

Отчет о выполнении лабораторной работы 1.4.5

Изучение колебаний струны

Варламов Антоний, группа Б02-928

4 декабря 2019 г.

Цель работы: исследовать зависимости частоты колебаний струны от величины натяжения, а также условий установления стоячей волны, получающейся в результате сложения волн, идущих в противоположных направлениях.

В работе используются: рейка со струной, звуковой генератор, постоянный магнит, разновесы.

1 Теоретический материал

Основное свойство струны – гибкость, является следствием ее большой длины по сравнению с поперечными размерами. Даже струны, изготовленные из жестких материалов, практически не сопротивляются изгибанию, если размер изгибаемого участка значительно больше поперечного размера струны. Данный факт позволяет не учитывать при дальнейшей работе изгибные напряжения.

Горизонтально закрепленная струна провисает под действием поля тяжести, при отсутствии натяжения. Достаточно натянутую струну можно считать прямой, если ее концы закреплены на одном горизонтальном уровне. Учитывая этот факт, в дальнейшем действие силы тяжести учитываться не будет.

Натянутая струна с жестко закрепленными концами удобна для изучения колебаний. Это связано с тем, что в струне можно непосредственно наблюдать простейшие типы колебаний и волн, измерять их параметры и сравнивать результаты наблюдения с результатами теоретических расчетов.

Движение элементов струны может быть вызвано изменением ее формы или передачей ей импульса. Натяжение струны стремится вернуть ее в изначальное прямолинейное положение, и это приводит к тому, что возникает движение элементов струны. Возмущения бегут вдоль струны.

Скорость распространения подобного возмущения можно вычислить по формуле 1.

$$u = \sqrt{\frac{F}{\rho_l}}, \quad (1)$$

где F — сила натяжения струны, ρ_l — масса струны на единицу длины.

При заданной частоте ν длина волны определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{u}{\nu} \quad (2)$$

Частоты собственных колебаний струны определяются формулой:

$$\nu_n = n \frac{u}{2l}, \quad (3)$$

где n — число полуволн, l — длина струны.

2 Экспериментальная установка

На Рисунке 1 представлена схема экспериментальной установки. Устроена она следующим образом: на массивной металлической рейке 1 установлены опора 2 и магнит 3, которые можно перемещать вдоль рейки, а также неподвижная опора 4. Один конец струны закреплен в изоляторе опоры 4. От него струна проходит между полюсами магнита и через опору 2, которая дает возможность струне перемещаться в горизонтальной плоскости, неподвижный блок и соединяется с чашкой 5, на которую помещаются грузы. Такое устройство позволяет регулировать натяжение струны. К концу струны, закрепленному в

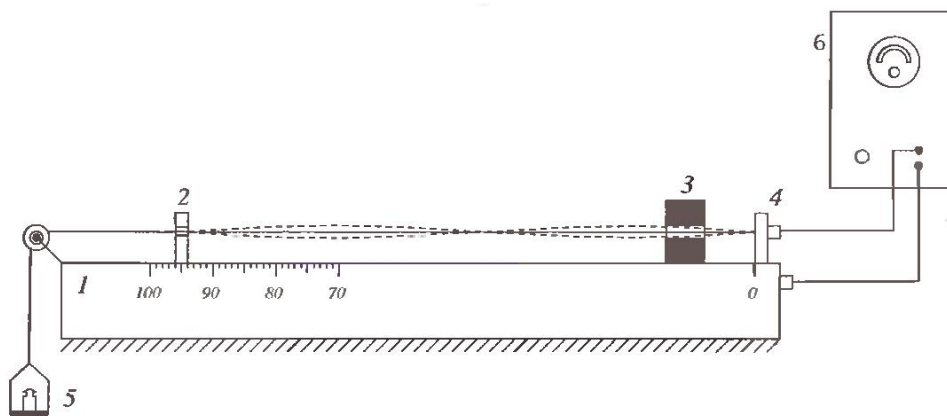


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

изоляторе опоры 4, и к массивной металлической рейке 1 подводится переменное напряжение от звукового генератора 6. Движение струны вызывается силой Ампера, действующей на проводник с током со стороны магнитного поля. Частота колебания струны совпадает с частотой вынуждающей силы, т.е с частотой силы Ампера. Так как данная сила зависит от тока в проводнике, то частота колебаний струны будет совпадать с частотой генератора.

В натянутой струне возникнуть колебания, которые сложившись после отражения от опор 2 и 4 создадут стоячую волну, если на длине струны уложится целое число полуволн.

3 Выполнение работы

Перед началом выполнения работы опишем грузы, используемые в работе для нагружения струны и изменения ее натяжения. Масса грузов и их номер занесены в таблицу 1. Полная масса нагрузки для отдельного измерения приведена в таблице 2

№ груза	1	2	3	4	5	6	7	подвес
Масса груза M , г	495	490,6	494,4	494,6	497,2	453,4	338	119,288

Таблица 1: Масса грузов, используемых в ходе выполнения работы

Величина нагрузки и массы грузов связаны следующим образом:

$$T_i = \left(m_{\text{подвеса}} + M_2 + \sum_{k=2}^i M_k \right) g \quad (4)$$

№ измерения	1	2	3	4	5	6
Полная нагрузка T , Н	10,84	15,69	20,55	25,43	29,88	33,19

Таблица 2: Полная масса нагрузки для каждого измерения.

Результаты измерения частот гармоник для каждого значения нагрузки занесены в таблицу 3.

Формула, описывающая зависимость скорости u от нагрузки, приложенной к струне имеет вид 5:

$$\nu_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho_l}} \quad (5)$$

По результатам измерений, занесенным в таблицу 3, построим графики зависимости частоты ν_n от номера гармоники n . График изображен на рисунке 2. С помощью МНК определим значение коэффициента угла наклона для данного графика. Из формулы 3 видно, что данный коэффициент равен $\frac{u}{2l}$, значит, из данных зависимостей определим значение скорости u

№ измерения	1	2	3	4	5	6
ν_1 , Гц	139,5	160,4	188,5	209,1	226,1	239,8
ν_2 , Гц	276,4	334,4	379,7	420	458,5	481,1
ν_3 , Гц	417,9	494,8	569,7	631	685,7	722,1
ν_4 , Гц	562,3	657,3	749,4	840,6	917	958,9
ν_5 , Гц	697	830,1	936,3	1050	1143	1206
ν_6 , Гц	834,1	1006	1128	1260,5	1364,2	1448,8
ν_7 , Гц	977,1	1161	1327,6	1479,1	1599,6	1682,6
ν_8 , Гц	1107	1338,8	1525	1695,7	1839,4	1937
ν_9 , Гц	1263,1	1501	1713,5	1908,3	2072,3	2183,9
ν_{10} , Гц	1385,2	1652,9	1880,1	2094,9	2276,1	2396,8
ν_{11} , Гц	1537,2	1767,6	2077,2	2304,2	2491,6	2642,5

Таблица 3: Результаты измерений частот гармоник в зависимости от массы нагрузки.

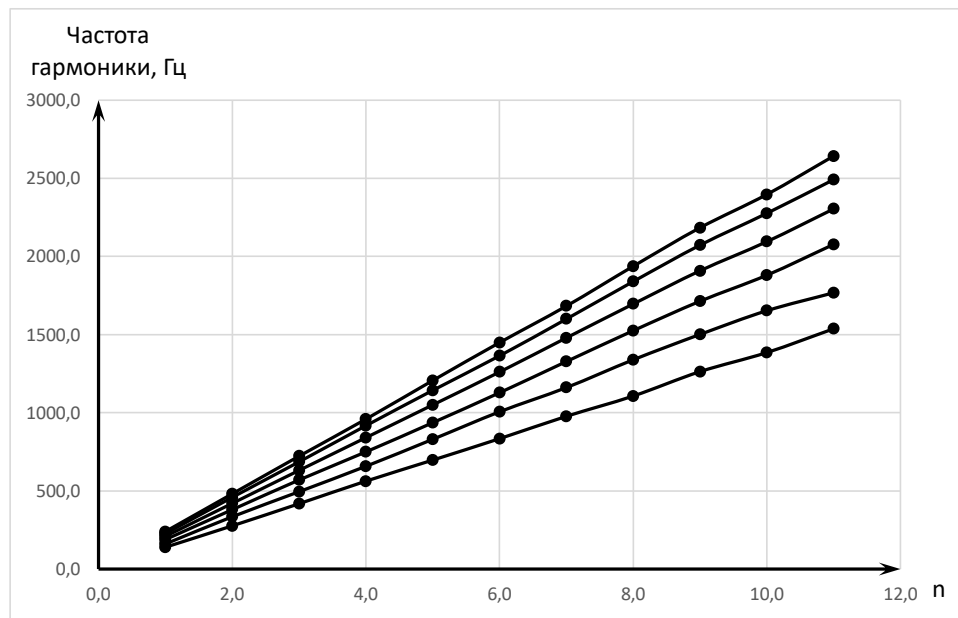


Рис. 2: Графики зависимости частоты гармоники от нагрузки для различных n

Определим значения скорости u для каждого значения нагрузки. Значения занесем в таблицу 4

\bar{u}	139	165	189	210	228	241
σ_u	2	8	4	3	4	3
ε_u	0,017	0,048	0,020	0,015	0,019	0,013

Таблица 4: Определение погрешности измерения скорости

Используя данные таблицы 4, построим график зависимости $u^2(F)$. Данный график изображен на рисунке 3.

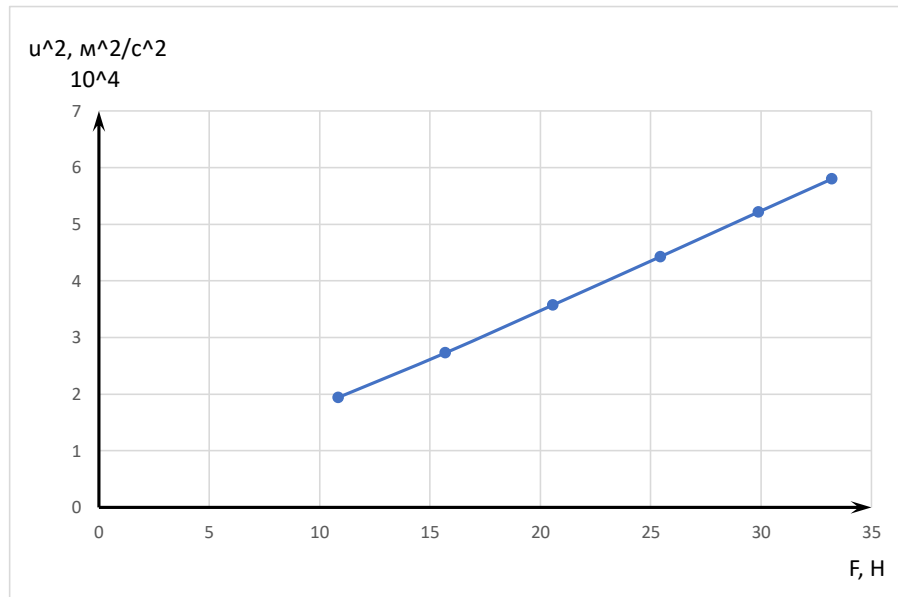


Рис. 3: Зависимость $u^2(F)$

С помощью МНК определим значение коэффициента угла наклона данного графика:

$$k = 1744,5$$

Определим, как связан угловой коэффициент и величина линейной плотности струны:

$$k = \frac{1}{\rho_l}$$

Из данных соотношений получаем значение $\rho_l = 573 \pm 8 \frac{\text{мг}}{\text{м}}$. Значение, указанное на данной установке — $568,4 \pm 0,1 \frac{\text{мг}}{\text{м}}$ (Отклонение составляет $0,85 \approx 0,9\%$)

Погрешность косвенного измерения линейной плотности равна $\varepsilon_{\rho_l} = 2\varepsilon_u$

$$\varepsilon_{\rho_l} = 0,04$$

Значит, определенное таким образом значение линейной плотности струны совпадает с истинной линейной плотностью струны в пределах погрешности.

4 Результаты

1. Во время выполнения работы было подтверждено несколько теоретических зависимостей между физическими величинами. С точностью $\varepsilon_{\nu_1} = 0,022$ подтверждена

формула для определения частот гармоник струны. С точностью $\overline{\varepsilon_u} = 0,03$ подтверждена формула для определения скорости распространения волны в твердом теле под действием внешней силы.

2. Полученные графики имеют вид, предсказанный теоретически. Относительно большое значение относительной погрешности определения частоты 11 гармоник для массы нагрузки, соответствующей 3 грузам, объясняется ошибочным измерением частоты данной гармоник, что видно из графика.
3. С точностью $\varepsilon_{\rho_l} = 0,04$ определена линейная плотность струны, значение которой совпало со значением, указанным на данной установке.

$$\rho_l = 573 \pm 8 \frac{\text{мг}}{\text{м}}$$

$$\rho_{\text{уст}} = 568,4 \pm 0,1 \frac{\text{мг}}{\text{м}}$$