



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

ВИРТУАЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторная работа № 3-В
**Определение средней плотности
Земли**

«ФИЗИКА»

Авторы:

Жданова Т.П.,

Кудря А.П.,

Лемешко Г.Ф.,

Холодова О.М.

Ростов-на-Дону, 2021

Аннотация

Настоящая лабораторная работа посвящена определению средней плотности Земли.

Методические указания предназначены для организации самостоятельной работы студентов всех форм обучения, изучающих физику, при подготовке и проведении учебного виртуального эксперимента.

Авторы:

Жданова Т.П. - к.ф.-м.н., доцент
кафедры «Физика»

Кудря А.П. - старший преподаватель
кафедры «Физика»

Лемешко Г.Ф. - к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»

Холодова О.М. – старший преподаватель
кафедры «Физика»



Оглавление

Цель работы.....	4
Краткая теория.....	4
Задание 1. Определение средней плотности планеты.....	10
Задание 2. Установить зависимости кинематических характеристик колеблющегося тела в шахте Земли.....	11
Контрольные вопросы.....	12
Список литературы.....	12

ЦЕЛЬ РАБОТЫ.

1. Осуществить виртуальный эксперимент по свободному движению тела в сквозной шахте земли и определить среднюю плотность планеты.
2. Познакомиться с существующими теориями о строении планеты и изменением ее физических параметров с глубиной.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

О прорытии сквозного туннеля через земной шар мечтали еще в 18 веке французский математик П.Л. Мопертюи и французский философ М. Вольтер, а позднее к этой идее возвратился французский астроном К. Фламарион.

Предположим, что этот фантастический проект был осуществлен! Пусть сквозной туннель направлен вдоль оси вращения Земли и в нем может свободно падать небольшое тело. Будем считать, что туннель герметичен и из него удален воздух. Из-за малых размеров тела, его можно принять за материальную точку. Под действием силы тяготения тело будет ускоренно двигаться от начального положения (точка A на рис.1) к центру Земли. Миновав центр Земли, тело продолжит движение, но уже замедленно. Достигнув другого конца туннеля, тело снова начнет двигаться ускоренно к центру Земли и т.д.

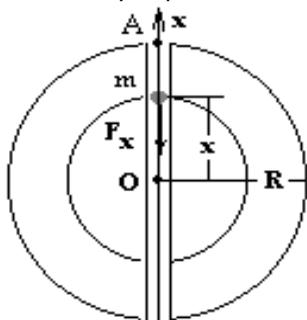


Рис. 1

Таким образом, тело будет совершать колебательное движение относительно центра Земли. Для описания этого процесса, инерционную систему свяжем с центром Земли, а координату Ox направим вдоль туннеля (рис.1). Пусть через время t после начала движения, тело массы m находится на расстоянии x от центра Земли. На него действует сила тяготения со стороны шара радиуса x :

$$F_x = G \frac{mM_x}{x^2}, \quad (1)$$

где M_x – масса этого шара, $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2)$ – гравитационная постоянная.

Пусть средняя плотность Земли ρ , тогда $M_x = \rho V_x = \rho \frac{4\pi x^3}{3}$ и выражение для силы тяготения (1) приобретает вид:

$$F_x = \frac{4\pi G \rho m x}{3}. \quad (2)$$

Можно доказать, что сила тяготения, действующая со стороны оставшегося шарового слоя толщиной $(R - x)$, равна нулю.

Согласно второму закону Ньютона сила тяготения F_x сообщает телу ускорение a_x :

$$a_x = \frac{F_x}{m}. \quad (3)$$

Тело массой m совершает гармонические колебания относительно центра Земли:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

$$v_x = \dot{x} = A \omega \cos(\omega t + \varphi_0),$$

$$a_x = \dot{v}_x = A \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0), \text{ т.е.}$$

$$a_x = \omega^2 x. \quad (4)$$

Подставляя уравнения (2) и (4) в (3), получим связь циклической частоты собственных колебаний тела ω с плотностью планеты ρ :

$$\omega^2 = \frac{4\pi G \rho}{3}. \quad (5)$$

Учитывая, что циклическая частота связана с периодом колебаний $\omega = \frac{2\pi}{T}$, из уравнения (5) можно определить среднюю плотность планеты по периоду колебаний тела T в сквозной шахте Земли:

$$\rho = \frac{3\pi}{GT^2}. \quad (6)$$

Плотность планеты с глубиной изменяется сложным образом. Это связано с неоднородным строением планеты, о котором узнают с помощью разнообразных методов исследования. Львиную долю информации о внутреннем строении Земли дают сейсмические волны. Скорость сейсмических волн зависит от плотности и упругих свойств горных пород, через которые они проходят. Более того, они отражаются от границ между пластами пород разного типа и преломляются на этих границах. По записям колебаний земной поверхности при землетрясениях – сейсмограммами – было установлено, что недра Земли состоят из трех основных частей: коры, оболочки (мантии) и ядра

(рис.2).

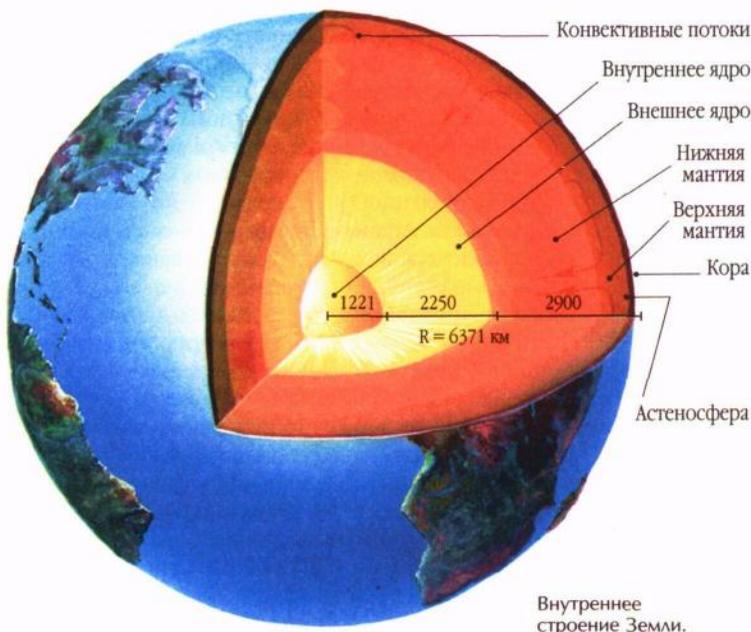


Рис. 2

Кора отделяется от оболочки отчетливой границей, на которой скачкообразно возрастает скорости сейсмических волн, что вызвано резким повышением плотности вещества. Эта граница носит название «раздел Мохоровичича» по фамилии сербского сейсмолога, открывшего его в 1909 году. Толщина коры непостоянна, она изменяется от нескольких километров в океанских областях до нескольких десятков километров в горных районах материков. В самых грубых моделях Земли кору представляют в виде однородного слоя толщиной порядка 35 км.

Ниже до глубины примерно 2900 км, расположена мантия. Она, как и земная кора, имеет сложное строение.

Еще в 19 столетии стало ясно, что у Земли должно быть плотное ядро, так как плотность наружных пород земной коры почти в два раза меньше средней плотности нашей планеты. Величина средней плотности планеты получается при плотности ядра, соизмеримой с плотностью железа. Это послужило основанием для гипотезы о железном ядре Земли. А в начале 20 века были получены первые сейсмологические свидетельства его существования.

Граница между ядром и мантией наиболее отчетливая. Она сильно отражает продольные и поперечные сейсмические волны и преломляет продольные волны. Ниже этой границы скорость продольных волн резко

падает, а плотность вещества возрастает: от 5600 кг/ м^3 до 10000 кг/ м^3 . Поперечные волны ядро вообще не пропускают. Это означает, что вещество там находится в жидком состоянии.

Есть и другие свидетельства в пользу гипотезы о жидком железном ядре планеты. Так, открытое в 1905 году изменение интенсивности магнитного поля Земли в пространстве привело к заключению, что оно зарождается в глубинах планеты. Наиболее вероятный источник такого поля – жидкое железное (т.е. проводящее токи) ядро, в котором должны существовать токовые петли, грубо напоминающие витки провода в электромагните, которые и генерируют различные составляющие геомагнитного поля.

В 30 – е годы сейсмологи установили, что у Земли есть и внутреннее, твердое ядро. Современное значение глубины границы между внутренним и внешним ядрами примерно 5150 км , переходная зона довольно тонкая – около 5 км .

Граница наружной зоны Земли – *литосферы* – расположена на глубине порядка 70 км . Литосфера включает в себя как земную кору, так и часть верхней мантии. Этот жесткий слой объединяется в единое целое его механическими свойствами. Литосфера расколота примерно на десять больших плит, на границах которых случается подавляющее число землетрясений.

Под литосферой на глубинах от 70 до 250 км существует слой повышенной текучести – так называемая *астеносфера* Земли. Жесткие литосферные плиты плавают в «астеносферном океане».

В астеносфере температура мантийного вещества приближается к температуре его плавления. Чем глубже, тем выше давление и температура. В ядре Земли давление превышает 360 ГПа , а температура – 6000°C .

Таковы представления о строении Земли. Дальнейшие исследования могут закрепить или изменить эти представления.

Функциональные особенности программы

Программа позволяет осуществить виртуальный эксперимент по свободному падению твердого тела в сквозной шахте, проходящей вдоль земной оси.

После загрузки программы на экране монитора появляется активное окно, изображение которого представлено в уменьшенном формате на рис.3.

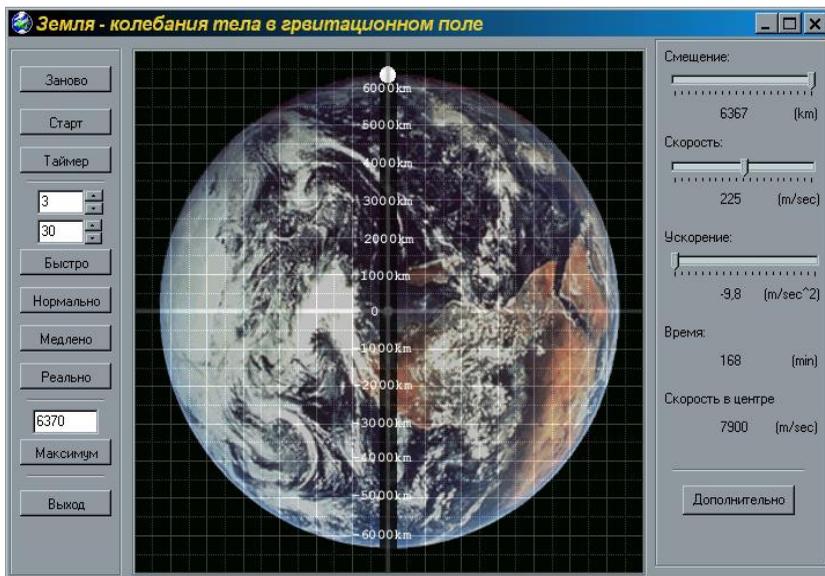


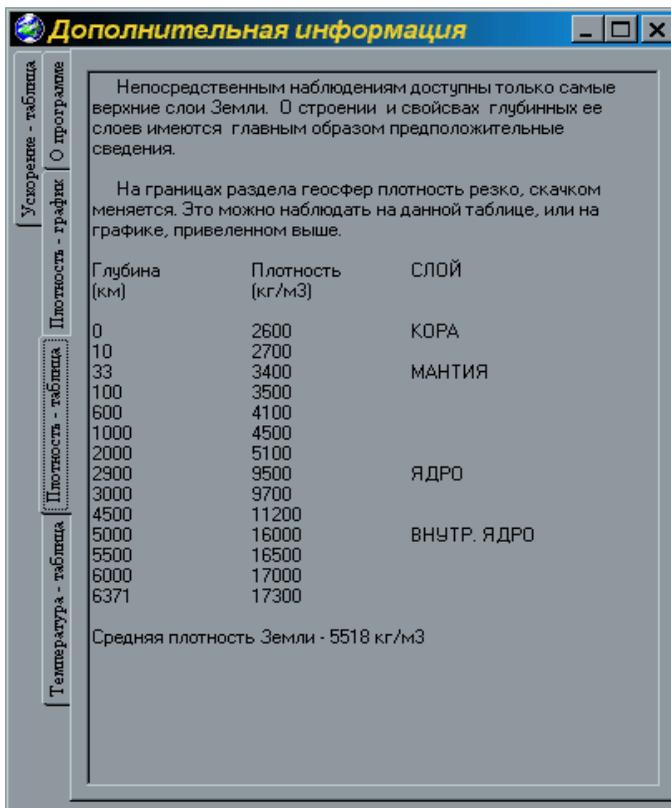
Рис. 3

На левой панели расположены клавиши управления виртуальным экспериментом.

1. Эксперимент начинается нажатием клавиши «Старт», при этом на ее месте появляется клавиша «Пауза».
2. Нажатие клавиши «Пауза» позволяет сделать мгновенную «фотографию» падающего тела.
3. Продолжительность эксперимента можно изменять с помощью клавиш «Быстро», «Нормально», «Медленно» и «Реально». Кроме того, предусмотрена установка продолжительности эксперимента по усмотрению экспериментатора с помощью двух окон, расположенных над клавишей «Быстро».
4. Клавиши «Заново» и «Максимум» позволяют начинать эксперимент сначала. При этом все текущие данные кинематических характеристик обнуляются. Над клавишей «Максимум» в окошке указан радиус Земли.
5. Клавиша «Таймер» позволяет включить секундомер для измерения периода колебаний тела. Клавишу «Таймер» сменяет клавиша «Стоп», которая позволяет остановить секундомер. При этом на экран выводится панель, отображающая время эксперимента и перемещение тела относительно исходного положения тела. Продолжение эксперимента осуществляется нажатием клавиши «Старт».
6. Выход из программы осуществляется после нажатия клавиши «Выход».

На правой панели расположены индикаторы кинематических характеристик тела, отображающие текущие координату, скорость и ускорение в процессе его движения, а также полное время движения тела в туннеле.

Клавиша «Дополнительно» вызывает окно (рис.4), которое знакомит с устоявшимися в науке теориями о строении Земли, представленными в виде таблиц и графиков. На них представлена информация о распределении плотности, температуры и ускорения в различных слоях планеты.



Дополнительная информация

Ускорение - таблица
 Плотность - график
 Плотность - таблица
 Температура - таблица

Непосредственным наблюдениям доступны только самые верхние слои Земли. О строении и свойствах глубинных ее слоев имеются главным образом предположительные сведения.

На границах раздела геосфер плотность резко, скачком меняется. Это можно наблюдать на данной таблице, или на графике, приведенном выше.

Глубина (км)	Плотность (кг/м ³)	СЛОЙ
0	2600	КОРА
10	2700	
33	3400	
100	3500	МАНТИЯ
600	4100	
1000	4500	
2000	5100	ЯДРО
2900	9500	
3000	9700	
4500	11200	ВНУТР. ЯДРО
5000	16000	
5500	16500	
6000	17000	
6371	17300	

Средняя плотность Земли - 5518 кг/м³

Рис. 4

ЗАДАНИЕ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАНЕТЫ.

1. Загрузить программу в оперативную память ЭВМ и вызвать на экран дисплея активное окно.
2. Выбрать продолжительность эксперимента и нажать на клавишу «Старт».
3. Когда тело выйдет на поверхность планеты, включить таймер и посчитать время трех – шести колебаний.
4. Найти период колебаний: $T = \frac{t}{N}$, где t - время N колебаний.
5. Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1

$N =$		$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2)$			
	$t, \text{ с}$	$T, \text{ с}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$\Delta\rho, \text{ кг/м}^3$	$\delta\rho, \%$
1					
2					
3					
4					
5					
ср					

6. Повторить опыт 5 раз.
7. По формуле (6) вычислить плотность планеты для каждого измерения.
8. Вычислить среднее значение плотности планеты $\langle \rho \rangle$.
9. Определить абсолютные погрешности отдельных измерений

$$\Delta\rho_i = |\langle \rho \rangle - \rho_i|.$$

10. Вычислить среднее значение абсолютной погрешности $\langle \Delta\rho \rangle$.
11. Вычислить среднюю относительную погрешность по формуле:

$$\delta\rho = \frac{\langle \Delta\rho \rangle}{\langle \rho \rangle} 100\%.$$

12. Результат представить в виде: $\rho = \langle \rho \rangle \pm \langle \Delta\rho \rangle$.
13. По проделанной работе сделать вывод.

4. Повторять пункт 3 с шагом $\square 1000 \text{ км}$ до центра Земли и далее до координаты $-6,37 \cdot 10^6 \text{ м}$.
5. Занести данные в таблицу 2.
6. Для одного полупериода построить графики зависимостей: $x(t)$, $g(t)$, $v(t)$ в одних осях.
7. Сделать вывод.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что понимают под средней плотностью Земли?
2. Какие допущения необходимы для вывода расчетной формулы?
3. Сделать вывод расчетной формулы.
4. Какие физические величины необходимо измерить в виртуальном эксперименте, чтобы определить плотность Земли?
5. На сколько основных слоев условно разделена планета? Каков состав и физические свойства этих слоев?
6. Для тела, свободно падающего в туннеле, записать законы изменения смещения, скорости, ускорения, квазиупругой силы, потенциальной и кинетической энергий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И.В. Курс физики Т.2. – М: Наука, 2005.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М: Высшая школа, 2019.