

## Демонстрация взаимодействия тел

### Цель работы

Целью работы является экспериментальное установление связи между изменением импульса тела и импульсом суммы действующих на него сил.

### Метод экспериментального исследования явления

В работе с помощью датчика силы (напольного динамометра) измеряется зависимость от времени силы давления на неподвижную опору ног человека, совершающего прыжок. Импульс этой силы определяется путем приближенного вычисления площади под кривой зависимости модуля силы от времени. Изменение импульса человека при отталкивании от платформы оценивается по времени, течение которого человек находится в полете.

### Теория

Когда человек массой  $M$  стоит на платформе напольного динамометра неподвижно, действующая на него сила тяжести  $Mg$  уравнивается силой реакции датчика  $F$ . По третьему закону Ньютона сила, с которой человек действует на датчик,  $P=F$ . В этом случае динамометр регистрирует вес неподвижного человека, равный по модулю  $Mg$ . При совершении человеком, стоящим на платформе напольного динамометра, вертикальных ускоренных движений (приседаний, выпрямлений, прыжков и т. п.) сила реакции датчика уже не уравнивает силу тяжести, поскольку сумма этих сил сообщает человеку отличное от нуля ускорение. Поэтому сила  $P$ , с которой человек действует на датчик, будет отличаться от веса неподвижного человека:  $P < Mg$ , когда человек приседает, и  $P > Mg$ , когда человек выпрямляется. Таким образом, динамометр будет регистрировать изменение силы, действующей на него со стороны человека.

Для корректных измерений динамических нагрузок, приложенных к напольному динамометру, необходимо иметь в виду, что он представляет собой колебательную систему с вполне определенными массой, жесткостью и коэффициентом затухания. Измерения показали, что при воздействии на платформу датчика ударной нагрузки в нем возбуждаются затухающие колебания с условным периодом  $T \approx 30$  мс и постоянной времени затухания того же порядка. Примерный вид функции отклика динамометра на ударное воздействие изображен на рисунке 1. Для надежного измерения временной зависимости силы, действующей на напольный динамометр, необходимо, чтобы характерное время  $\tau$  изменения измеряемой силы удовлетворяло условию:  $\tau \gg T$ . Иначе говоря,  $\tau$  должно быть не менее 0,3 с. При вертикальных движениях человека, совершающего физические упражнения на платформе датчика, это условие, как правило, выполняется.

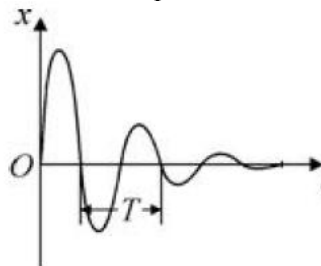


Рис. 1. Отклик напольного динамометра на ударное воздействие

Для экспериментальной проверки изменения импульса тела под действием внешних сил воспользуемся следующей моделью. Вначале ассистент (из числа учащихся) стоит на платформе динамометра неподвижно, согнув ноги в коленях и положив руки на бедра. По команде учителя он (руки по-прежнему на бедрах) резко распрямляется и подпрыгивает вертикально вверх, оставаясь в полете в полностью распрямленном положении.

Приземляется на платформу динамометра ассистент в том же положении, что и в полете, и сгибает ноги в коленях, смягчая тем самым удар о платформу, только после касания платформы подошвами. Такая модель позволяет считать движение ассистента в полете поступательным и использовать для вычисления его импульса формулу  $p = Mv_0$  (справедливую для материальной точки).

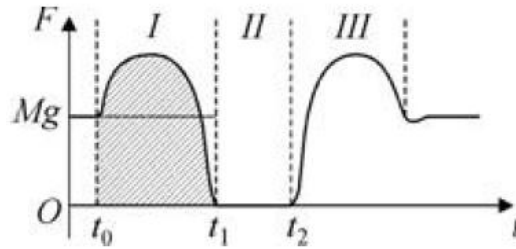


Рис. 2. Зависимость силы взаимодействия ног человека, совершающего прыжок, с платформой датчика силы от времени

Примерная зависимость силы, регистрируемой датчиком в описанном выше опыте, от времени изображена на рисунке 2. На этой зависимости можно выделить три характерных этапа: *I* — толчок; *II* — полет; *III* — приземление. На первом этапе длительностью  $\tau_{вз} = t_1 - t_0$  ассистент отталкивается от платформы и в результате взаимодействия с ней приобретает в вертикальном направлении импульс, модуль которого  $p = Mv_0$ . Для определения скорости  $v_0$ , с которой ассистент отрывается от платформы, используется длительность  $\tau_{п}$  его свободного полета, равная промежутку времени  $t_2 - t_1$ , в течение которого ассистент не действует на динамометр. Считая, что движение ассистента в полете происходит с постоянным ускорением  $g$ , получаем следующее выражение для скорости отрыва:

$$v_0 = \frac{g\tau_{п}}{2}.$$

Тогда изменение импульса ассистента за время его взаимодействия с платформой динамометра при прыжке равно

$$\Delta p = \frac{1}{2} Mg\tau_{п}.$$

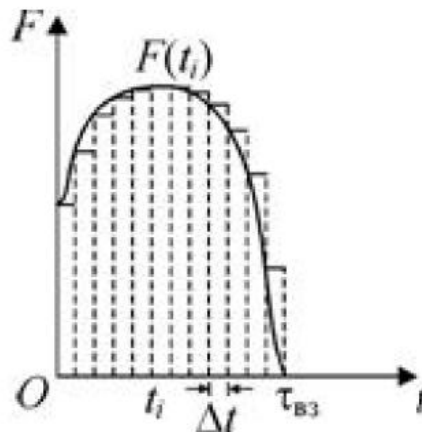


Рис. 3. К вычислению импульса силы  $F(t)$

Согласно второму закону Ньютона изменение импульса тела за какое-либо время равно импульсу действующих на тело сил за это же время.

В данном опыте на ассистента во время прыжка действуют постоянная сила тяжести  $Mg$ , направленная вниз, и переменная сила реакции датчика  $F(t)$ , направленная вверх. Импульс силы тяжести за время  $\tau_{вз} = t_1 - t_0$  по модулю равен  $Mg\tau_{вз}$ . Модуль импульса силы  $F(t)$  за то же время численно равен площади фигуры, ограниченной кривой  $F = F(t)$ , осью абсцисс и вертикальными прямыми  $t = t_0$  и  $t = t_1$  (заштрихованная фигура на рисунке 2). В программе вычисление этой величины проводится путем суммирования произведений модуля силы  $F(t_i)$  в момент времени  $t_i$  и малого отрезка времени  $\Delta t$ , в пределах которого эту силу можно считать постоянной (рис. 3). Таким образом, импульс внешних сил, действующих на ассистента во время отталкивания от динамометра, равен

$$\sum_i F(t_i)\Delta t - Mg\tau_{вз}$$

В пределах погрешности, связанной с приближенным описанием движения человека, эта величина должна совпадать с модулем изменения импульса ассистента за время  $\tau_{вз}$ .



### Контрольные вопросы

1. Какие силы действуют на человека, стоящего на платформе напольного динамометра?
2. Как формулируются второй и третий законы Ньютона?
3. Почему при вертикальных перемещениях человека, стоящего на платформе напольного динамометра, сила давления его ног на платформу датчика изменяется?
4. Как изменяется сила давления ног человека на платформу динамометра, если человек приседает? распрямляется?
5. Какая величина называется импульсом силы?
6. Как определить импульс переменной силы за конечное время?

### Оборудование экспериментальной установки

Датчик силы (напольный динамометр):

### Параметры экспериментальной установки

#### Длительность проведения эксперимента

Рекомендуется провести по одному опыту для трех–пяти вертикальных прыжков разной высоты. Весь цикл измерений может быть проведен за 3–5 мин.

На обсуждение содержания эксперимента и его результатов, ответы на вопросы во время выполнения измерений и после их окончания отводится 10–30 мин.

### Точность измерений

При строгом следовании рекомендациям разделов «Монтаж и настройка», «Подготовка приборов» и «Методика выполнения эксперимента» данный эксперимент позволяет измерить величину силы, действующей на напольный динамометр, с точностью до 1,2 Н, время действия этой силы при отталкивании ассистента от платформы с точностью до 3 мс, импульс, приобретенный ассистентом при отталкивании от платформы, с точностью до 5 кг•м/с.

### Техника безопасности

Во время проведения эксперимента необходимо соблюдать все правила техники безопасности, указанные для персонального компьютера как электрического оборудования.

Используемое измерительное оборудование (система сбора данных, датчики силы и ускорения) экспериментальной установки рассчитано на питание от низковольтного напряжения, не представляющего опасности для человека.

Физические упражнения, выполняемые ассистентом на напольном динамометре, также не представляют опасности для человека.

### Обеспечение наглядности результатов эксперимента

Датчик силы (напольный динамометр) следует устанавливать в месте, позволяющем обеспечить хороший обзор проведения эксперимента для каждого ученика.

Для обеспечения удобства проведения эксперимента компьютер необходимо располагать в месте, максимально удаленном от установки (на расстоянии не менее 1,5 м).

Экран компьютера рекомендуется продублировать с помощью проектора.

### Монтаж и настройка

Датчик силы (напольный динамометр) устанавливается горизонтально на свободном от посторонних предметов участке пола.

### Подготовка приборов

Перед началом проведения эксперимента необходимо выполнить следующее:

Внимательно прочитайте инструкции, подготовьте необходимое оборудование, соберите установку в соответствии с разделом «Монтаж и настройка».

Запустите программу **SensorLab ПО**.

Подключите систему сбора данных SensorLab к компьютеру с помощью USB кабеля.

Подключите датчик силы к аналоговому входу системы сбора данных

Переключите датчик силы на диапазон измерений от –800 до 3500 Н

## Методика выполнения эксперимента

### Проведение измерений

При проведении эксперимента необходимо участие ассистента из числа физически подготовленных и контактных учеников. Поскольку от ассистента требуется точное выполнение ваших указаний, рекомендуется выбрать ассистента заранее и провести с ним несколько тренировок.

Нажмите кнопку **Ноль** в разделе **Калибровка**. При этом программа измерит и запишет значение веса платформы датчика силы, которое будет учитываться при всех последующих измерениях.

Попросите ассистента встать на платформу динамометра и стоять на ней неподвижно.

Нажмите кнопку **Пуск**. Программа измерит вес ассистента и по измеренному значению веса определит его массу. На графике **Сила–Время** будет отображаться сила давления ног ассистента на платформу динамометра.



Рис. 1



Рис. 2



Рис. 3



Рис. 4

Не останавливая измерений, попросите ассистента, стоящего на платформе динамометра, занять исходное положение: согнуть ноги в коленях, сдвинуть колени вместе и положить руки на бедра (рис. 1).

По вашей команде ассистент (руки по-прежнему на бедрах) должен резко распрямиться и подпрыгнуть вертикально вверх, оставаясь в полете в полностью распрямленном положении (рис. 2). Для корректного измерения времени полета ассистент

должен приземлиться на платформу динамометра в том же положении, что и в полете (рис. 3), и согнуть ноги в коленях, смягчая тем самым удар о платформу, только после касания платформы подошвами (рис. 4).

После приземления ассистента измерения прекращаются автоматически (кнопку **Стоп** нажимать не требуется). Масштаб графика **Сила–Время** по оси абсцисс (оси времени) автоматически изменяется: выделяется отрезок времени, начинающийся за 0,5 с до толчка и заканчивающийся через 0,5 с после приземления. В соответствующих ячейках активной строки таблицы результатов отобразятся следующие данные: вес ассистента; время, в течение которого ассистент находился в полете; скорость ассистента, приобретенная им после толчка; максимальная сила давления ног ассистента на платформу при толчке; длительность толчка при прыжке ассистента; импульс действовавших на ассистента внешних сил за время толчка;

изменение импульса ассистента при толчке.

**Примечание.** Кнопку **Стоп** используйте только в том случае, если по каким-либо причинам возникает необходимость остановить измерения до окончания опыта. При нажатии этой кнопки измеренные данные в таблицу результатов не заносятся.

### Анализ результатов

Проанализируйте полученные данные. Обратите внимание учащихся на соотношение между изменением импульса ассистента и импульсом действовавших на него сил. Возникновение значительного (более 10%) различия между этими величинами следует отнести в основном к некорректному измерению времени полета, которое вызвано ошибками, допущенными ассистентом при выполнении прыжка.



### **Повторные измерения**

Проведите измерения по пунктам 2–6 раздела «Проведение измерений» несколько раз, добиваясь достаточно близкого (в пределах 10%-ной погрешности) совпадения импульса сил, действовавших на ассистента, и изменения его импульса.

### **Справка**

#### **Принцип работы датчика силы (напольного динамометра)**

Датчик силы (напольный) предназначен для прямого измерения силы, прилагаемой к его платформе. Основой датчика является пьезорезистивный полупроводниковый чувствительный элемент, изменение сопротивления которого прямо пропорционально прилагаемой к платформе силе. Измерение проводится по хорошо известной балансной мостовой схеме, в одной из плеч которой стоит пьезорезистивный чувствительный элемент, в остальных – обычные резисторы равных номиналов. При нагрузке датчика происходит деформация (изгиб) чувствительного элемента, которая приводит к изменению его сопротивления и, как следствие, к появлению напряжения на выходе датчика, которое пропорционально приложенной силе. Питание датчика осуществляется через плату сбора данных напряжением +5 В. С помощью этого датчика, например, можно провести прямые измерения веса тела, покоящегося на платформе.