни в архитектуре. Этот закон используют при строительстве домов и автомобилей. Его даже применяют в торговле. Но, наверное, не каждый из вас мог себе представить, что сила упругости может быть применена и на арене цирка. Еще в позапрошлом веке в знаменитом цирке Франкони был продемонстрирован номер под названием «Человек-бомба». Для этого на арене цирка установили огромных размеров пушку, из которой произвели выстрел человеком. Зрители были шокированы этим номером, так как не подозревали, что выстрел был произведен не пороховыми газами, а с помощью пружины. В стволе пушки поместили мощную упругую пружину и после команды «пли!» пружина из дула выбрасывала на арену артистку. Ну, а грохот, дым и огонь только усиливали эффект этого номера и наводили ужас на зрителей.

## 2. Исследовательская часть

Здесь мы провели сравнение и анализ различных видов деформации для нескольких предметов. Хотя некоторые результаты были предсказуемы и очевидны, все опыты проводились полноценно. Там, где была возможность произвести замеры силы воздействия и изменения размеров предмета, мы их собрали в таблицы и диаграммы.

### 2.1. Растяжение

#### 2.1.1. Пружина

Для опыта с растяжением взяли большую пружину. Закрепили один конец пружины в тисках, второй конец тянули на себя. Пружина растягивалась, при этом возникало противодействие, и оно становилось все больше с увеличением растягивания. При растягивании примерно на 30 см сила противодействия пружины увеличивается настолько, что человек больше не в состоянии дальше тянуть, да и даже просто удерживать пружину растянутой очень тяжело. Конечно же сразу вспоминаем Гука и его закон  $F=kx$  – сила растет с увеличением деформации. Т.е., чем дальше оттягивали второй конец пружины – тем больше  $x$ , и тем больше  $F$ .

Отпускали пружину постепенно, чтобы не сорвалась и не улетела, в ней ведь очень много энергии. Увидели, что она полностью «пришла в себя» - размер восстановился до исходного, т.е. деформация упругая.

Экспериментальные данные и диаграмма представлены в таблице 1 и на рисунке 1 (приложение 1). На графике четко показана линейная зависимость силы от величины деформации.

#### 2.1.2. Проволока из алюминия

Закрепили один конец проволоки в тиски, второй взяли в пассатижи и потянули. Ничего не произошло. Нарастили усилие, и проволока начала растягиваться в длину. Тянули сильнее – проволока тянулась, чем дальше тянули, тем длиннее становилась проволока. И еще мы заметили, что она становилась тоньше. Отпустили и – больше ничего не произошло - проволока осталась растянутой, т.е. мы что-то нарушили, «сломали» проволоку. Получается, что в проволоке вообще не было упругости, при слабом воздействии она не растягивалась, т.е. не деформировалась, а при сильном воздействии – произошло необратимое изменение формы и размера.

#### 2.1.3. Деревянная линейка

Закрепили один конец линейки к краю стола струбциной. Второй конец взяли пассатижами и потянули к себе со всей силой. Линейка не поддавалась нашим усилиями, а в какой-то момент даже потянула за собой стол, на который была прикреплена, но так и не растянулась.

#### 2.1.4. Капроновая струна

Взяли капроновую струну от классической гитары, один конец закрепили в тисках вместе с линейкой. Посередине струны наклеили яркую полоску из липкой ленты. Потянули за свободный конец струны и увидели, что она очень неплохо растягивается. Не настолько хорошо, как пружина, но гораздо сильнее, чем деревянная линейка и алюминиевая проволока. И даже полностью восстанавливается после отпускания.

Экспериментальные данные и диаграмма представлены в таблице 2 и на рисунке 2 (приложение 1)

#### 2.1.5. Ластик

Взяли обычный ластик двумя пассатижами в обе руки и начали тянуть. Мы увидели, что длина ластика увеличивается, а толщина немного уменьшается. Отпустили, и ластик вернулся в свои исходные размеры и форму

### 2.1.6. Деревянный круглый стержень

Закрепили один конец стержня в тисках, второй взяли в пассатижи и попробовали растянуть. Ни при каких усилиях стержень не растянулся.

## 2.2. Сжатие-растяжение.

### 2.2.1. Пружина

Поскольку большая пружина изготовлена изначально полностью сжатой и ее сжимать уже некуда и также учитывая усталость после первого опыта, для второго опыта взяли пружину поменьше, от школьной авторучки.

Сжать ее можно даже двумя пальцами руки, что мы и сделали несколько раз подряд. Пружинка сжималась полностью до соприкосновения всех витков. Если сжимать медленно, то можно заметить небольшое увеличение силы сопротивления сжатию. То, что сама сила и ее увеличение малы даже при полном сжатии, объясняется малым значением коэффициента жесткости  $k$ . Т.е., если пружинка слабенькая, то никакая деформация не придаст ей большой силы. Именно это мы и поняли буквально на пальцах.

Плавно отпускали пружину, чтобы не выстрелила, хоть она и слабенькая, но в то же время и легкая, энергии хватит, чтобы улететь в другой угол комнаты. И снова – никаких чудес – пружинка полностью «приходила в себя». Это и не удивительно, ведь она предназначена для постоянного срабатывания. Можно даже посчитать: на каждом уроке включить-выключить – 2 срабатывания, в день 5-6 уроков, в неделе 5-6 учебных дней, в месяце 4-5 недель, в году 8 учебных месяцев. Перемножаем  $2*5*5*4,5*8=1800$ . Ого!

ОГО-ГО!!! И это еще если ей просто не играть никогда. Можно сказать – вечная пружина.

Экспериментальные данные и диаграмма представлены в таблице 3 и на рисунке 3 (приложение 1)

### 2.2.2. Проволока из алюминия

Для сжатия взяли кусок проволоки поменьше, как можно меньше, иначе она просто гнется. Остановились на куске длиной 1 см. Пальцами рук провести такой эксперимент не получится, нужно было что-то твердое и рычаг. Мы взяли пассатижи, зажали в них кусочек проволоки. Сдавили изо всех сил, и кусок поддался, он сжался в длину. Сдавили сильнее – кусочек становился все короче и одновременно толще. После того как отпустили пассатижи – кусок так и остался в сжатом виде, т.е. в данном опыте мы имеем пластическую деформацию.

### 2.2.3. Деревянная линейка

Закрепили один конец линейки к краю стола струбциной. Вторым концом взяли пассатижами и начали толкать свободный конец линейки вперед к столу. Стол задвигался обратно, но с линейкой никаких видимых изменений не происходило. Следовательно, деревянная линейка не сжимается.

### 2.2.4. Капроновая струна

Чтобы испытать струну на сжатие, нужно отрезать очень маленький кусочек, т.к. струна очень гибкая, и вместо сжатия просто легко сгибается. Только при длине кусочка чуть большей, чем толщина, можно слегка сдавить его пассатижами по длине. При отпуске кусочек возвращается в исходное состояние. Однако, появляются сомнения, можно ли такой кусочек называть струной, и тем не менее, в данном опыте мы провели упругую деформацию.

### 2.2.5. Ластик

Взяли ластик в пассатижи поперек длины и сжали. Было видно, как он сжимается, отпустили пассатижи и ластик восстановился. Попробовали сделать тоже самое пальцами и успешно сжали наш ластик. Отпустили, ластик восстановился. Вывод: ластик является очень упругим предметом.

### 2.2.6. Деревянный круглый стержень

Попробовали сдавить стержень пассатижами. Если вдоль длины этого сделать не получилось, то поперек стержень можно сжать при помощи пассатижей, однако, после снятия воздействия форма стержня не восстановилась. То есть произошло некоторое разрушение структуры внутри. Значит произошла пластическая деформация.

## 2.3. Кручение

### 2.3.1. Пружина

Для опыта с кручением снова взяли большую пружину, она уже отдохнула после наших «издевательств».

Закрепили конец пружины в тисках, ко второму концу прикрепили карандаш и начали карандашом поворачивать вокруг вертикальной оси. Пружина достаточно легко поворачивалась, также показывая увеличение силы сопротивления с ростом деформации. При прекращении воздействия, пружина легко возвращалась в исходное состояние. Пружина снова показала упругую деформацию.

Экспериментальные данные и диаграмма представлены в таблице 4 и на рисунке 4 (приложение 1). На графике видна линейная зависимость силы от величины деформации.

### 2.3.2. Проволока из алюминия

Зажали один конец проволоки в тиски, второй взяли пассатижами и начали вращать. На удивление получилось очень легко, проволока поддалась почти без сопротивления, она повернулась в несколько витков, и после отпускания пассатижей не вернулась в исходное состояние, а осталась в деформированном. В данном опыте был превзойден предел упругости, и деформация стала пластической. Если бы деформация начальная была маленькой, в пределах небольшого закручивания, то проволока вернулась бы в исходное положение. С другой стороны, если продолжать крутить проволоку пассатижами, в какой-то точке происходит утончение, в этом месте скручивание сосредотачивается больше и через 5-10 оборотов здесь происходит разрыв нашей проволоки. Очень интересные результаты: при малом воздействии деформация упругая, при увеличении воздействия становится пластической, и при дальнейшем увеличении воздействия переходит предел прочности и материал разрушается.

### 2.3.3. Деревянная линейка

Все также брали пассатижами за свободный конец линейки и начинали поворачивать вокруг продольной оси. Линейка сопротивлялась, но поддавалась кручению закручивалась. Поворачивали аккуратно, не больше чем на  $45^{\circ}$ , чтобы линейка случайно не треснула. Отпустили пассатижи, и линейка вернулась в начальное положение. Повторили опыт, только крутили в противоположную сторону, также на  $45^{\circ}$  градусов, отпустили, линейка так же вернулась в свое начальное состояние и положение. Успешная упругая деформация кручения.

Экспериментальные данные и диаграмма представлены в таблице 5 и на рисунке 5 (приложение 1)

### 2.3.4. Капроновая струна

Теперь попробуем подвергнуть струну деформации кручения. Кручение сначала дается очень легко, струна практически не сопротивляется, внешне кручение совершенно

не заметно, т.к. струна круглая в сечении, а при отпускании легко возвращается в исходное состояние. Попробуем повторить опыт на коротком кусочке струны длиной 15 мм. Теперь струна проявляет сопротивление сразу, и также возвращается в исходное состояние при отпускании воздействия. Таким образом деформация кручения струны является упругой.

#### 2.3.5. Ластик

Взяли ластик руками за края и начали крутить в разных направлениях. Получилась деформация кручения. Отпустили, ластик восстановил форму. Повторили тоже самое в обратную сторону. Результат абсолютно идентичный. Ластик оказался не только очень упругим, но и очень крепким, он выдержал очень сильные деформации и не разрушился.

#### 2.3.6. Деревянный круглый стержень

Для опыта с кручением нам понадобился второй такой же, только целый стержень. Зажали один конец в тиски, а свободный взяли в пассатижи и начали крутить. При малых нагрузках стержень поддавался кручению, а при отпускании возвращался в исходное состояние. При увеличении воздействия начинались мелкие разрывы волокон стержня, которые увеличивались и превращались в расслоение и разрушение всего стержня. Оказывается, что тонкий круглый деревянный стержень выдерживает небольшие деформации кручения, оставаясь при этом упругим и целым. При усилении воздействия стержень постепенно разрушается, т.е. деформация постепенно переходит в пластическую.

### 2.4. Изгиб

#### 2.4.1. Пружина

Чтобы провести опыт с изгибом необходимо положить под края пружины любые одинаковые опоры высотой, достаточной для наблюдения, для большой пружины вполне подошла 3-5 см. Надавили на пружину сверху посередине до соприкосновения ее со столом. Она слегка сопротивлялась и при отпускании возвращалась в исходное состояние.

Экспериментальные данные и диаграмма представлены в таблице 6 и на рисунке 6 (приложение 1). Из графика четко видно, что соблюдается линейная зависимость силы от величины деформации.

#### 2.4.2. Проволока из алюминия

Подложили под проволоку те же самые две опоры, что были под пружиной, и слегка, очень мало, нажали пальцем и отпустили. Проволока под пальцем прогнулась немного и вернулась в исходное состояние после отпускания. Значит, хоть немного упругости, но есть в проволоке.

Попробовали прижать сильнее. Вот теперь свойства алюминиевой проволоки снова проявились так же, как и в предыдущих опытах. Она согнулась и потеряла упругость, осталась согнутой после прекращения воздействия. Здесь мы видим очень маленькие пределы упругой деформации, после увеличения величины деформации свыше этих пределов наступает пластическая деформация, т.е. разрушение структуры материала.

#### 2.4.3. Деревянная линейка

Подложили под края линейки две одинаковые опоры высотой 2-3 см и нажали пальцем посередине. Линейка легко прогнулась до самого стола. Убрали палец, и линейка восстановилась в исходное положение. Повторили пару раз, перевернули линейку другой стороной – каждый раз она под воздействием давления прогибалась и потом восстанавливалась.

Экспериментальные данные и диаграмма представлены в таблице 6 и на рисунке 6 (приложение 1). График показывает линейную зависимость между величиной деформации и возникающей силой.

#### 2.4.4. Ластик

Подложили под края нашего подопытного ластика два других ластика и нажали пальцем посередине. Относительно легко прогнули ластик до самого стола. Убрали палец и ластик тут же восстановился. Очень упругая деформация.

#### 2.4.5. Деревянный круглый стержень

Испытание на изгиб провели просто собственными руками. Тонкий круглый деревянный стержень относительно легко сгибается руками в небольшом диапазоне и после отпуска восстанавливается. Попробовали увеличить диапазон изгиба, постепенно увеличивая силу воздействия. Сопротивление стержня также возросло пропорционально углу изгиба. Внезапно стержень затрещал и сломался, потеряв всякое сопротивление.

#### 2.5. Сдвиг

Сдвиг – немного особый вид деформации, не все предметы могут быть подвержены деформации сдвига, и не все могут ее выдержать. Проверили.

##### 2.5.1. Пружина

Деформация сдвига к пружине не применима, т.к. в ней сдвигаются витки, а не слои молекул предмета.

##### 2.5.2. Проволока из алюминия

Такой маленький предмет, как кусочек проволоки, очень нелегко подвергнуть деформации сдвига, даже почти невозможно, но кто ищет, тот всегда найдет, и способ нашелся. В некоторых пассатижах есть специальный боковой модуль для откусывания проволоки. Вот этим модулем мы и сделали опыт по деформации сдвига с проволокой. Если сжимать сильно и быстро, пассатижи просто перекусывают проволоку, но, если сжимать медленно и постепенно, то можно наблюдать, как одна половина проволоки смещается относительно другой, так же, как происходило с большой пружиной. Только вот после отпуска пассатижей деформация не ушла, и проволока осталась в сдвинутом состоянии.

##### 2.5.3. Деревянная линейка

Попробовали проверить, как будет происходить деформация сдвига. Для этого снова закрепили линейку струбциной к краю стола и с помощью твердого инструмента надавили на свободную часть линейки максимально близко к краю стола. Линейка слегка изогнулась, но никакого сдвига не произошло. При сильном давлении линейка слегка начала трещать, обещая сломаться, если мы ее не отпустим.

##### 2.5.4. Капроновая струна

Попробуем провести опыт на сдвиг, для этого возьмем пассатижи и боковым модулем постепенно будем сдавливать струну. При маленьком давлении части струны сдвигаются поперек направления струны, но при небольшом увеличении силы воздействия очень быстро происходит поперечное разрушение как раз на границе направлений сдвига.

##### 2.5.5. Ластик

Крепко прижали половину ластика к краю стола одной рукой. Пальцем второй руки надавили на свободную половину ластика максимально близко к краю стола. При небольшом воздействии в самом начале был виден сдвиг свободной половины. Увеличение нагрузки привело к тому, что сдвиг перешел в изгиб в этом месте.

#### 2.5.6. Деревянный круглый стержень

Пришлось брать следующий целый стержень. Поместили его в боковой модуль пассатижей и начали сдавливать. Наблюдали небольшой сдвиг, но он необратимый. При продолжении увеличения воздействия происходит срезание и разрушение стержня на границе направлений сдвига.

### 3. Анализ полученных данных

Первый вывод, следующий из проведенных опытов, заключается в том, что упругость предмета зависит от многих факторов, а именно: материала, из которого изготовлен предмет, формы предмета и размеров, точнее соотношений размеров в разных измерениях.

Второй вывод: в некоторых предметах упругость изменяется при увеличении силы воздействия. Часть экспериментальных образцов была разрушена. Например, тонкий деревянный стержень (кулинарная шпажка) не выдержал даже среднего изгиба, а также кручения. Алюминиевая проволока растянулась и осталась в растянутом состоянии.

Третий вывод, которого мы с нетерпением ждали, и ради которого проводились все эти эксперименты: сила упругости предмета прямо пропорциональна величине деформации при соблюдении разумных пределов деформации. Обратная формулировка данного закона: величина деформации предмета прямо пропорциональна приложенной силе при соблюдении разумных пределов силы. Если выйти за указанные пределы, происходит необратимая деформация – разрушение исходного состояния предмета.

## Заключение

Мы изучили теоретические основы явлений упругости, которые первоначально раскрыл в середине XVII века Роберт Гук – английский естествоиспытатель и изобретатель, член Лондонского королевского общества.

Проанализировав полученные результаты опытов, мы увидели, что от материала, из которого изготовлено тело, существенно зависит величина его деформации.

К числу чрезвычайно важных свойств материала относятся упругость и пластичность. Что это за свойства материала и какую роль играют они в технике? Обратились снова к опыту. Изогнули слегка деревянную линейку и отпустили её. Мы увидели, что она распрямилась и приняла прежнюю форму. Значит, под действием силы линейка деформировалась, а по прекращении действия силы деформация линейки исчезла полностью.

Деформации, исчезающие в теле после прекращения действия сил, называют упругими деформациями.

Свойство же материала, состоящее в том, что тела, изготовленные из него, под действием сил деформируются, а при исчезновении сил восстанавливают свою форму и объём, называется упругостью.

Повторив опыт с деревянной линейкой, но на этот раз согнув её сильнее, мы увидели, что линейка разогнулась, но окончательно не выпрямилась. Деформация в ней полностью не исчезла. Деформация, остающаяся в теле после прекращения действия сил, называется остаточной деформацией.

Остаточная деформация характеризует свойство материала, называемое пластичностью.

Упругость и пластичность присущи всем твердым телам.

Если нагружать стальную пружину, то можно обнаружить, что при слабых растяжениях она полностью восстанавливает размер и форму; если же её растянуть сильно, то в ней обнаруживаются остаточные деформации. Сильно сжатый резиновый цилиндр, например, не возвращается к прежним размерам и сохраняет бочкообразную форму.

С другой стороны, если линейку, сделанную из свинца, слегка согнуть и отпустить, то она выпрямляется. Слегка растянутая свинцовая спираль пружинит. В этих случаях свинец проявляет упругие свойства.

Поэтому разделение материалов на упругие и пластичные условно. Однако на практике такое разделение проводится.

В итоге своего сочинения Гук делает вывод о том, что прямая пропорциональность силы упругости и растяжения является универсальным законом [1]. Исследования проводились, в первую очередь, для военных целей: «При помощи этого принципа легко можно будет подсчитать различные силы луков, будут ли они сделаны из дерева, стали, рога, из сухожилий или шнуров, а также катапульта или баллист». В качестве гражданского применения закона предлагалось использовать закономерность при создании пружинных механизмов: «Из этих же принципов будет легко вычислять силы пружины для механизма часов и соответственно приспособления механизма к пружине для того, чтобы он обеспечивал движение часов всегда с одинаковой силой». Действительно, кроме многочисленных приборов, использующих упругие силы, Гуку принадлежит авторство анкерного часового механизма, до сих пор являющегося основой механических часов [5]. А из приборов, задуманных Гуком, интересны «механические мускулы», с помощью которых человек должен был полететь, – механизм, в котором газ, расширяющийся при нагревании и сужающийся при охлаждении, передвигает крылья [3].

#### Список литературы

1. Арнольд В. И. Гюйгенс и Барроу, Ньютон и Гук. М., Наука, 1989 г., 96 с.
2. Боголюбов А. Н. Гук Роберт // Математики. Механики. Биографический справочник. — Киев: Наукова думка, 1983. — 639 с.
3. Боголюбов А. Н. Роберт Гук (1635—1703) / Отв. ред. чл.-корр. АН УССР С. Н. Кожевников; Академия наук СССР. — М.: Наука, 1984. — 240 с. — (Научно-биографическая серия).
4. Голин Г. М., Филонович С. Р. Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в.): Справ. пособие. — М.: Высш. шк., 1989. — 576 с.: ил. ISBN 5-06-000058-3
5. Родригес, Энрике Грасиан. В поисках формы. Гук. Закон Гука // Наука. Величайшие теории. — М.: Де Агостини, 2015. — Вып. 40. — ISSN 2409-0069.
6. Филонович С. Р. Роберт Гук. Квант, 1985, № 7.

## Приложения

### Приложение 1

Таблица 1. Зависимость удлинения пружины от силы

| Вес, г | Сила, Н | Удлинение, мм | k, Н/м |
|--------|---------|---------------|--------|
| 100    | 0,98    | 13            | 75,44  |
| 200    | 1,96    | 26            | 75,44  |
| 300    | 2,94    | 39            | 75,44  |
| 400    | 3,92    | 52            | 75,44  |
| 500    | 4,90    | 66            | 74,29  |
| 600    | 5,88    | 79            | 74,48  |

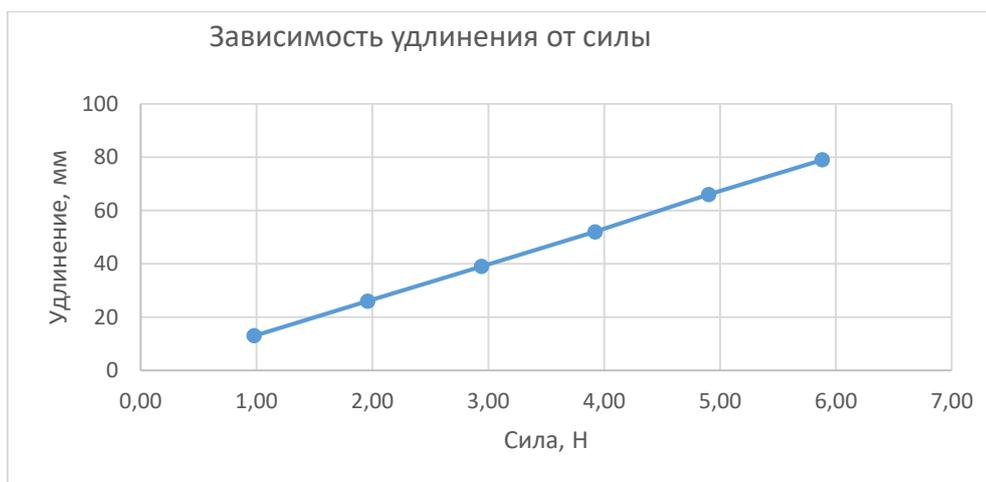


Рис.1. Зависимость удлинения пружины от силы

Таблица 2. Зависимость удлинения капроновой струны от силы

| Вес, г | Сила, Н | Удлинение, мм | k, Н/м |
|--------|---------|---------------|--------|
| 200    | 1,96    | 3             | 653,78 |
| 400    | 3,92    | 6             | 653,78 |
| 600    | 5,88    | 9             | 653,78 |
| 800    | 7,85    | 12            | 653,78 |
| 1000   | 9,81    | 15            | 653,78 |
| 1200   | 11,77   | 18            | 653,78 |

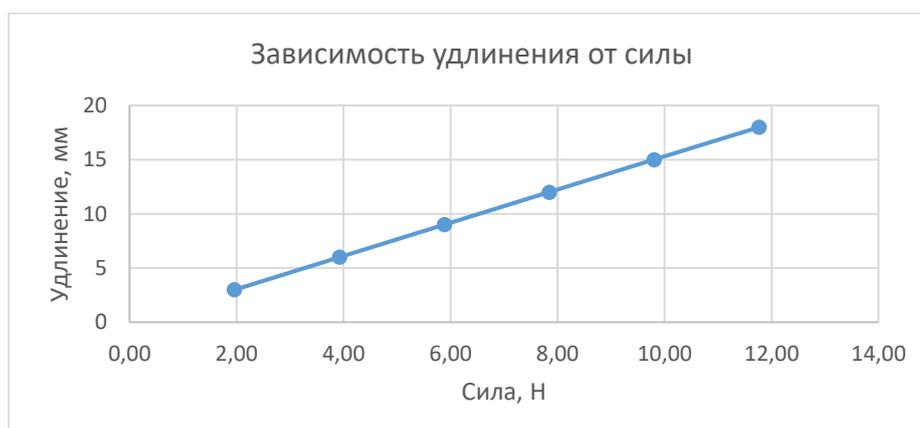


Рис.2. Зависимость удлинения капроновой струны от силы

Таблица 3. Зависимость укорачивания пружины от силы

| Вес, г | Сила, Н | Укорачивание, мм | k, Н/м |
|--------|---------|------------------|--------|
| 5      | 0,05    | 3                | 16,34  |
| 10     | 0,10    | 6                | 16,34  |
| 15     | 0,15    | 9                | 16,34  |

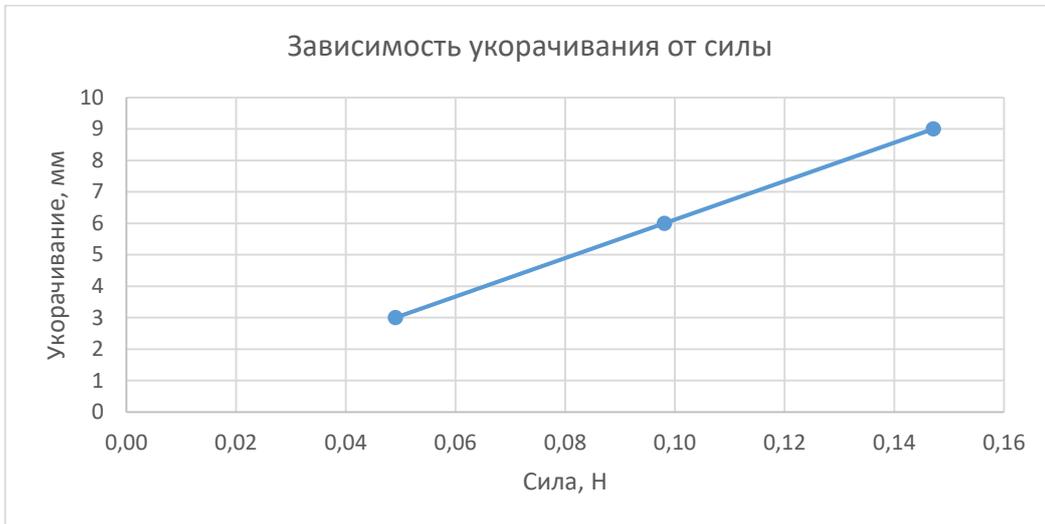


Рис.3. Зависимость укорачивания пружины от силы

Таблица 4. Зависимость угла скручивания пружины от силы

| Вес, г | Сила, Н | Угол, ° | k, Н/м |
|--------|---------|---------|--------|
| 5      | 0,05    | 12      | 4,09   |
| 10     | 0,10    | 23      | 4,26   |
| 15     | 0,15    | 35      | 4,20   |
| 20     | 0,20    | 46      | 4,26   |
| 25     | 0,25    | 58      | 4,23   |

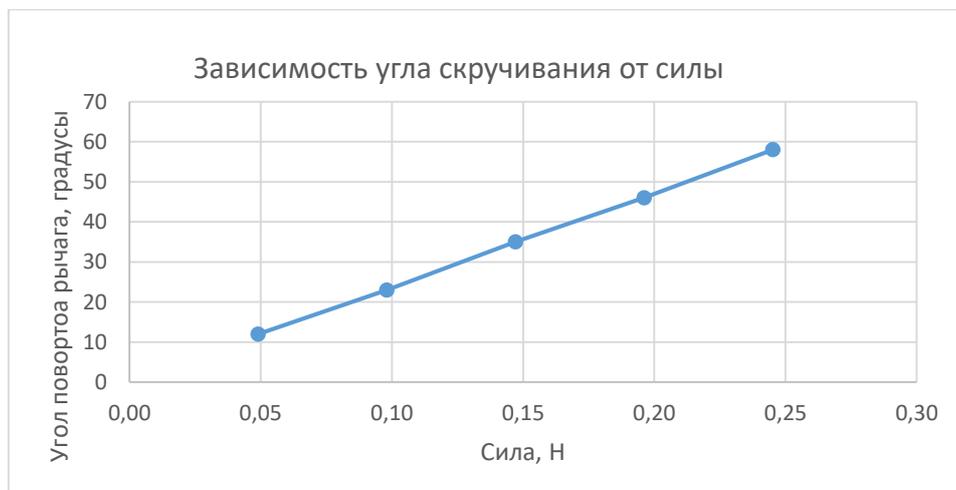


Рис.4. Зависимость угла скручивания пружины от силы

Таблица 5. Зависимость угла скручивания деревянной линейки от силы

| Вес, г | Сила, Н | Угол, ° | k, Н/м |
|--------|---------|---------|--------|
| 100    | 0,98    | 9       | 108,96 |
| 200    | 1,96    | 18      | 108,96 |
| 300    | 2,94    | 26      | 113,15 |
| 400    | 3,92    | 35      | 112,08 |
| 500    | 4,90    | 43      | 114,03 |

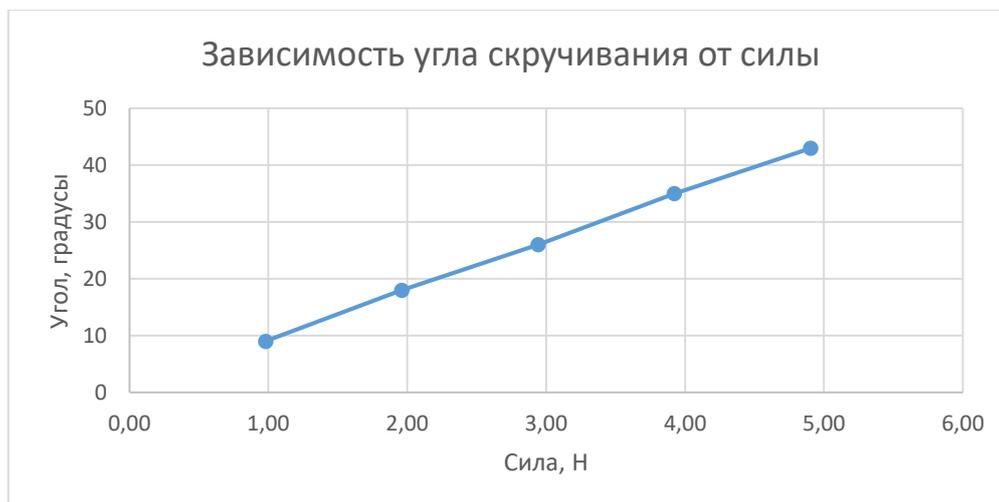


Рис.5. Зависимость угла скручивания деревянной линейки от силы

Таблица 6. Зависимость прогиба пружины от силы

| Вес, г | Сила, Н | Прогиб, мм | k, Н/м |
|--------|---------|------------|--------|
| 10     | 0,10    | 2          | 49,03  |
| 20     | 0,20    | 4          | 49,03  |
| 30     | 0,29    | 6          | 49,03  |
| 40     | 0,39    | 8          | 49,03  |
| 50     | 0,49    | 10         | 49,03  |
| 60     | 0,59    | 12         | 49,03  |

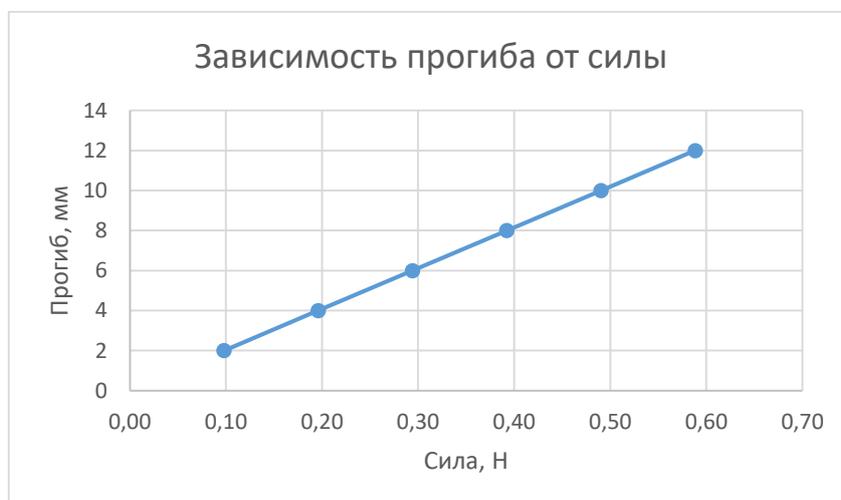


Рис.6. Зависимость прогиба пружины от силы

Таблица 7. Зависимость изгиба деревянной линейки от силы

| Вес, г | Сила, Н | Прогиб, мм | k, Н/м |
|--------|---------|------------|--------|
| 50     | 0,49    | 3          | 163,44 |
| 100    | 0,98    | 6          | 163,44 |
| 150    | 1,47    | 9          | 163,44 |
| 200    | 1,96    | 12         | 163,44 |
| 250    | 2,45    | 15         | 163,44 |
| 300    | 2,94    | 18         | 163,44 |

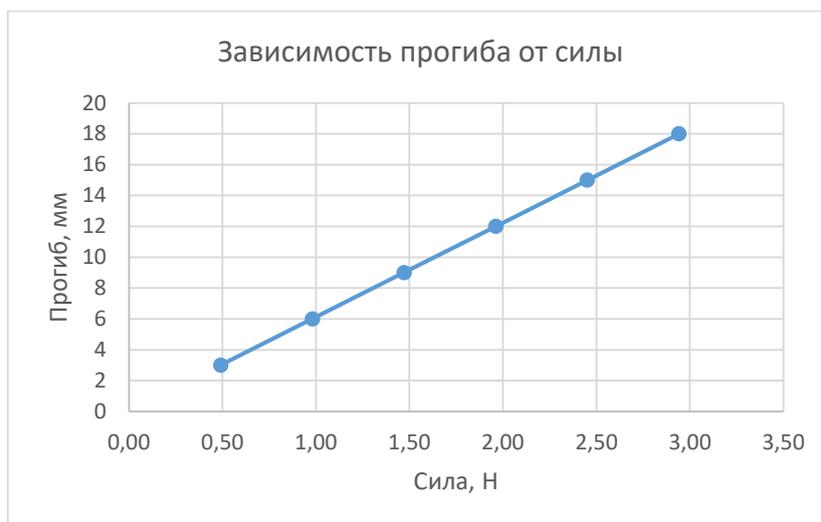


Рис.7. Зависимость изгиба деревянной линейки от силы