

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

**Лабораторный практикум по механике
и молекулярной физике для студентов
естественно-научных специальностей**

Учебно-методическое пособие

Составители:
И. Л. Глухов,
Г. С. Григорян,
С. Н. Дрождин

Воронеж
Издательский дом ВГУ
2016

Лабораторная работа №15

Определение скорости тела методом баллистического маятника

Цель работы: определить скорость пуль различной массы методом баллистического маятника.

Приборы и принадлежности: модульный учебный комплекс МУК-М1, набор пуль разной массы.

Законы сохранения в механике

Импульс является одним из фундаментальных понятий физики. Оперирование импульсами тел позволяет существенно упростить решение многих задач динамики. Импульсом тела \mathbf{p} называется векторная величина, равная произведению массы тела m на скорость его движения \mathbf{v} ¹:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

Второй закон Ньютона

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a},$$

с учетом определения ускорения $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt$, для тела с постоянной массой m может быть записан в виде:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}, \quad (15.1)$$

где \mathbf{F} — сила, действующая на тело; $\frac{d\mathbf{p}}{dt}$ — мгновенная скорость изменения импульса \mathbf{p} с течением времени t .

Импульсом системы, состоящей из N тел, называется векторная сумма импульсов всех N тел, образующих систему,

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \mathbf{p}_3 + \dots + \mathbf{p}_N = \sum_{i=1}^N \mathbf{p}_i$$

Тела, образующие систему, могут взаимодействовать как между собой, так и с телами, не входящими в данную систему. Силы, с которыми

¹Здесь и далее прямым жирным шрифтом обозначены векторные величины

При выполнении третьего условия движение системы в определенных направлениях можно рассматривать как движение изолированной системы, хотя в целом система заведомо не является изолированной.

Закон сохранения импульса является фундаментальным законом природы. Он позволяет рассматривать общие свойства движения без решения уравнений движения и информации о развитии процессов во времени.

Использование физической величины *энергия* также позволяет упростить решение многих физических задач. Энергия представляет собой количественную меру способности тела (системы тел) изменить состояние другого тела (системы тел) при взаимодействии. Энергия принимает различные формы (механическая, тепловая, электромагнитная, химическая и т.д.), но при любых физических процессах происходят только такие ее перераспределения и превращения, что общее количество энергии не изменяется.

В механике рассматривают два вида энергии, кинетическую и потенциальную. Кинетической энергией тела называют энергию K , являющуюся мерой его механического движения. Выражение для кинетической энергии твердого тела, имеющего массу m и движущегося поступательно со скоростью v :

$$K = \frac{mv^2}{2} \quad (15.7)$$

Из формулы (15.7) видно, что кинетическая энергия не может быть отрицательной. Кинетическая энергия является величиной относительной, так как скорость зависит от выбора системы отсчета.

Консервативные силы при перемещении тела из одного положения в другое совершают работу, величина которой не зависит от того, по какой траектории это перемещение произошло, а зависит от начального и конечного положения этого тела. Поля, в которых действуют консервативные силы, называются *потенциальными*. Работа таких сил по любому замкнутому пути равна нулю. Консервативными являются силы всемирного тяготения (их частным случаем является сила тяжести), кулоновские

силы и силы упругости.

Тела, находясь в потенциальном поле сил, обладают потенциальной энергией. Потенциальная энергия W — энергия системы тел, определяемая их взаимным расположением и характером сил взаимодействия между ними. Совершение работы консервативными силами происходит за счет убыли потенциальной энергии поля этих сил.

$$A = -\Delta W$$

Следовательно, при решении конкретных задач можно опустить вычисление абсолютных величин потенциальной энергии и рассматривать только изменения потенциальных энергий частей системы относительно произвольно выбранного состояния системы.

Потенциальная энергия тела, поднятого на высоту h над поверхностью Земли, равна

$$W = mgh + W(0)$$

где $W(0)$ — потенциальная энергия тела, лежащего на поверхности Земли. Обычно принимают $W(0) = 0$, так что

$$W = mgh$$

Полной механической энергией тела называется сумма кинетической и потенциальной энергии этого тела

$$E = K + W$$

Полная механическая энергия системы тел складывается из полной кинетической энергии системы ($K = \sum_i K_i$) и полной потенциальной энергии системы. Последняя представляет собой сумму не только потенциальных энергий взаимодействия всех тел системы со внешними телами ($\sum_i W_i$), но и потенциальных энергий взаимодействий между телами системы ($\sum_j \tilde{W}_j$)

$$E = K + W = \sum_i (K_i + W_i) + \sum_j \tilde{W}_j$$

Закон сохранения механической энергии: полная механическая энергия замкнутой системы, между телами которой действуют только *консервативные силы*, остается постоянной.

$$E = K + W = \text{const}$$

Если в замкнутой системе кроме консервативных сил действуют неконсервативные силы (например, сила трения), то величина полной механической энергии изменяется. Убыль полной механической энергии идет на прирост величин других видов энергии в системе (например, тепловой).

Ударом принято называть кратковременное взаимодействие тел, в результате которого их скорости испытывают значительные изменения.

В механике часто используются две модели ударов — *абсолютно неупругий* и *абсолютно упругий*.

Абсолютно неупругим ударом называется удар, после которого тела движутся с одинаковой скоростью и в одном направлении как единое целое.

При абсолютно неупругом ударе выполняется только закон сохранения импульса, а закон сохранения механической энергии не выполняется, так как часть энергии переходит во внутреннюю энергию.

При абсолютно упругом ударе сохраняются импульс и механическая энергия. Она не переходит ни в какие иные формы, происходит только ее перераспределение между сталкивающимися телами так, чтобы суммарный импульс тел не изменился.

Баллистический маятник

Измерение ряда физических величин может быть сведено к измерению пропорционального им импульса силы при механическом воздействии на систему, в которой несложно провести измерение этого импульса силы, например, маятник. Если на находящийся в равновесии маятник воздействовать силой так, что маятник за время ее действия не успевает существенно отклониться от положения равновесия, то первое максимальное отклонение маятника от полученного толчка (баллистический отброс)

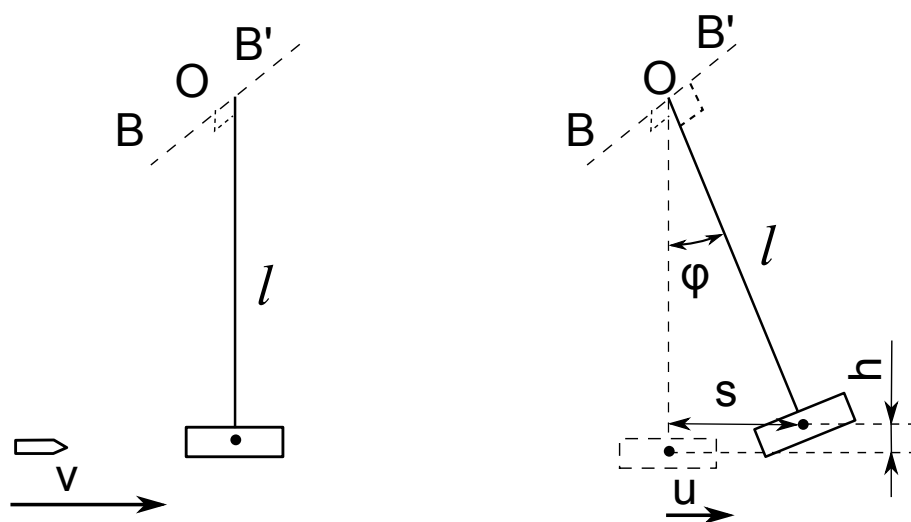


Рис. 2: Баллистический маятник

пропорционально импульсу силы. Тогда измерение физической величины можно свести к измерению баллистического отброса. В этом и состоит *баллистический метод* измерения, используемый в таких приборах, как баллистический гальванометр, баллистические весы и динамометр, баллистический маятник.

Баллистический маятник — устройство, применяемое для измерения скоростей пуль или снарядов². Он представляет собой тяжёлый металлический цилиндр массой M , заполненный вязким веществом и подвешенный на четырёх нерастяжимых нитях (рис. 2). Пуля массой m , летящая со скоростью v , попадает в покоящийся маятник массой M и застревает в нем. В результате чего маятник с застрявшей в нем пулей приобретает некоторую начальную скорость u и затем отклоняется от положения равновесия. Наибольшее расстояние s , на которое отклонится маятник называют баллистическим отбросом.

Отклоняясь от положения равновесия, маятник поднимается на высоту h , где вся кинетическая энергия, приобретенная в момент удара, превращается в потенциальную:

$$\frac{(M + m)u^2}{2} = (M + m)gh$$

²Стандартными кинематическими методами весьма сложно измерить типичные скорости пуль и снарядов (300-1800 м/с)

где g — ускорение свободного падения, h — максимальная высота подъема центра тяжести маятника с пулей. Сокращая сумму масс, получим

$$\frac{u^2}{2} = gh \quad (15.8)$$

В случае нерастяжимого подвеса длиной l

$$l^2 = s^2 + (l - h)^2$$

или при $h \ll l$

$$s^2 \approx 2lh,$$

что с учетом (15.8) приводит к

$$u \approx s\sqrt{\frac{g}{l}} \quad (15.9)$$

Маятник после столкновения с пулей начинает двигаться в вертикальной плоскости, которая содержит траекторию полета пули до попадания в маятник, по дуге окружности с центром в точке подвеса и радиусом l , то есть вокруг оси BB' в плоскости рисунка. Поэтому при строгом рассмотрении связи между скоростью налетающей пули v и скоростью маятника после столкновения с пулей u необходимо рассчитывать момент инерции маятника и применять закон сохранения момента импульса³.

Если геометрические размеры тела-ловушки, в котором застревает пуля, значительно меньше длины подвеса, то можно определить скорость пули, используя закон сохранения проекции импульса на направление движения налетающей пули:

$$mv = (m + M)u \quad (15.10)$$

Как известно, закон сохранения импульса справедлив только для замкнутой системы тел, для которой сумма внешних сил равна нулю. Для системы маятник-пуля внешними силами являются сила тяжести и сила

³Подробнее в приложении 1