



УДК629.12.001.2: 656.66.

А.Ф. Беленов, к.ф.-м.н., доцент ГБОУ ДПО НИРО
603600 г. Нижний Новгород, ул. Ванеева,203

ПРИЛИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АВТОРСКОМ КУРСЕ «АСТРОФИЗИКА»

Ключевые слова: приливные силы, гравитация, прочность, фазы Луны, приливной разрыв.

В статье приведен авторский подбор задач – оценок для старшеклассников и учителей физики и астрономии, касающийся приливных явлений на Земле и в космосе. Цель обучения культуре решения данных задач - это расширение кругозора аудитории в рамках данной темы, а также восполнение дефицита содержания по приливному явлению в существующих учебных программах по физике и астрономии старшей школы.

В связи с введением астрономии как обязательной дисциплины старшей школы возникает вопрос выбора содержания и, соответственно, - учебной литературы. В существующих школьных учебниках изложение темы «приливы» носит весьма обзорный характер и направлено больше на запоминание, чем на понимание физических явлений. Автор сделал попытку актуализировать данную тему на примере постановки исследовательских задач – оценок с целью прогнозирования приливных явлений и выявления ключевых факторов, необходимых для решения этих задач. Представлен опыт разработки материала по теме при проведении курсов переподготовки учителей на базе ГБОУ ДПО НИРО, а также в рамках интерактивных лекций на базе научно – образовательного центра (10-11 классы) при ИПФ РАН (г Нижний Новгород).

Изложению темы «приливы» в авторском курсе предшествует задача – оценка предельной высоты H гор твердотельных планет и спутников солнечной системы [1]. Используя условие равновесия для горы конической формы, учащиеся находят давление P горы на основание конуса:

$$P = \frac{4}{9} \pi G \rho^2 R H$$

где G – гравитационная постоянная, ρ - средняя плотность вещества планеты, R – радиус планеты.

Из условия, что данное давление не может превышать предел прочности Π вещества планеты на сжатие, учащиеся выводят формулу для предельной высоты горы:

$$H = \frac{9\Pi}{4\pi G \rho^2 R}$$

Данная закономерность хорошо согласуется с данными о высотах гор на Земле, Марсе и Венере. А для Меркурия [2] и Луны, несмотря на различия в плотности и пределе прочности, данные о высоте гор сильно расходятся с вышеприведенной формулой. В частности, для Меркурия высота гор не превышает 4 км, причем диаметр этой планеты составляет 0.383 диаметра Земли, а средняя плотность примерно равна плотности Земли.

Таким образом, учащиеся подходят к выводу об ограниченной области применимости формулы – оценки высоты горы, учитывающей только баланс сил притяжения к планете и предельной прочности на сжатие. Поиски общих особенностей расположения для Луны и Меркурия приводят к учету притяжения не только к самой планете, но и к ее «соседям» - в данном конкретном случае это, соответственно, Земля и Солнце. Таким образом, мы подходим к моделированию приливных явлений, вызывающих дополнительное сглаживание гор твердых объектов Солнечной системы.

В 12 –й главе знаменитой книги И. Ньютона «Математические начала натуральной философии» дается следующая формулировка закона всемирного тяготения для двух шарообразных тел: «Два однородных или два состоящих из однородных слоев шара взаимно притягиваются с силою, прямо пропорционально произведению масс обоих шаров и обратно пропорционально квадрату расстояния их центров»[3]. Для того, чтобы выявить ключевые факторы, вызывающие приливные деформации, рассмотрим два шара: 1 (Земля) и 2 (Луна). Мысленно разделим каждый из шаров на половинки:

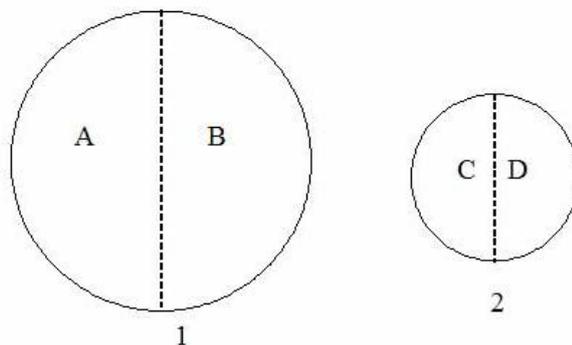


Рис.1 К моделированию приливных сил

Если бы между половинками А и В не было сил сцепления, то при свободном падении шаров друг на друга, половинка А отставала бы от половинки В. Причины такого отставания – разные ускорения свободного падения половинок, в частности, половинка А падает на шар 2 с меньшим ускорением, чем половинка В. Сцепление (молекулярное и гравитационное) половинок – не жесткое, поэтому в результате взаимного притяжения шары А и В должны деформироваться! Рассмотрим более детально, от каких факторов зависят данные деформации, получившие названия *приливных явлений*. Чтобы оценить величину растягивающих сил для шара 1, (в грубой модели), заменим полушария А и В на рисунке выше шарами, с массами, равными половине массы шара 1 и расстояниями между центрами шаров порядка радиуса R_1 шара 1:

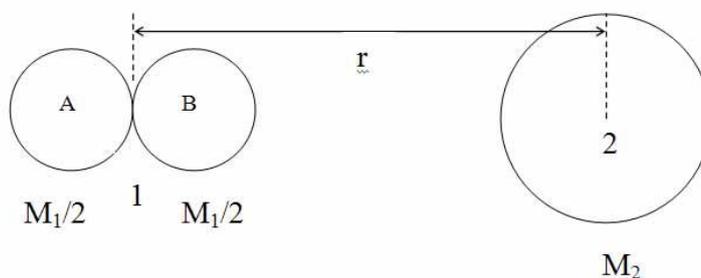


Рис.2 К моделированию приливных сил для объекта M_1

В системе отсчета с центром, совпадающем с центром шара 1 (в нашей модели – это точка соединения шаров А и В – т.е. центр Земли) на половинки А и В, кроме реальных

сил, действует *сила инерции*, равная $\frac{M_1}{2} \frac{GM_2}{r^2}$, направленная от центра шара 2. Используя приближенную формулу при $R_1 \ll r$:

$$\frac{1}{\left(r \pm \frac{R_1}{2}\right)^2} \approx 1 \mp \frac{R_1}{4r^3}$$

учащиеся находят модуль равнодействующей сил притяжения и сил инерции для половинок $M_1/2$ (приливную силу $F_{\text{прил}}$):

$$F_{\text{прил}} \approx \frac{GR_1 M_1 M_2}{2r^3}$$

Последняя формула дает ключ к прогнозированию ряда явлений, вызванных приливными силами. Рассмотрим некоторые из них, на уровне постановки задач – оценок для учащихся.

1. Наибольшие и наименьшие морские приливы.

Перед аудиторией ставятся следующие задачи:

1. Сравните количественно $F_{\text{пр}}$ от Солнца и от Луны (найдите их отношение).

Необходимые данные:

Масса Солнца = $2.7 \cdot 10^7$ масс Луны

Расстояние от Земли до Луны = $2.6 \cdot 10^3$ расстояния от Земли до Солнца.

2. Учитывая совместное влияние Солнца и Луны, изобразите взаимные положения этих светил (и Земли) для наибольшей и наименьшей $F_{\text{пр}}$. Каковы для этих случаев местное время и видимость Луны в областях наибольших и наименьших приливов)?

Несмотря на кажущуюся простоту поставленных задач, учащиеся нередко делают ошибки, недооценивая влияние Солнца и неверно указывая взаимные расположения светил (задача 2). Оценка соотношения $\frac{M_{\text{Солнца}} r_{\text{Луны}}^3}{M_{\text{Луны}} r_{\text{Солнца}}^3} \approx 0,5$ показывает важность учета

влияния Солнца на земные приливы. Учитывая независимость $F_{\text{прил}}$ от положения M_2 (справа или слева от M_1), можно сделать прогноз наибольших приливов и отливов в новолуние и полнолуние, а также наименьших приливов и отливов, когда Луна и Солнце находятся в квадратурах (видимость Луны – первая и третья четверти). Возможно, ошибки аудитории вызваны чересчур кратким изложением данной темы в современных школьных стандартах [4],[5].

3. Приливный разрыв.

«Когда мы говорим о явлении расщепления или развала, то интуитивно подразумеваем на два или, в крайнем случае, на несколько осколков. Но комета Шумейкеров-Леви 9 предстала перед нами в виде непрерывной цепочки, состоящей из 21 осколка (некоторые ученые считают, что их было 25).» [6]. Это – случай, когда приливные силы, воздействующие на ядро кометы, соизмеримы с силами сцепления «половинок» кометного тела. Перед аудиторией ставится задача:

Сравните силы гравитационного и молекулярного сцепления «половинок» кометы.

Необходимые данные:

Радиус кометы $R_d = 1$ км

Гравитационная постоянная $G = 6.67 \cdot 10^{-11}$ (СИ)

Предел прочности Π на разрыв материала кометы – порядка 10^3 (СИ)

Плотность ρ вещества кометы – порядка 10^3 (СИ)

Решение этой задачи – приоритет сил «гравитационного сцепления». Далее – аудитории дается следующая задача:

Оцените расстояние между Землей и кометой, при котором тело начнет разрываться. Данные о Земле: радиус = 6400 км, средняя плотность = $6 \cdot 10^3$ (СИ)

Приравнивая приливные силы силам гравитационного сцепления «половинок» кометы, учащиеся оценивают предельную высоту разрыва – порядка радиуса Земли. Более фантастической, но приведенной в художественной литературе, выглядит посадка человека на «железную звезду». Речь идет об отрывке из известного романа Ефремова И.А. «Туманность Андромеды». [7]. Автора нельзя упрекнуть в отсутствии научной грамотности, так как теория такого типа звезд (нейтронные звезды) появилась позже [8]. Благодаря малому размеру r_n нейтронной звезды (порядка 10 км) при массе звезды порядка массы Солнца ($M_n \approx 2 \cdot 10^{30}$ кг) на астронавта (массой $M_ч \approx 100$ кг, и размером $R_ч \approx 1,5$ м) на поверхности «железной звезды» будет действовать приливная сила:

$$F_{пр\ n} \approx GM_ч M_n R_ч / 2r_n^3 \approx 10^{10}_n !!!$$

Даже хром – молибденовая сталь не выдержит такой нагрузки (если принять площадь сечения астронавта порядка $0,5$ м²). Поэтому, для современных скафандров такая посадка представляется весьма экзотической.

В заключение, хотелось бы отметить важность интерактивной работы с аудиторией (вместо «начитывания» лекций – совмещение практической работы с излагаемым материалом). По опыту преподавания в аудиториях учителей и старшеклассников можно сделать вывод о плодотворности такого способа изложения материала. Можно надеяться, что такая методика будет полезна и для студентов, осваивающих основы астрономических знаний.

Список литературы:

- [1] Вайскопф В. Современная физика в элементарном изложении. Высота гор определяется фундаментальными физическими постоянными. /Успехи физических наук. т.103,вып.1, 1971 г.,с162 -165.
- [2] Ксанфомалити Л.В. Неизвестный Меркурий . /В мире науки. 2008. N 2. С. 64-73
- [3] Розенбергер Ф. /История Физики. Часть вторая, стр.225. Государственное технико – теоретическое издательство Москва 1933Ленинград.
- [4] Воронцов – Вельяминов Б.А.,Страут Е.К. Астрономия./Учебник 11 класс. Москва. Дрофа.2018г, с.77-78.
- [5] Чаругин В. М. Астрономия./Учебник 10-11 классы. Москва. Просвещение. 2018 г.с.57-59
- [6] Сайт <http://www.astronet.ru/db/msg/1210256>, ГАИШ, МГУ
- [7] Ефремов И.А. Туманность Андромеды. Роман/ Издательство ЦК ВЛКСМ « Молодая Гвардия, М. 1958.
- [8] Landau L D "On the theory of stars" *Collected Papers of L D Landau* (Ed. D ter Haar) (London: Pergamon, 1965) p. 60

TIDAL PHENOMENA IN ASTROPHYSICS COURSE

A.F. Belenov

Key words: tidal forces, gravity, solidity, moon phase, tidal break.

The article is the author's selection of tasks for high school students and teachers of physics and astronomy, on tidal phenomena on Earth and in space. The purpose of education address these challenges is the expansion of horizons of the audience in the context of the topic, as well as the shortfall of tidal phenomena in existing curricula in physics and astronomy senior high school.