

Уважаемые читатели!

Подписка на электронные версии журналов не дает подписчику права на их дальнейшее распространение без письменного согласия правообладателя. Любое распространение подписчиками электронной версии запрещается. ООО «Школьная Пресса» является правообладателем всех редакционных материалов, опубликованных в печатных СМИ и (или) размещенных в интернет-проектах соответствующих СМИ, кроме материалов, в содержании которых имеется ссылка на другого правообладателя. Продолжив работу с электронной версией, вы тем самым соглашаетесь с вышеизложенным.



научно-методический журнал

ISSN 0130-5522

6 2022

ФИЗИКА В ШКОЛЕ



Стандартная модель и бозон Хиггса

Как образуется радуга?

Раздел «Астрономия»

Реликтовое излучение: современные исследования с помощью наземных телескопов и перспективы на будущее

**НЕ
ЗАБУДЬТЕ
ПОДПИСАТЬСЯ
НА ЖУРНАЛ
ПО КАТАЛОГУ
«ПОЧТА
РОССИИ»!**

Интересные инженерные сооружения

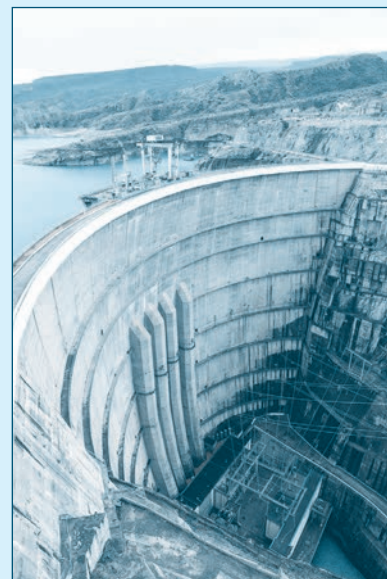
В октябре 2021 года начался мировой энергетический кризис. Идут большие дискуссии о безопасности того или иного источника энергии. Уже очевидно, что альтернативные источники энергии не так хороши, как это могло бы показаться. Отчасти к альтернативным источникам можно отнести гидроэлектростанции, хотя они влияют на всю экосреду рек, преграждая пути для рыб и животных. Тем не менее, пока не предложены лучшие инженерные решения, использование таких станций будет продолжаться. Многие из гидроэлектростанций были построены с использованием оригинальных конструктивных решений. Так Чиркейская ГЭС имеет самую высокую арочную плотину

Чирке́йская ГЭС находится на реке Сулак у поселка Дубки, в Буйнакском районе Дагестана. Это самая мощная гидроэлектростанция на Северном Кавказе. Она имеет вторую по высоте плотину в России. Гидроэлектростанция входит в Сулакский каскад ГЭС, являясь его верхней, регулирующей весь каскад ступенью



Сулакский каньон

Бетонная арочная плотина имеет длину по гребню 338 м и наибольшую высоту 232,5 м — это вторая по высоте плотина в России (после плотины Саяно-Шушенской ГЭС, имеющей не чисто арочную, а арочно-гравитационную конструкцию) разделена на 18 секций бетонирования шириной по 16 м



Водоводы Чиркейской ГЭС



НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С МАЯ 1934 г.

ФИЗИКА В ШКОЛЕ

Образован в 1934 году Наркомпросом РСФСР. Учредитель — ООО «Школьная Пресса». Журнал выходит 8 раз в год

ДОСТИЖЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ

- **Л.Н. Смирнова, В.В. Кудрявцев**
Стандартная модель и бозон Хиггса 3

МЕТОДИКА. ОБМЕН ОПЫТОМ

- **Н.Ю. Шалденков, Б.А. Комаров, Д.Р. Костицын, А.В. Сбоева**
Обучение основам общеориентировочного анализа
условия физической задачи. 12
- **О.Ф. Кабардин, С.И. Кабардина**
И снова о законе Архимеда 20
- **Г.М. Чулкова, А.И. Елантьев**
Как образуется радуга? 31

Педагогические технологии

- **Л.А. Бордонская, Е.А. Игумнова, С.С. Серебрякова**
Образовательное событие интегрированного характера —
научное шоу «Создай атмосферу» (онлайн-формат). 38

Информационные технологии

- **В.Ф. Очков**
Маятник-сердце 46

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ

- **Ф.М. Сабирова, А.М. Имамова**
Использование метода ключевых ситуаций при обучении решению задач
по физике в VIII классе (на примере темы «Тепловые явления») 55

АСТРОНОМИЯ

► М.Ю. Королев

Реликтовое излучение: современные исследования
с помощью наземных телескопов и перспективы на будущее 59



Журнал рекомендован Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Министерства образования и науки Российской Федерации в перечне ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.
Журнал зарегистрирован в базе данных Российского индекса научного цитирования.
Распространяется в печатном и электронном виде.

Главный редактор **Е.Б. Петрова**, д.п.н., доцент / **Petrova, E.B.** DrSci in Education, Associate Professor
Редактор **Э.М. Браверман**, к.п.н. / **Braverman, E.M.** PhD in Education
Зав. редакцией **Е.Б. Перская** / **Perskaya, E.B.**

Состав редколлегии

Демидова М.Ю. , д.п.н., доцент	Demidova M.Yu. , DrSci in Education, Associate Professor
Засов А.В. , д.ф.-м.н., академик МАН, профессор	Zasov A.V. , DrSci of Physics and Mathematics, Academician of the MAS, Professor
Королев М.Ю. , д.п.н., к.ф.-м.н., доцент	Korolev M.Yu. , DrSci in Education, PhD of Physics and Mathematics, Associate Professor
Майер В.В. , д.п.н., профессор	Mayer V.V. , DrSci in Education, Professor
Наумов А.В. , д.ф.-м.н., доцент, профессор РАН	Naumov A.V. , DrSci of Physics and Mathematics, Professor Russian Academy of Sciences
Никифоров Г.Г. , к.п.н., ведущий научный сотрудник	Nikiforov G.G. , PhD in Education, Leading researcher
Пентин А.Ю. , к.ф.-м.н.	Pentin A.Yu. , PhD of Physics and Mathematics
Плахотник Т.В. , к.ф.-м.н., приват доцент, школа математики и физики университета Квинсленда, Австралия	Plakhotnik T.V. , PhD of Physics and Mathematics, privat-docent, school of mathematics and physics, University of Queensland, Australia
Сауров Ю.А. , д.п.н., профессор, член-корреспондент РАО	Saurov Yu.A. , DrSci in Education, Professor, Associate member RAE
Ханнанов Н.К. , к.х.н.	Khannanov N.K. , PhD in chemical Sciences
Царьков И.С. , к.т.н., зам. директора	Tsarkov I.S. , PhD in Technology, associate Director
Чулкова Г.М. , д.ф.-м.н., доцент	Chulkova G.M. , DrSci of Physics and Mathematics, Associate Professor

ООО «Школьная Пресса»

Корреспонденцию направлять по адресу: 127254, г. Москва, а/я 62

Тел.: 8 (495) 619-52-87, 619-52-89.

Интернет [http:// www.школьнаяпресса.рф](http://www.школьнаяпресса.рф) E-mail: fizika@schoolpress.ru

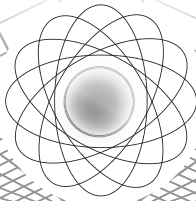
Формат 84×108/16. Усл. п. л. 4,0. Изд. № 3684. Заказ

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-38550 от 21.12.09.

Издание охраняется Гражданским кодексом РФ (часть 4). Любое воспроизведение материалов, размещенных в журнале, как на бумажном носителе, так и в виде ксерокопирования, сканирования, записи в память ЭВМ, и размещение в Интернете запрещается.

Отпечатано в АО «ИПК «Чувашия», 428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, д. 13.

© ООО «Школьная Пресса», © «Физика в школе», 2022, № 6



ДОСТИЖЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ И БОЗОН ХИГГСА

Л.Н. Смирнова , д.ф.-м.н., профессор, МГУ, участник эксперимента ATLAS и открытия бозона Хиггса; lidia.smirnova@cern.ch	L.N. Smirnova , DrSci (Physics and Mathematics), Professor, MSU, participant in the ATLAS experiment and the discovery of the Higgs boson Moscow; lidia.smirnova@cern.ch
В.В. Кудрявцев , д.ф.-м.н., профессор, МПГУ, Москва; kudV-V@yandex.ru; kudV-V@yandex.ru	V.V. Kudryavtsev , DrSci (Physics and Mathematics), Professor, MSPU, Moscow; kudV-V@yandex.ru
Ключевые слова: Стандартная модель, Большой адронный коллайдер (БАК), эксперименты ATLAS и CMS, бозон Хиггса, хиггсовское поле, механизмы рождения бозона Хиггса, реакции распада бозона Хиггса	Keywords: the Standard Model, the Large Hadron Collider (LHC), ATLAS, CMS experiments, the Higgs boson, the Higgs field, the Higgs boson production mechanisms, the Higgs boson decay reactions
Рассказано об истории открытия бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере. Обсуждаются особенности детекторных установок ATLAS и CMS, с помощью которых была впервые зарегистрирована новая частица, соответствующая бозону Хиггса в Стандартной модели. Рассмотрены свойства бозона Хиггса и направления их дальнейших исследований	The history of the discovery of the Higgs boson at the Large Hadron Collider is told. The features of the ATLAS and CMS detectors, which were used to detect a new particle corresponding to the Higgs boson in the Standard Model, are discussed. The properties of the Higgs boson and the directions of their further research are considered
УДК 372.853	DOI 10.47639/0130-5522_2022_6_3

Фундаментальные частицы Стандартной модели

В основе современной микрофизики лежит Стандартная модель (СМ) [1, 2] — теория, которая единым образом описывает фундаментальные электромагнитное, слабое и сильное взаимодействия, а также набор фундаментальных частиц — кварков и лептонов. Описание этих трех типов взаимодействий осуществляется с помощью квантовой калибровочной теории поля. Взаимодействие частиц осуществляется путем обмена квантами поля или частицами-переносчиками взаимодействий. Они также входят в число фундаментальных частиц СМ.

На рисунке 1 показаны фундаментальные частицы СМ: 6 типов кварков, 6 типов лептонов и частицы-переносчики взаимо-

действий [3, 4]. Для электромагнитного взаимодействия переносчиком является фотон, обозначаемый символом γ . Слабое взаимодействие, ответственное в первую очередь за радиоактивность, осуществляется за счет обмена заряженными векторными бозонами W^+ и W^- и нейтральным Z -бозоном. Переносчиками сильного взаимодействия являются глюоны, обозначаемые символом g .

Все частицы-переносчики фундаментальных взаимодействий являются векторными частицами, т.е. имеют собственный момент количества движения — спин, равный 1. При этом они различаются по электрическому заряду и массе. Фотон и глюоны, как и Z -бозон, имеют нулевой электрический заряд. Массы фотона и глюона равны нулю, тогда как векторные $W^\pm$ - и Z -бозоны

КВАРКИ	масса → заряд → спин →	$\approx 2.3 \text{ МэВ}/c^2$ $2/3$ $1/2$ u верхний	$\approx 1.275 \text{ ГэВ}/c^2$ $2/3$ $1/2$ c очарованный	$\approx 173.07 \text{ ГэВ}/c^2$ $2/3$ $1/2$ t истинный	0 1 g глюон	$\approx 126 \text{ ГэВ}/c^2$ 0 0 H бозон Хиггса
		$\approx 4.8 \text{ МэВ}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d нижний	$\approx 95 \text{ МэВ}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s странный	$\approx 4.18 \text{ ГэВ}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b прекрасный	0 0 1 γ фотон	
		$0.511 \text{ МэВ}/c^2$ -1 $1/2$ e электрон	$105.7 \text{ МэВ}/c^2$ -1 $1/2$ μ мюон	$1.777 \text{ ГэВ}/c^2$ -1 $1/2$ τ тау	0 1 Z Z бозон	
		$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e электронное нейтрино	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ мюонное нейтрино	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ тау нейтрино	$80.4 \text{ ГэВ}/c^2$ ± 1 1 W W бозон	
ЛЕПТОНЫ		КАЛИБРОВАННЫЕ БОЗОНЫ				

Рис. 1. Фундаментальные частицы

Стандартной модели. Источник:

https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Standard_Model_of_Elementary_Particles_ru.svg&oldid=510617356

являются массивными частицами. Их массы составляют для W -бозонов, независимо от знака их заряда, 80 ГэВ, а для Z -бозона — 91 ГэВ. Векторные $W^\pm$ - и Z -бозоны были открыты в 1983 г. на коллайдере SPS в Европейской лаборатории элементарных частиц ЦЕРН (Женева, Швейцария).

Установлено, что электромагнитные и слабые взаимодействия являются проявлением единого стандартного электрослабого взаимодействия. Оно описывается в рамках теории электрослабого взаимодействия. Теорией сильных взаимодействий является квантовая хромодинамика. С помощью единой электрослабой теории различие между большими массами переносчиков слабого взаимодействия и нулевой массой фотона было определено как нарушение электрослабой симметрии. Однако необходимо было найти источник нарушения этой симметрии, а также ответить на вопрос, откуда возникают массы у кварков и лептонов.

Для решения этих важнейших вопросов был предложен целый ряд теорий. Наибольшую популярность приобрела теория, в которой предполагалось существование

нового дополнительного скалярного квантового поля [5]. Оно отличается от векторного типа полей, квантами которых являются, например, $W^\pm$ - и Z -бозоны, γ и g . Существование такого скалярного поля, как источника нарушения электрослабой симметрии, было предложено в 1960-х гг. тремя группами ученых: Франсуа Энглемером (р. 1932) и Робертом Браутом (1928–2011), Питером Хиггсом (р. 1929) и Джеральдом Гуральником (1936–2014), Карлом Хагеном (р. 1937) и Томасом Кибблом (1932–2016). Этому полю соответствовала новая нейтральная скалярная частица, аналога которой среди известных частиц не было (в частности, ее спин был равен нулю и пространственная четность положительная). П. Хиггс первым обратил внимание на возможность существования такой частицы, в результате ей было присвоено его имя — *бозон Хиггса*. В 2013 г. Ф. Энглемеру и П. Хиггсу была вручена Нобелевская премия по физике за его предсказание [6].

Открытие бозона Хиггса на Большом адронном коллайдере

Период подготовки к открытию

Поиск бозона Хиггса сразу стал приоритетной задачей физических исследований, проводившихся на ускорителях, в первую очередь на коллайдерах. Уже в 1980-х гг. возник проект создания Большого адронного коллайдера (БАК) в ЦЕРН [7]. Помимо создания ускорителя для столкновения протонов с энергией в системе центра масс 14 ТэВ (два пучка протонов с энергией 7 ТэВ каждый) проект включил в себя строительство двух больших детекторных установок ATLAS и CMS. С их помощью планировалось зарегистрировать гипотетическую частицу, соответствующую бозону Хиггса.

Расчеты, выполненные в рамках Стандартной модели, позволяли определить вероятность рождения этой частицы, вероятности разных типов ее распадов в зависи-

мости от того, какая масса у этой частицы. Однако величину самой массы теория не могла предсказать.

В 1970-х гг. появились теоретические аргументы, указывающие на то, что масса бозона Хиггса должна быть меньше 1 ТэВ. До запуска БАК в ходе экспериментальных работ было установлено, что она больше 114,4 ГэВ. Этот результат был получен на LEP в ЦЕРН на момент его закрытия с целью размещения в туннеле этого электрон-позитронного коллайдера магнитов БАК. Исследования на коллайдере Теватрон в Фермиевской национальной ускорительной лаборатории (Фермилабе) США, где в 1995 г. был открыт шестой и самый тяжелый t -кварк с массой 173 ГэВ, позволили установить, что отсутствуют новые нейтральные частицы с массами в интервалах значений 100–103 ГэВ и 147–180 ГэВ.

Особенности установок ATLAS и CMS

Создаваемые в рамках проекта БАК установки ATLAS и CMS были способны обнаружить бозон Хиггса в диапазоне масс от 100 ГэВ до 1 ТэВ. При этом было необходимо учесть особенности типов распада этой частицы в разных диапазонах масс и не только зарегистрировать рождение новой частицы, но и выделить ее из большого потока фоновых событий, т.е. рождений и распадов других уже известных частиц.

Ключевыми частицами для регистрации в детекторах являются заряженные лептоны — мюоны и электроны, а также фотоны. Распад на два фотона актуален для поиска бозона Хиггса с малой массой, если она меньше 200 ГэВ. Помимо высокой точности измерения энергии и углов вылета фотонов было важно отделить одиночные фотоны, которые не являются продуктами распада адронов — нейтральных пи-мезонов π^0 , распадающихся на два фотона, η - и ω -мезонов и др. Для фотонов от таких распадов характерны близкие углы вылета при высокой энергии адронов. В экспериментах было важно различать такие пары фотонов, а это

требовало высокого пространственного разрешения при их измерении.

Условия для проведения быстрых и высокоточных измерений энергии и направлений вылета фотонов выполнялись в электромагнитных калориметрах установок ATLAS и CMS, которые имели при этом совершенно разные конструкции. Это различие защищало эксперимент от возможных неучтенных источников погрешностей при измерениях.

Высокая точность измерений энергий и углов вылета электронов и мюонов актуальна для поиска бозона Хиггса в диапазоне масс от 200 до 500 ГэВ, где ожидалось преобладание его распадов на четыре лептона. Эти лептоны могли быть одного типа (только 4 мюона $\mu\mu\mu\mu$ или только 4 электрона $eeee$), при этом возможны их парные комбинации (два мюона и два электрона — $\mu e e e$), в том числе с участием нейтрино и антинейтрино ($e e$, $\mu\mu$, $e\mu$ в сопровождении пары $\nu\bar{\nu}$ соответствующих типов лептонов — электронных, мюонных или тау-лептонов).

Если энергия электронов измеряется в тех же электромагнитных калориметрах, что и энергия фотонов, и они легко различаются, то мюоны пролетают сквозь калориметры, практически не теряя энергии. Их импульсы измеряются в магнитном поле мюонных спектрометров, составляющих внешнюю оболочку установок. Например, магниты такого спектрометра в ATLAS определяют большие размеры всего детектора. Задачей мюонных спектрометров является измерение импульсов мюонов со сравнимой высокой точностью в широком диапазоне импульсов: от нескольких ГэВ/с до 1 ТэВ/с.

При расчетах инвариантных масс пар лептонов выделяются события с рождением Z -бозона. Около 10% Z -бозонов распадаются с равной вероятностью на два электрона, два мюона или два тау-лептона с разноименными электрическими зарядами. Отметим, что Z -бозоны могут рождаться как независимо, так и в результате распада бозона Хиггса,

т.е. быть промежуточными состояниями при его распаде. Поэтому важно было измерить инвариантные массы двух и четырех таких лептонов.

В случае если промежуточными частицами в распадах бозона Хиггса были W^+ и W^- -бозоны, часть энергии уносилась нейтрино от их распадов, которые вылетали за пределы установок. В поперечной пучку плоскости их энергия компенсирует суммарную энергию зарегистрированных частиц.

Для поиска бозона Хиггса с самыми большими массами (более 500 ГэВ) требуются более сложные комбинации сигналов, поступающих со всех детекторов, в первую очередь от адронных калориметров. Они регистрируют струи адронов, образуемые кварками и глюонами высоких энергий. Бозон Хиггса с массой более 500 ГэВ может распадаться не только на пары WW и ZZ , но и на пары топ–анти–топ ($t\bar{t}$) кварков, каждый из которых распадается на W и b -кварк, образующий адронную струю. Реакции распадов можно записать в виде:

$$t \rightarrow W^+b, \bar{t} \rightarrow W^-b.$$

Вероятности рождения таких тяжелых бозонов Хиггса существенно меньше, чем в области меньших масс, поэтому для регистрации W - и Z -бозонов от их распада важно регистрировать не только лептоны, но и адронные струи. На распады W - и Z -бозонов с образованием таких струй приходится 70% от всех их распадов.

Отметим, что вероятность (сечение) рождения бозона Хиггса уменьшается с увеличением его массы, соответственно требуется осуществить больше протонных соударений для его регистрации.

Открытие бозона Хиггса

Бозон Хиггса, обозначаемый символом H , с массой 125 ГэВ удалось открыть уже на третий год работы БАК, а именно в 2012 г. Об открытии новой частицы было объявлено на 36-й Международной конференции по физике высоких энергий ICHEP2012, про-

ходившей в Мельбурне (Австралия) 4 июля 2012 г.

Заседание конференции проходило одновременно с семинаром ЦЕРН в Женеве, причем оба мероприятия транслировались в режиме видеоконференции. Доклады о результатах экспериментов были сделаны руководителями экспериментов ATLAS и CMS: от ATLAS — Фабиолой Джианотти, являющейся сейчас Генеральным директором ЦЕРН¹; от CMS — Джозефом Инканделлом.

Сигнал новой частицы наблюдался в виде избытка событий в области масс 125–126 ГэВ на уровне погрешности более пяти стандартных отклонений². Вероятность отсутствия сигнала, т.е. возможность считать это случайным выбросом, составляла порядка 10^{-9} ! [8].

Важнейший аргумент состоял в том, что совпали наблюдения двух независимых экспериментов (ATLAS и CMS). Кроме того, сигналы наблюдались для нескольких вариантов распада новой частицы. Наиболее отчетливо сигнал регистрировался для распадов на два фотона (γ) и на лептоны (l, ν):

$$H \rightarrow \gamma\gamma; \quad (1)$$

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l; \quad (2)$$

$$H \rightarrow WW^* \rightarrow 2l2\nu. \quad (3)$$

Звездочка (*) в символах W^* и Z^* означает, что частица виртуальная, т.е. ее мас-

¹ В 2021 г. Ф. Джианотти было присвоено звание почетного профессора МГУ.

² Стандартное отклонение (среднеквадратичное отклонение) σ_x — характеристика случайных отклонений измеренной величины от среднего значения. Вероятность того, что измеренное значение величины X случайным образом окажется отличающимся на $5\sigma_x$ от истинного, составляет всего 0,00006%. Поэтому в физике элементарных частиц отклонение сигнала от фона на 5σ («пять сигма» — это 99,9999% вероятности неслучайного результата) считают достаточным для признания сигнала истинным.

са не соответствует массам W - и Z -бозонов (намного меньше масс векторных бозонов). Новая частица оказалась скалярной, так как присутствие сигнала в распаде на два фотона отвергало возможность наличия спина частицы, равного единице. Статьи об обнаружении частицы, которая соответствовала бозону Хиггса СМ, были опубликованы в декабре 2012 г. в журнале *Physics Letters B*, а затем в этом же месяце в журнале *Science* вышли в свет три статьи, посвященные этому открытию.

Тем самым была открыта дорога к более надежному и детальному определению свойств новой частицы. Важно отметить, что все публикации результатов экспериментов БАК, в том числе и по исследованиям бозона Хиггса, находятся в открытом доступе.

Свойства бозона Хиггса

Специалисты ведут исследования свойств хиггсовского бозона по следующим направлениям [5]:

- выявление всех возможных механизмов образования и распада этой частицы;
- повышение точности измерений массы частицы и квантовой неопределенности ее значения (энергетической ширины состояния);
- измерение множества констант, характеризующих взаимодействия различных элементарных частиц с полем Хиггса.

К настоящему времени на БАК проведено два сеанса работы. В ходе первого сеанса 2010–2012 гг. с энергиями соударения протонов 7 и 8 ТэВ был открыт бозон Хиггса и проведены первые измерения его массы. Во втором сеансе 2015–2018 гг. энергия соударения протонов достигла 13 ТэВ и количество осуществленных столкновений этих частиц в 5,5 превысило соответствующее количество в первом сеансе! Новые данные позволяют с уверенностью утверждать, что открытая в 2012 г. частица является бозоном Хиггса, предсказанным в рамках СМ.

Измеренное значение массы составляет $125,10 \pm 0,14$ ГэВ. Только задумайтесь, насколько было сложно идентифицировать бозон Хиггса. Событий от распада бозона Хиггса оказалось менее 10 в каждом эксперименте, а выделены они из 10^{14} взаимодействий протонов!

В процессах (1)–(3) распад новой частицы происходит на бозоны. Таким образом, подтверждается, что бозон Хиггса вызывает нарушение электрослабой симметрии. Другим словами, он ответственен за наличие массы у векторных W - и Z -бозонов. Распады на кварки и лептоны, которые демонстрировали ответственность бозона Хиггса за наличие у них массы, были найдены в ходе дальнейших исследований на БАК.

Величину сигнала бозона Хиггса в распаде на 4 лептона (l) или два Z -бозона можно сравнить, используя рисунок 2. На нем показаны зарегистрированные события с рождением новой частицы в распределении по инвариантной массе четырех заряженных лептонов в первом сеансе работы БАК при 7 и 8 ТэВ и во втором сеансе при энергии соударений 13 ТэВ. На оси ординат показано количество событий («Events»). Точки соответствуют экспериментальным данным («Data»), гистограммы — модельным расчетам для событий рождения одного или двух Z -бозонов и бозона Хиггса с массой 125 ГэВ (это максимумы при значении массы четырех лептонов m_{llll}).

Из приведенных гистограмм видно, что найденных бозонов Хиггса во втором сеансе стало намного больше, чем в первом и на момент открытия. Увеличение количества событий распада позволило надежно определить квантовые числа этой частицы, которые оказались соответствующими ожидаемым для бозона Хиггса СМ. Расчеты выполнены при анализе угловых распределений лептонов в распаде (2):

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l.$$

Важнейшей характеристикой бозона Хиггса является сравнение наблюдаемых сечений рождения частицы, соотношения

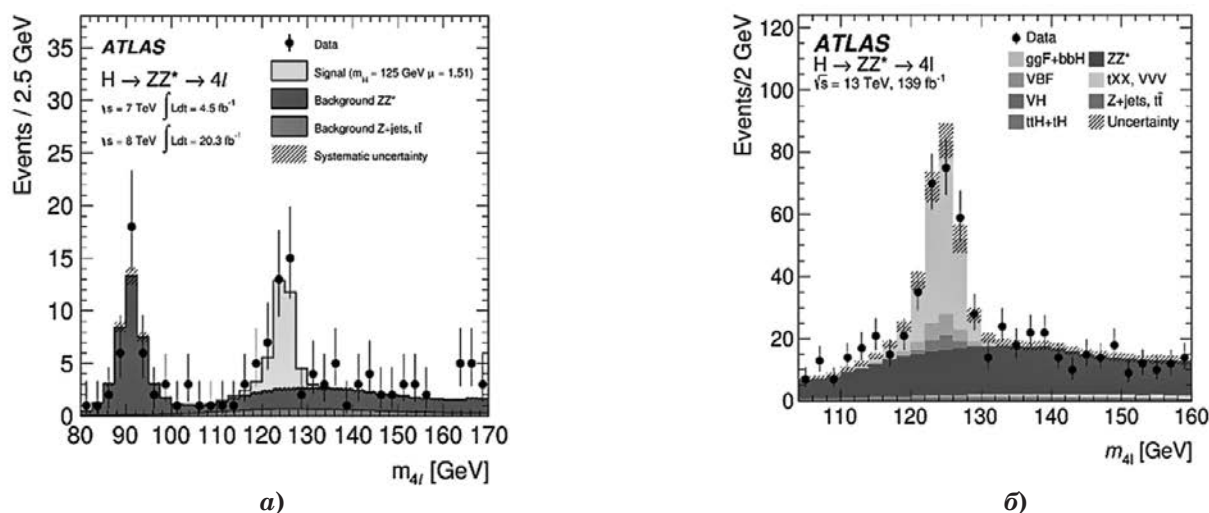


Рис. 2. Распределения по инвариантной массе четырех лептонов m_{4l} , полученные по результатам первого (а) и второго (б) сеансов работы БАК в эксперименте ATLAS

вероятностей разных каналов распада, механизмов ее рождения, с рассчитанными в рамках СМ.

Отношение количества найденных экспериментально распадов новой частицы к количеству рассчитанных для бозона Хиггса СМ называют *силой сигнала*. Ее обозначают буквой μ . Согласие с расчетом соответствует $\mu = 1$. При этом в экспериментах точность этого равенства постоянно увеличивается. Например, для событий, приведенных на рисунке 2б, при энергии соударений 13 ТэВ величина $\mu = 1,01 \pm 0,11$, что соответствует 98,6% согласия результатов эксперимента и предсказаний СМ.

В настоящее время основная задача состоит в повышении точности измерения силы хиггсовского сигнала и увеличении количества наблюдаемых каналов распада новой частицы. На основе анализа новейших результатов для величины μ в распаде (1) на два фотона, полученных в эксперименте CMS, было получено значение $\mu = 1,12 \pm 0,09$.

Результаты измерений сечений рождения бозона Хиггса в протонных взаимодействиях на БАК представлены на рисунке 3.

В ходе экспериментов на БАК выполнено исследование механизмов рождения бозона

Хиггса в СМ. Основным механизмом является процесс слияния двух глюонов, на него, например, в pp -соударениях при 8 ТэВ приходится 88% всех рождений.

Рождение бозона Хиггса при слиянии двух векторных бозонов ($W^\pm, Z$) является более редким процессом. Его доля составляет 6,8%. Особенностью таких протонных взаимодействий является присутствие двух дополнительных струй от кварков высокой энергии, вылетающих в противоположные стороны в направлениях, близких к направлениям пучков протонов. Бозон Хиггса при этом образуется в центральной области события. Сила сигнала для такого механизма согласуется с предсказанным в СМ, как и для механизмов слияния глюонов.

Отметим, что в экспериментах наблюдаются и еще более редкие механизмы рождения бозона Хиггса, в том числе ассоциированное рождение. При таком процессе происходит рождение бозона Хиггса совместно с образованием векторного бозона $W^\pm$ - или Z -бозона, t -кварка или с образованием пары b и $\bar{b}$ -кварков или топ-кварков t и $\bar{t}$. При этом последний механизм совместного рождения $t\bar{t}H$ также инициируется слиянием пары глюонов. Все эти механизмы уже об-

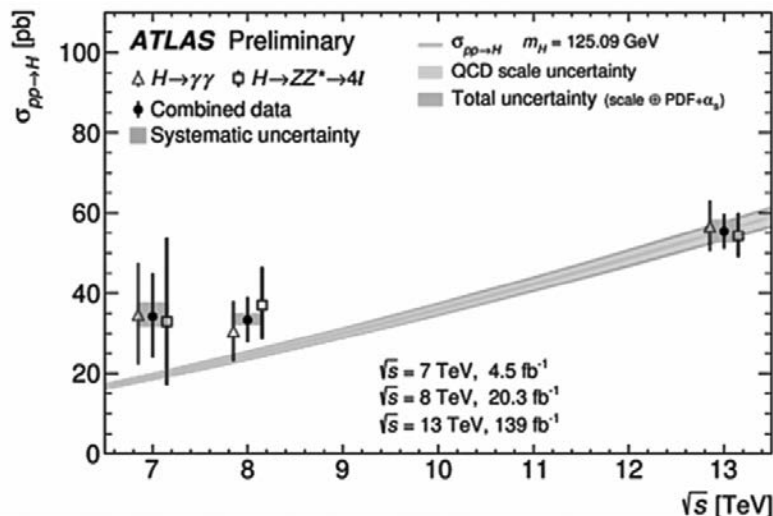


Рис. 3. Полные сечения процесса $pp \rightarrow H + X$ для энергий pp -взаимодействий при энергиях 7, 8 и 13 ТэВ, измеренные в эксперименте ATLAS. Треугольниками показаны измерения распадов H на два фотона $H \rightarrow \gamma\gamma$, прямоугольники относятся к измерениям распадов бозона Хиггса на 4 заряженных лептона $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$, точки соответствуют усредненным значениям двух измерений. Линия отображает предсказания СМ для массы бозона Хиггса $m_H = 125,09$ ГэВ, ее ширина показывает теоретические неопределенности предсказаний массы этой частицы

наружены, и их вероятности соответствуют предсказаниям СМ.

Наблюдение бозона Хиггса в сочетании с двумя топ-кварками позволяет выделить некоторые его трудно наблюдаемые распады, например, на пару b и $\bar{b}$ -кварков, которое имеет большую вероятность, но практически не выделяется на общем фоне рождения струй.

К настоящему времени установлены все основные механизмы рождения бозона Хиггса и основные реакции его распада. Смысл этих наблюдений состоит в том, что по ним определяется соответствие свойств открытой частицы свойствам бозона Хиггса СМ. Для каждого значения массы m_H все эти сечения и относительные вероятности различных распадов рассчитаны в рамках СМ. Задача эксперимента состояла в определении массы m_H , а затем — в доказательстве совпадения свойств открытой частицы рассчитанным свойствам бозона Хиггса СМ. Таким образом, наблюдения и исследования таких процессов позволяют рассчитывать констан-

ты связи бозона Хиггса с частицами, которые в свою очередь определяют массы фундаментальных частиц.

На рисунке 4 показано, как измеренные значения данных констант соотносятся с массами частиц. Представлены объединенные результаты экспериментов ATLAS и CMS по данным первого сеанса (рис. 4а) и результаты, полученные в эксперименте ATLAS во втором сеансе (рис. 4б). Линия на каждом из рисунков соответствует предсказанию СМ. В нижней части рисунка 4б приведено отношение измеренных констант к расчетным значениям в СМ. При достигнутой точности измерений наблюдается согласие с предсказаниями СМ.

Отметим, что чем сильнее взаимодействует частица с хиггсовским полем, тем больше масса этой частицы. Это взаимодействие можно представить, например, как движение большого корабля и маленькой лодки против течения воды: большой корабль испытывает большее сопротивление потока. Это соответствует большему размеру и

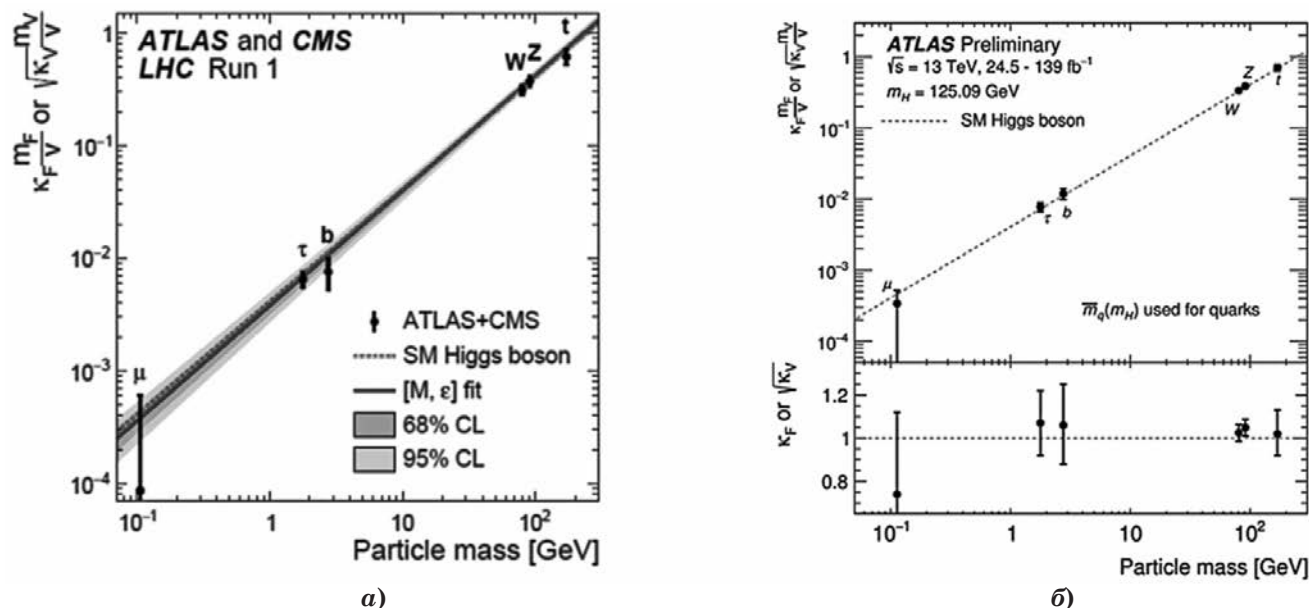


Рис. 4. Приведенные значения констант связи $k_F m_F/v$ для фермионов F ($F = t, b, \tau, \mu$) и $\sqrt{k_V} m_V/v$ для векторных бозонов ($V = W, Z$) как функция масс m_F и m_V , соответственно, при значении вакуумного среднего поля Хиггса $v = 246$ ГэВ. Пунктиром показаны предсказания СМ. В нижней части рисунка 4б показаны отношения измеренных и рассчитанных значений в рамках СМ

массе корабля по сравнению с маленькой и легкой лодкой.

Бозон Хиггса является квантом хиггсовского поля, «разлитого» равномерно по всей Вселенной. Оно связано с понятием физического вакуума, который не является абсолютной пустотой, а соответствует наиболее низкому энергетическому состоянию физических полей, пронизывающих пространство. Будучи скалярным, хиггсовское поле не создает выделенного направления, какое имеют векторные поля электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий.

В отличие от этих полей напряженность хиггсовского поля всюду отлична от нуля. При взаимодействии с фундаментальными частицами оно наделяет их массой, величина которой пропорциональна потенциалу хиггсовского поля, умноженному на константу взаимодействия частицы с этим полем (рис. 4). Предсказываемое время жизни бозона Хиггса составляет $1,6 \cdot 10^{-22}$ с. В эксперименте пока получены нижние границы

этой величины, которые не противоречат предсказанию СМ.

Итак, к известным фундаментальным взаимодействиям — электромагнитному, слабому, сильному и гравитационному — теперь добавляется хиггсовское, которое в 10^{34} раз сильнее гравитационного. Взаимодействие с полем Хиггса наделяет массами $W^\pm$ - и Z векторные бозоны, оставляя при этом фотон с нулевой массой. Поле Хиггса дает массы кваркам и лептонам, но массы протона и нейтрона, как и других адронов, возникают за счет сильного взаимодействия между кварками и глюонами.

Перспективные исследования бозона Хиггса

Не все характеристики бозона Хиггса СМ удалось измерить. К ним относится, например, время его жизни, величина которого обратно пропорциональна энергетической ширине состояния. Наиболее важной характеристикой для теории можно считать

константу взаимодействия между бозонами Хиггса λ_H . Для ее измерения нужно найти случаи одновременного рождения двух бозонов Хиггса. Вероятность появления таких событий чрезвычайно мала. Для их наблюдения потребуется длительный период работы БАК и накопления количества соударений протонов в 20 раз большего, чем собрано во втором сеансе. Накопление данных позволит повысить точность уже проведенных измерений, измерить более редкие реакции распада бозона Хиггса.

Кроме того, ведется поиск новых частиц, принадлежащих классу бозонов Хиггса, которые предсказываются в моделях, отличных от СМ. Например, в модели суперсимметрии может существовать пять бозонов Хиггса, в том числе имеющих электрический заряд. До сих пор поиск таких частиц не привел к их открытию, устанавливаются только границы исключения для возможных масс. Обнаружение подобных экзотических частиц может привести к пересмотру и переоценке роли уже открытого бозона Хиггса.

Для проверки СМ измеряются процессы совместного рождения бозона Хиггса с другими тяжелыми частицами (W^+ - и W^- - и Z -бозоном, t -кварками) и фотонами. Анализ таких процессов для поиска новых явлений проводится с применением квантовой теории поля. Кроме того, применяются новые методы анализа данных путем многопеременных алгоритмов, таких как нейронные сети.

Свойства бозона Хиггса важны для сравнения с другими параметрами СМ, например, массой t -кварка, измерения которой продолжаются в настоящее время. Сопоставление ее с массой бозона Хиггса позволяет установить внутреннюю согласованность СМ. Значения этих масс определяют свойства взаимодействий частиц при энергиях, которых никогда не удастся достичь на Земле, стабильность или нестабильность нашей Вселенной в целом.

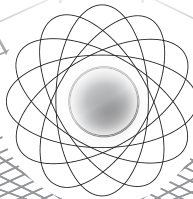
Современные значения масс бозона Хиггса и t -кварка соответствуют положе-

нию «на острие ножа» между стабильным и нестабильным состояниями Вселенной. Увеличение массы t -кварка, например, в масштабе 1 ГэВ, приводит к нестабильному характеру Вселенной, и остается не ясным, как она просуществовала до нынешнего состояния в течение 14 млрд лет после Большого взрыва.

Резюмируя, отметим, что физике элементарных частиц предстоит ответить еще на многие вопросы, с которыми не может справиться СМ. В конце 2022 г. начнется третий сеанс работы БАК, который позволит продвинуться в их решении.

Литература

1. Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Юдин Н.П. Частицы и атомные ядра. — М.: URSS, 2019. — 672 с.
2. Ядерная физика в Интернете (проект кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ). — [Электронный ресурс]. — URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/index.html>.
3. Смирнова Л.Н., Кудрявцев В.В. Стандартная модель — фундамент современной микрофизики. Элементарные частицы // Физика в школе. 2020. № 4. С. 3–12.
4. Смирнова Л.Н., Кудрявцев В.В. Стандартная модель — фундамент современной микрофизики. Фундаментальные взаимодействия // Физика в школе. 2020. № 5. С. 3–13.
5. Ильин В.А., Кудрявцев В.В., Смирнова Л.Н. Магистральные направления физики XXI века: Физика технологий будущего для будущих физиков и инженеров: Современная микрофизика. — М.: ЛЕНАНД, 2021. — 304 с.
6. Нобелевская премия по физике — 2013. — [Электронный ресурс]. — URL: https://elementy.ru/novosti_nauki/432106.
7. Проект «Большой адронный коллайдер». — [Электронный ресурс]. — URL: <http://elementy.ru/LHC>.
8. Рубаков В.А. К открытию бозона Хиггса. — [Электронный ресурс]. — URL: https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431961/K_otkrytiyu_bozona_Khiggsa.



МЕТОДИКА. ОБМЕН ОПЫТОМ

ОБУЧЕНИЕ ОСНОВАМ ОБЩЕОРИЕНТИРОВОЧНОГО АНАЛИЗА УСЛОВИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

Н.Ю. Шалденков , бакалавр, РГПУ им. А.И. Герцена, ГБОУ СОШ № 163, г. Санкт-Петербург; nik.shaldenkov@yandex.ru	N.Y. Shaldenkov , Herzen State Pedagogical University of Russia, school № 163, St. Petersburg; nik.shaldenkov@yandex.ru
Б.А. Комаров , к.п.н., доцент, РГПУ им. А.И. Герцена, г. Санкт-Петербург; ba_komarov@mail.ru	B.A. Komarov , DrSci (Pedagogy), Associate professor, Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg; ba_komarov@mail.ru
Д.Р. Костицын , бакалавр, РГПУ им. А.И. Герцена, г. Санкт-Петербург; dimar.2907@gmail.com,	D.R. Kostitsyn , Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg; dimar.2907@gmail.com,
А.В. Сбоева , бакалавр, РГПУ им. А.И. Герцена, г. Санкт-Петербург; alenushka-sboeva@mail.ru	A.V. Sboeva , Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg; dimar.2907@gmail.com
Ключевые слова: обучение физике, решение задач, анализ условия задачи	Keywords: teaching physics, problem solving, problem condition analysis
В статье представлены некоторые результаты корректировки механизмов реализации подхода к обучению основам общеориентировочного анализа условия физической задачи как компоненту обучения обобщенным правилам решения задач	The article presents some results of the adjustment of the mechanisms for implementing the approach to teaching the basics of general orientation analysis of the physical problem condition as a component of learning generalized rules for solving problems
УДК 372.853	DOI 10.47639/0130-5522_2022_6_12

Перед современной школой ставятся задачи формирования как предметных и личностных, так и ряда метапредметных результатов освоения образовательных программ, в числе которых умение учащихся самостоятельно планировать пути достижения целей, умения осознанно выбирать наиболее эффективные способы решения учебных и познавательных задач, самостоятельно определять цели и составлять планы деятельности. Иными словами, требуется научить школьника самостоятельно формировать последовательность действий, наиболее подходящую для решения каждой конкретной задачи, и не только физи-

ческой, а решение задач на уроках физики — один из важнейших инструментов для формирования такого рода метапредметных умений.

Однако практика преподавания показывает, что учащиеся часто не могут наметить общую стратегию, алгоритм решения задачи и, в частности, на первых этапах решения самостоятельно и осознанно выбрать физический закон, применение которого необходимо для анализа явления или процесса, рассматриваемого в условии задачи [1, 2, 5].

Указанные затруднения можно отнести к проблемам прохождения этапа решения

задачи, называемого общим анализом условия. Важнейшее значение в данном случае приобретает первая ступень этого этапа: общеориентировочный анализ условия, в ходе которого в сознании решающего формируется своеобразный набросок, эскиз, первичная модель физической картины задачи [4, 5].

Одной из причин этих затруднений может считаться банальное незнание материала учащимся. В этом случае практически полностью исключается возможность самостоятельного анализа условия задачи на всех его ступенях. Мы же сосредоточимся на ситуации, в рамках которой учащийся ознакомлен с программным материалом по соответствующему разделу применительно к рассматриваемой задаче, но не способен эти знания использовать на практике.

Причина такого несоответствия может состоять в формальном восприятии действий, направленных на обучение общеориентировочному анализу условия, что приводит к снижению темпов формирования умения самостоятельно выстраивать физическую картину задачи, ибо не сформулированы основные результаты обучения общеориентировочному анализу условия задачи, что важно с позиции стратегических целей современного образовательного процесса.

Необходимо подчеркнуть, что одной из важнейших задач обучения общеориентировочному анализу является формирование умений самостоятельно выстраивать последовательность действий, соответствующую процессу определения физической картины задачи.

Несформированность основ механизмов достижения этой цели переводит обучение общеориентировочному анализу в разряд сопутствующего результата, достигаемого спонтанно, обычно за счет решения большого количества задач и демонстрации готовых алгоритмов выполнения некоторых типов заданий, что порождает проблемы, связанные, в частности, с отсутствием необходимой мобильности (междисциплинарности) формируемых механизмов. Естествен-

но возникает и неспособность применить свои знания для формирования алгоритма решения задачи. Важно выстроить общую стратегию обучения общеориентировочному анализу условия задачи, что весьма затруднительно в связи с отсутствием общего для всех задач алгоритма решения.

В качестве одного из возможных путей решения обозначенной проблемы следует рассмотреть смещение акцента с преподавания уже готовой последовательности действий, составляющих решение задачи, на обучение наиболее общим, базовым правилам, в соответствии с которыми формируется указанная последовательность действий. Предполагается, что формирование методических разработок, содержащих компактное описание общих закономерностей, определяющих ход рассуждений, производимых в процессе общеориентировочного анализа, может значительно облегчить стоящую перед учителем задачу построения теоретически обоснованной системы работы по обучению основам общеориентировочного анализа, как составляющей обучения обобщенным правилам решения физических задач.

Формирование общих правил общеориентировочного анализа, как некоторого механизма деятельности, требует выявления действий, применяемых при анализе условий максимального количества задач, т.е. своеобразного универсального познавательного механизма. Вычленив алгоритм действий, обеспечивающий преодоление трудности каждой конкретной задачи, даже в рамках одного учебного предмета, представляется весьма проблематичным. В то же время, мыслительные операции (обобщенные приемы умственной деятельности), как и универсальные методы научного познания, применяются для решения практически любой задачи, как учебной, так и бытовой или профессиональной [3]. Мы рассматриваем возможности выявления закономерностей применения мыслительных операций в процессе решения задач, в частности, на этапе общеориентировочного ана-

лиза условия. С этой целью модель такого анализа предлагается представить графически в виде структурно-логической схемы. Пример возможного вида такой схемы для весьма распространенного хода рассуждений при решении ряда расчетных задач в рамках раздела «Динамика» представлен на рисунке 1.

На схеме показан один из вариантов, в соответствии с которым может выстраиваться логика решения задачи при анализе ее условия. Следует отметить, что такой ход мысли иногда критикуется из-за того, что в данном случае решающий задачу сконцентрирован на нахождении неизвестной величины, ради поиска которой и форми-



i - идентификация; *a* – абстрагирование; *A* – абстракция (результат)

Рис. 1. Примерная логическая модель общеориентировочного анализа условия одной из типов задач в рамках темы «Динамика»

руется физическая картина задачи. Между тем, в разделе «Динамика» встречаются задачи, в рамках которых проблема может быть совершенно иной, и к ним данный алгоритм применим в меньшей степени. На наш взгляд, начинать решение задачи все же необходимо с того, чтобы представить общую картину задачи [1, 4]. В этом и заключается общеориентировочный анализ как первая ступень анализа условия физической задачи [4, 5].

Представленные таким образом логические модели общеориентировочного анализа позволяют продемонстрировать не только знания, которые используются на разных этапах решения задачи, но и выявить аспекты применения как одной мыслительной операции, так и их совокупности. Структурно-логическая схема позволяет представить причинно-следственные связи, выявить иерархическую соподчиненность в применении различных мыслительных операций в ходе решения задачи и, в частности, при общеориентировочном анализе ее условия [5]. Естественно, что представленная схема в большей степени подходит для использования во внеурочное время, однако на этапах обучения теории решения задач она может быть предложена и на уроке в трансформированном, упрощенном виде.

В процессе обучения важны и связи между различными мыслительными операциями, применяемыми в ходе решения задачи, и последовательное накопление объема данных о том, в каком именно месте решения и как часто применяется та или иная операция. Поэтому целесообраз-

ным видится формирование модели решения такой задачи, которая отразила бы и логику действий, и их формальную последовательность, и содержание (как физическое, так и методологическое). Назовем это «**содержательной моделью решения задачи**». Такую модель можно представить в виде таблицы, в одном из столбцов которой будут указаны действия, производимые в ходе решения задачи, а в другом — этим действиям сопоставлялись бы мыслительные операции, за счет которых они были сделаны. Примерный вид такой таблицы представлен на рисунке 2.

В качестве примера рассмотрим содержательную модель решения задачи № 3 (упражнение 17) из учебника А.В. Пёрышкина для 7 класса, тема: «Расчет давления жидкости на дно и стенки сосуда» (смотреть пример 1).

Особенностью этой задачи является отсутствие в ее условии указания на какой-то конкретный механизм решения, на конкретную формулу, которую необходимо использовать в решении. Без обстоятельного анализа условия и аккуратного *самостоятельного* построения физической картины эту задачу решить весьма сложно, а потому она, как и другие подобные задачи, представляет для нас особый интерес: в ее решении несколько проще выделить действия, связанные с анализом условия задачи и, в частности, с общеориентировочным анализом.

Мы не будем рассматривать мыслительные операции, осуществляемые в ходе решения (действие 4), так как это не является

Задача №_		
Условие:		
№ действия	Содержание действия:	Мыслительная операция:

Рис. 2. Содержательная модель решения задачи

Пример 1

Задача № 3, упражнение 27 (А.В. Пёрышкин, 7 класс)

Условие. На рисунке 113 изображена футбольная камера, соединенная с вертикально расположенной стеклянной трубкой. В камере и трубке находится вода. На камеру положена дощечка, а на нее — гири массой 5 кг. Высота столба воды в трубке 1 м. Определите площадь соприкосновения дощечки с камерой



Рис. 113

Действие	Содержание действия	Мыслительная операция
1	Чтение условия, рассмотрение рисунка с целью понять: «О чем задача?». Выявляются главные «действующие лица» в задаче. В данном случае это гири и вода, заполняющая камеру, трубку	Преобладает процесс <u>идентификации</u> знаковых объектов, позволяющих установить тематическую принадлежность задачи
2	Выявление физического процесса, явления рассматриваемого в задаче. В этом особенно помогает изучение рисунка. Учащийся приходит к выводу, что условие задачи можно представить в следующем виде: «Сила давления жидкости (воды) в камере компенсирует вес гири, поэтому вся система находится в равновесии». Интересно, что на данном этапе трубка и футбольная камера уже рассматриваются фактически как единое тело, форма которого не существенна. В то же время это сосуд, обладающий определенной высотой, что является важным свойством для дальнейшего решения	Выявление ключевых свойств системы и <u>абстрагирование</u> от ее несущественных особенностей очевидно может быть рассмотрено как процесс моделирования . В этом случае, как и в предыдущем действии, производится множество не столь очевидных вспомогательных операций, не вошедших в таблицу из-за трудности выявления
3	Делается вспомогательный рисунок, изображающий указанное выше <i>соображение</i> . Также можно сделать математическую запись: $F_{\text{давл.ж.}} = P_{\text{гири}}$	В данном случае используется обобщенный прием учебной работы: <u>перенос</u> полученных из анализа условия выводов на различные их формы представления. В то же время <u>абстрагирование</u> позволяет сделать рисунок проще, свернуть запись условия к краткой математической модели
4 (Решение)	После того, как физическая картина задачи построена и связана с математической моделью в виде записи $F_{\text{давл.ж.}} = P_{\text{гири}}$, <u>основная идея</u> , которую нужно сделать в решении задачи, напрашивается сама собой: необходимо рассмотреть, чему равен вес гири, чему равна сила давления жидкости, приравнять эти выражения и из получившегося равенства выразить площадь дощечки, на которую оказывает давление камера с водой. Эта площадь и будет площадью соприкосновения дощечки с камерой	

предметом рассмотрения в данной публикации, однако отметим, что в решении прослеживается применение сочетания аналитического и синтетического методов решения. В данном случае имеет место традиционное разделение единой физической картины задачи на две (или более) и дальнейшее соединение результатов их решения, производимое с целью нахождения искомой величины.

Таким образом, применение «содержательных моделей решения задачи» позволяет вести работу по накоплению данных о месте и частоте применения мыслительных операций в решении различных физических задач.

Но даже беглый взгляд на таблицу из примера 1 позволяет сделать иной **вывод**, весьма важный не только для занимающегося теорией методики обучения, но и для практикующего педагога: *основная идея решения задачи приходит одновременно и уже содержит в себе совокупность дальнейших действий, необходимых для решения задачи*. В рамках представленной задачи (как и многих других физических задач) математические действия, которые останутся в тетради учащихся, не являются ключевыми. *Основной тезис, позволяющий преодолеть трудность задачи, формируется между 3 и 4 действием на базе результатов анализа физической картины задачи, который невозможен без ее предварительного построения, рассмотренного в 1–3 действиях*. И именно такое **ключевое соображение** очень часто оказывается **незафиксированным в записи решения: идею «держат в голове», пока решают задачу**. Учащиеся забывают ее после урока и часто не могут воспроизвести при выполнении домашнего задания или на следующих занятиях.

Восстановить ключевую идею решения задачи оказывается трудно в частности из-за того, что при записи решения в тетради не была достаточно полно зафиксирована физиче-

ская картина задачи, сформированная в ходе анализа ее условия. В данном случае невозможно не вспомнить о семиотических механизмах, которые во многом и определяют механизмы реализации.

Чтобы убедиться в последнем, предлагаем обратиться к двум возможным вариантам записи решения рассмотренной выше задачи.

Вариант записи № 1

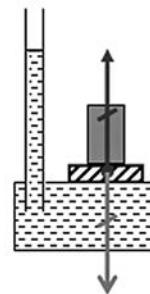
Дано:

$$m = 5 \text{ кг}$$

$$h = 1 \text{ м}$$

в камере и трубке — вода,
система в равновесии

$$S = ?$$



Решение:

$$1) p_{\text{воды}} = \frac{F_{\text{давл}}}{S},$$

следовательно $F_{\text{давл}} = p_{\text{воды}} S$, где

$$p_{\text{воды}} = \rho g h = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot 1 \text{ м} = 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2};$$

$$2) P_{\text{гири}} = mg = 5 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} = 50 \text{ Н};$$

3) Так как $F_{\text{давл}} = P_{\text{гири}}$ можно записать так $p_{\text{воды}} S = P_{\text{гири}}$, следовательно

$$S = \frac{P_{\text{гири}}}{p_{\text{воды}}} = \frac{50 \text{ Н}}{10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}} = 10^{-3} \text{ м}^2 = 50 \text{ см}^2.$$

Ответ: $S = 50 \text{ см}^2$.

Вариант записи № 2

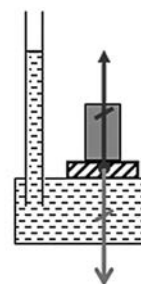
Дано:

$$m = 5 \text{ кг}$$

$$h = 1 \text{ м}$$

в камере и трубке — вода,
система в равновесии

$$S = ?$$



Решение.

Сила давления жидкости в камере компенсирует вес гири. Дощечка в равновесии. Значит:

$$F_{\text{давл}} = P_{\text{гири}}.$$

$$1) p_{\text{воды}} = \frac{F_{\text{давл}}}{S}, \text{ следовательно}$$

$$F_{\text{давл}} = p_{\text{воды}} S,$$

где

$$p_{\text{воды}} = \rho gh = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} \cdot 1 \text{ м} = 10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2};$$

$$2) P_{\text{гири}} = mg = 5 \text{ кг} \cdot 10 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} = 50 \text{ Н};$$

3) Так как $F_{\text{давл}} = P_{\text{гири}}$ можно записать так $p_{\text{воды}} S = P_{\text{гири}}$, следовательно

$$S = \frac{P_{\text{гири}}}{p_{\text{воды}}} = \frac{50 \text{ Н}}{10^4 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}} = 10^{-3} \text{ м}^2 = 50 \text{ см}^2.$$

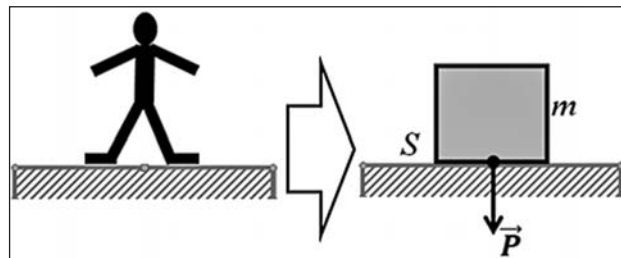
Ответ: $S = 50 \text{ см}^2$.

Второй вариант записи позволяет значительно быстрее восстановить логику решения задачи, понять почему и откуда откуда в решении появляется формула гидростатического давления или формула веса гири. Достигается это на основе *краткого словесного пояснения* рисунка. Следует отметить, что на рисунке уже изображено то, что написано словами, однако для учащегося этого далеко не всегда достаточно: школьник еще не чувствует, на какой именно элемент рисунка надо обратить особое внимание, кроме того, связь между рисунком и действием 1 или 2 (вариант записи № 1) не очевидна.

Из приведенных рассуждений можно сделать вывод о том, что *при оформлении задач следует особое внимание обращать на фиксацию моментов, связанных с построением физической картины задачи*. Этого можно добиться в частности при помощи добавления к «Дано» и чертежу краткой записи, поясняющей ситуацию, рассма-

триваемую в задаче. Некие сходные пояснения в позиции, предшествующей краткой записи условия, рекомендовали делать еще Д.А. Александров и И.М. Швайченко в «Методике решения задач по физике в средней школе» 1948 года [1]. И тем не менее, эта рекомендация нередко ускользает от внимания учителей.

С целью фиксации процесса анализа условия сначала можно предложить осуществить его краткую словесную запись, используя обычную, бытовую терминологию, и лишь затем ее «переформулировать для урока физики» и записать в тетради, что объединит оба приведенных выше подхода. Тогда расположение этих двух записей видится следующим: либо первая перед словом «Дано» и чертежом, вторая — после (наиболее рационально, когда цель — показать процесс появления идеи решения задачи), либо две рядом (чтобы показать переход от одной к другой). Покажем, как это может быть реализовано (см. рис. 3).



Мальчик массой m стоит на полу

Физическое тело массой m оказывает своим весом (P) давление (p) на некоторую площадь S

Рис. 3. Приемы, направленные на фиксацию результатов анализа условия задачи

Следует отметить, что глубина абстрагирования при формировании словесной записи физической модели задачи должна быть продиктована соображениями необходимой достаточности. Так, вовсе не обязательно в краткой словесной записи условия

именовать мальчика физическим телом, если того не требует дальнейшее решение. Подобные действия лишь отвлекут от сути задачи и в дальнейшем затруднят анализ ответа в случае, если цель — довести решение задачи до конца, но, все же, могут быть вполне полезными и естественными, если учитель ставит перед собой цель — показать насколько мы можем абстрагироваться от свойств того или иного объекта.

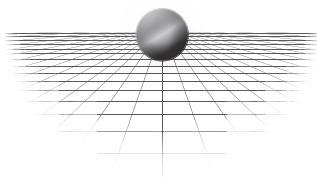
Принимая во внимание вполне конкретные выводы относительно логики решения задачи, сделанные по результатам содержательной модели ее решения, можно с уверенностью заключить, что подобные модели позволяют не только отразить последовательность действий в решении задачи, их физическое и методологическое содержание, но и вполне успешно восстановить взаимосвязи между действиями. Появляются некоторые основания предполагать, что составление содержательной модели решения задачи может способствовать вскрытию рассуждений первых этапов, реализуемых традиционно на подсознательном уровне. Изучение возможностей выявления и фиксации именно таких рассуждений особенно важно, так как именно в них (см. пример 1) очень часто заключается основная идея решения задачи, то есть важнейший элемент решения задачи с точки зрения обучения физике.

Таким образом, обсуждение представленных способов выявления и фиксации различных аспектов содержания решения задачи позволяет не только выявить последовательность применения мыслительных

операций в решении задачи, но и рассмотреть процесс решения задачи с несколько необычного ракурса. Необходимо подчеркнуть весьма важные перспективы использования данного подхода практикующими педагогами, ибо методологическая компетентность субъектов образовательного процесса, формируемая в процессе применения указанных механизмов, оказывает положительное влияние на освоение программного материала по физике и, в силу своей универсальности, на освоение содержания образования в целом.

Литература

1. Александров П.А., Швайченко И.М. Методика решения задач по физике в средней школе. — Л.: Учпедгиз, 1948. — 238 с.
2. Балаш В.А. Задачи по физике и методы их решения. Пособие для учителя. — М.: Просвещение, 1983г. — 432 с.
3. Комаров Б.А. Целенаправленное формирование ключевых методологических компетенций в рамках современного школьного физического образования// Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2012. № 144. С. 148–158.
4. Савелова Е.В. Материалы для подготовки к семинарским занятиям. Рукописи, предоставленные Б.А. Комаровым. — С. 3–4.
5. Шалденков Н.Ю., Комаров Б.А. Обучение основам общеориентировочного анализа условия физической задачи. Физика в школе и вузе: международный сборник научных статей. Выпуск 23. — СПб.: Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена. 2021. — 244 с.

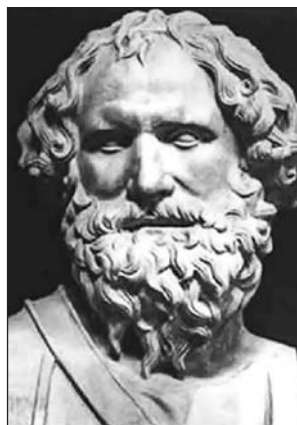


И СНОВА О ЗАКОНЕ АРХИМЕДА

О.Ф. Кабардин , к.ф.-м.н., д.п.н., профессор	O.F. Kabardin , PhD (Physics and Mathematics), DrSci (Pedagogy), Professor
С.В. Кабардина , к.п.н., г. Черноголовка; kabardinof@mail.ru	S.I. Kabardina , PhD (Pedagogy), Chernogolovka; kabardinof@mail.ru
Ключевые слова: закон Архимеда; история открытия закона Архимеда; следствия из закона Архимеда; практикум по решению задач; выталкивающая сила Архимеда, действующая на тела в воздухе и воде; вес человека в воздухе и воде; плавание тел в воде и воздухе	Keywords: Archimedes principle; history of the discovery of Archimedes principle; consequences of Archimedes principle; practicum on solving problems; Archimedes buoyant force, affecting a body in air or water; the weight of a person in air or water; floating of objects in water and air
В статье представлен вариант изучения закона Архимеда на уроках физики с целью «присвоения» учащимися знаний о силе Архимеда. Данный набор задач практикума позволит учащимся осознать постоянное действие силы Архимеда на все тела на Земле в сравнении с действием силы тяжести. Материал статьи поможет учителю разнообразить работу в классе и организовать внеклассную работу по решению задач и самостоятельному эксперименту учащихся	This article presents law study option of Archimedes principle for the purpose of appropriation knowledge about of Archimedes force. This set of workshop tasks will allow students to understand permanent action of Archimedes force on to all objects on Earth in comparison with the force of gravity. The material of this article will help the teacher diversity the work in the classroom and organize extracurricular work on solving problems and work on an independent experiment of students
УДК 372.853	DOI 10.47639/0130-5522_2022_6_20

Статья основана на тексте из учебника «Физика 7» Кабардина Олега Федоровича первого издания 2007 года. В 2021 году вышло в свет девятое издание этого учебника — предметная линия «Архимед» издательства «Просвещение».

К учителю



Архимед

«Закон Архимеда» — тема, которая предоставляет возможность не только обнаружить и почувствовать силу Архимеда экспериментально, но и решать интересные качественные и количественные задачи.

Возможный вариант организации дополнительной работы — **практикум по решению задач**.

Приведенный здесь вариант практикума включает формулировку общей проблемы,

обращение к справочным материалам и экспериментам и решение задач.

Практикум предполагает индивидуальную и групповую работу учащихся.

Для разминки юным любителям физики Об истории открытия закона Архимеда

ПРОБЛЕМА

Римский архитектор и механик Витрувий, живший во времена Юлия Цезаря, рассказывал следующее: «Правитель Сиракуз Гиерон, окончив благополучно одно очень важное для него дело, возымел намерение принести в жертву богам одного из храмов золотой венец. Он заказал мастеру за большую цену сделать этот венец и дал ему золото на вес. Мастер представил свою работу, которая очень понравилась Гиеро-

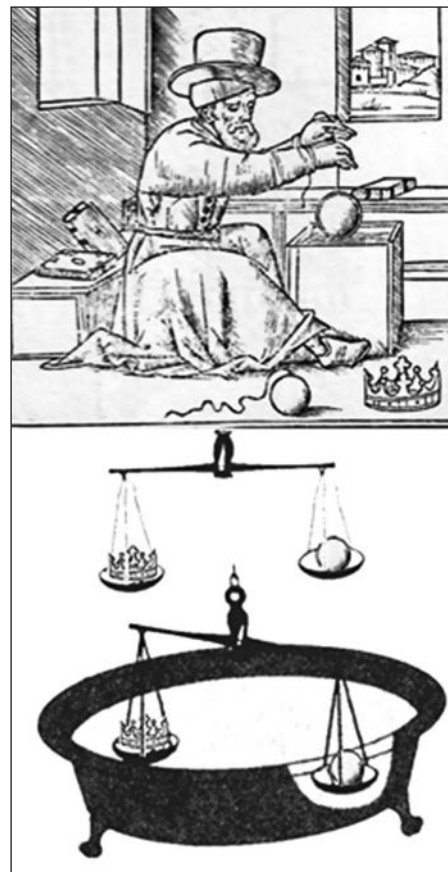
ну, и венец оказался по весу точно равным весу выданного золота. Но вскоре возникли подозрения, что ювелир украл часть золота и добавил серебро. Гиерон был сильно разгневан возможным обманом, но не знал, каким способом уличить мастера в краже. Он попросил Архимеда найти такой способ».

ЭКСПЕРИМЕНТ

Однажды Архимед, находясь в ванне и размышляя об этом, случайно заметил: при погружении его в ванну вода переливается через края. Это обстоятельство навело ученого на идею о связи вытесненного объема и веса жидкости. Немедля и в чрезвычайной радости, забыв одеться, Архимед выбежал и, направляясь к своему дому, закричал: «Эврика!», что по-гречески значит «Нашел!».

После этого открытия Архимед заказал два слитка, каждый такого же веса, какой имел венец: один слиток из золота, а другой из серебра. Сначала он погрузил в сосуд, доверху наполненный водой, серебряный слиток, который по мере погружения вытеснил некоторое количество воды, соразмерное своему объему. Измерив количество воды, вышедшее из сосуда, он узнал, какое количество воды соответствует слитку серебра известного веса. После этого ученый погрузил в сосуд, доверху наполненный водой, слиток золота, измерил количество вытекшей воды и нашел, что слиток золота вытеснил воды меньше на такую величину, на которую меньше объем золотого слитка против серебряного. Потом он опять наполнил водой сосуд и погрузил туда венец, который вытеснил больше воды, чем при погружении слитка золота такого же веса как венец. Таким образом, Архимед узнал, что в золото было подмешано серебро, и ясно показал обман мастера.

Архимед не ограничился описанным экспериментом, а изобрел точные весы, позволившие определить, сколько золота и сколько серебра содержится в венце, не нарушая его формы.



ЗАДАЧА О ЗОЛОТОМ ВЕНЦЕ

Вы познакомились с историей открытия знаменитого закона. Представьте теперь себя на месте Архимеда и найдите, сколько золота при изготовлении венца мастер заменил серебром, если масса венца 2 кг, массы золотого и серебряного слитков точно такие же. При погружении в воду золотой слиток вытеснил 207 см^3 воды, серебряный слиток вытеснил 381 см^3 воды, венец вытеснил 240 см^3 воды.

СРАВНИТЕ ВАШЕ РЕШЕНИЕ С ПРИВЕДЕННЫМ НИЖЕ

В венце массой m и объемом V_B часть объема занимает золото объемом V_3 , а часть — серебро объемом V_c :

$$V_B = V_3 + V_c \quad \Rightarrow \quad V_c = V_B - V_3. \quad (1)$$

Объемы золота и серебра в венце V_3 и V_c выразим через массы золота и серебра

в венце и плотности золота ρ_3 и серебра ρ_c . Содержащуюся в изделии массу серебра обозначим x . Тогда масса золота в венце равна $m - x$. Выразим объемы серебра и золота в нем через их массы и плотности:

$$V_c = \frac{x}{\rho_c}, \quad V_3 = \frac{m - x}{\rho_3}. \quad (2)$$

Подставим правые части формул (2) в формулу (1):

$$\begin{aligned} \frac{x}{\rho_c} &= V_B - \frac{m - x}{\rho_3} \Rightarrow \frac{x}{\rho_c} = V_B - \frac{m}{\rho_3} + \frac{x}{\rho_3} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{x}{\rho_c} - \frac{x}{\rho_3} = V_B - \frac{m}{\rho_3} \Rightarrow \\ &\Rightarrow x \left(\frac{1}{\rho_c} - \frac{1}{\rho_3} \right) = V_B - V_3. \end{aligned} \quad (3)$$

Плотности золота и серебра найдем, зная массы слитков из чистого золота и серебра и их объемы:

$$\rho_3 = \frac{m}{V_3}, \quad \rho_c = \frac{m}{V_c}. \quad (4)$$

Подставим правые части уравнений (4) в уравнение (3):

$$\begin{aligned} x \left(\frac{1}{\frac{m}{V_c}} - \frac{1}{\frac{m}{V_3}} \right) &= V_B - V_3 \Rightarrow \\ &\Rightarrow x \left(\frac{V_c}{m} - \frac{V_3}{m} \right) = V_B - V_3 \Rightarrow \\ &\Rightarrow x = \frac{m(V_B - V_3)}{V_c - V_3}. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставим числовые данные в формулу (5) и найдем массу золота, которую ювелир заменил серебром в «золотом» венце:

$$x = \frac{2000 \text{ г} (240 \text{ см}^3 - 207 \text{ см}^3)}{381 \text{ см}^3 - 207 \text{ см}^3} \approx 379 \text{ г}.$$

ПРОБЛЕМА

Почему легкая монета тонет в воде, а более тяжелый деревянный кубик плавает (рис. 1)? Почему металлическая ложка тонет в воде, а более тяжелая лодка плавает?



Рис. 1

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

На такие вопросы первым ответил древнегреческий ученый *Архимед*, а *открытый им закон природы назвали законом Архимеда*.

Закон Архимеда

Поместим внутрь жидкости плотностью $\rho_{\text{ж}}$ куб из вещества плотностью $\rho_{\text{т}}$.

На поверхность жидкости, в которую помещен куб, действует атмосферное давление. Согласно закону Паскаля оно передается жидкостью по всем направлениям одинаково. Следовательно, действие атмосферного давления на все грани куба одинаково, и в рамках рассматриваемой задачи его можно не учитывать.

Найдем равнодействующую всех приложенных к кубу сил. На куб действуют сила тяжести $m\vec{g}$, направленная вертикально вниз, и силы давления жидкости на все шесть граней куба, направленные перпендикулярно их поверхностям (рис. 2).

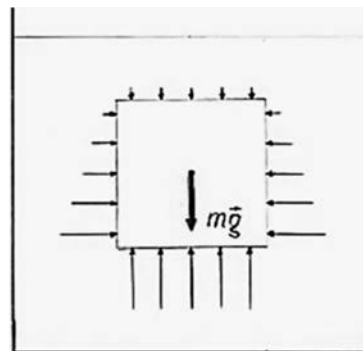


Рис. 2

Силы давления со стороны жидкости на куб в каждой точке зависят от расстояния каждой точки до поверхности жидкости. На глубине h в жидкости плотностью $\rho_{\text{ж}}$ давление равно $\rho_{\text{ж}}gh$.

На рисунке 2 показано, что силы давления на боковые грани куба, будучи симметрично равными на одинаковой глубине, уравнивают друг друга. Но из-за того, что давление на грани куба увеличивается с увеличением глубины погружения, суммарная сила давления $\vec{F}_1$ на нижнюю грань больше суммарной силы давления $\vec{F}_2$ на верхнюю грань (рис. 3). Поэтому равнодействующая $\vec{F}_A$ сил давления жидкости на верхнюю и нижнюю грани куба с ребром a отлична от нуля и направлена вертикально вверх. Внутри жидкости она равна:

$$\vec{F}_A = \vec{F}_1 + \vec{F}_2, \quad F_A = F_1 - F_2 = p_1 a^2 - p_2 a^2,$$

где $p_1 = \rho_{\text{ж}}g(h + a)$ — давление жидкости на нижнюю грань, $p_2 = \rho_{\text{ж}}gh$ — давление жидкости на верхнюю грань.

$F_A = \rho_{\text{ж}}g(h + a) \cdot a^2 - \rho_{\text{ж}}gh \cdot a^2 = \rho_{\text{ж}}a^3g = \rho_{\text{ж}}Vg$, где $V = a^3$ — объем куба, но одновременно это и объем жидкости, вытесненной кубом, $\rho_{\text{ж}}V$ — масса жидкости, вытесненной кубом, $\rho_{\text{ж}}Vg$ — значение веса вытесненной жидкости.

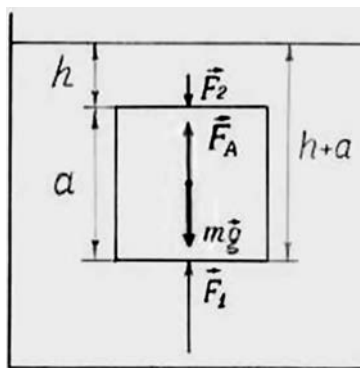


Рис. 3

Мы получили, что на погруженный в жидкость куб, кроме силы тяжести, действует выталкивающая сила, равная весу жидкости, вытесненной кубом.

Эту силу называют **силой Архимеда**.

Такой же результат получается для тел **любой формы**, погруженных в **жидкость или газ**.

В общем виде закон Архимеда формулируется так: **на погруженное в жидкость или газ тело действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной жидкости или вытесненного газа**:

$$F_A = \rho Vg.$$

В этом выражении ρ — плотность любой жидкости или любого газа, V — объем тела.

Поскольку все тела на Земле находятся или в воздухе, или в воде, то **на все тела**, наряду с силой тяжести, **непрерывно действует сила Архимеда**.

Ответим теперь на практический вопрос: **будет ли куб** (рис. 2) **всплывать или тонуть?**

Будем различать четыре варианта соотношения между силами тяжести и Архимеда, действующими на куб, и назовем их следствиями.

Следствие 1. Находящееся внутри среды тело не тонет и не всплывает, если сила Архимеда равна по модулю силе тяжести:

$$F_A = mg, \quad \rho_{\text{ж}}Vg = \rho_{\text{т}}Vg \Rightarrow \rho_{\text{ж}} = \rho_{\text{т}}. \quad (6)$$

Полученное выражение (6) позволяет при решении задач **предсказать** следующее: **если плотность $\rho_{\text{т}}$ тела, находящегося внутри жидкости, равна плотности $\rho_{\text{ж}}$ жидкости**, то равнодействующая сил тяжести и силы Архимеда равна нулю — **тело не тонет и не всплывает**.

Кстати, мы можем ответить на вопрос: куб на рисунке 2 будет всплывать или тонуть?

Так как модули сил тяжести и Архимеда равны: $F_A = mg$ (см. рис. 3), этот куб не тонет и не всплывает. Следовательно (см. выражение 6), плотность вещества, из которого он сделан, равна плотности жидкости, в которую он помещен: $\rho_{\text{ж}} = \rho_{\text{т}}$.

Из какого вещества скорее всего сделан этот куб?

Следствие 2. Находящееся внутри среды тело всплывает, если сила Архимеда $\vec{F}_A$ по модулю больше силы тяжести тела $m\vec{g}$:

$$F_A > mg, \quad \rho_{\text{ж}} Vg > \rho_{\text{т}} Vg, \quad \rho_{\text{ж}} > \rho_{\text{т}}. \quad (7)$$

Данное выражение (7) позволяет при решении задач **предсказать: если плотность $\rho_{\text{т}}$ тела меньше плотности $\rho_{\text{ж}}$ жидкости**, то равнодействующая сил направлена вверх — **тело всплывает**.

Следствие 3. Тело тонет, если сила Архимеда $\vec{F}_A$ по модулю меньше силы тяжести тела $m\vec{g}$:

$$F_A < mg, \quad \rho_{\text{ж}} Vg < \rho_{\text{т}} Vg, \quad \rho_{\text{ж}} < \rho_{\text{т}}. \quad (8)$$

Полученное выражение (8) позволяет при решении задач **предсказать: если плотность $\rho_{\text{ж}}$ жидкости меньше плотности $\rho_{\text{т}}$ тела**, то равнодействующая сил направлена вниз — **тело тонет**.

В какую жидкость нужно поместить этот куб, чтобы он утонул?

Из какого вещества нужно сделать этот куб, чтобы он всплыл?

Следствие 4. Тело плавает на поверхности жидкости, когда равнодействующая действующих на тело силы тяжести и силы Архимеда равна нулю.

Это условие выполняется, когда тело погружено в жидкость настолько, что вес вытесненной им жидкости равен силе тяжести тела.

Поэтому из стали, плотность которой значительно больше плотности воды, можно изготовить корабль, не тонущий в воде и способный перевозить тысячи тонн грузов.

Корпус большого корабля, изготовленный из стали, при спуске на воду, погрузившись лишь на часть своего объема, вытесняет объем воды весом, равным весу корабля (рис. 4). **Равнодействующая действующих на корабль силы тяжести и силы Архимеда равна нулю — корабль плавает.**

Если разделить массу корабля вместе с грузом на его объем, ограниченный стенками корпуса, то средняя плотность вещества

окажется значительно меньше плотности воды, так как большая часть объема корабля заполнена воздухом. Корабль, корпус которого изготовлен из стали, плавает в соответствии с законом Архимеда.

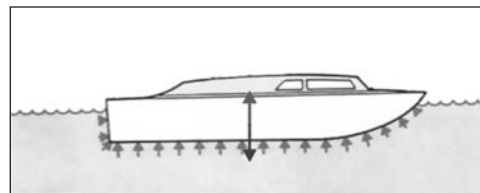


Рис. 4

Аналогичны ответы на вопрос: будет всплывать или тонуть тело плотностью $\rho_{\text{т}}$ в газе плотностью $\rho_{\text{г}}$?

А поэтому немного о воздухоплавании

Оглянемся вокруг. И люди, и животные, и предметы, нас окружающие, обладают плотностью гораздо большей плотности воздуха.

Получается, что с учетом закона Архимеда тела, находящиеся на Земле, это тела, «утонувшие» в воздухе.

Но люди придумали, как использовать закон Архимеда, чтобы плавать не только по воде!

И воздушные шары уже много столетий плавают в воздушном океане нашей планеты.



Рис. 5. Шар братьев Монгольфье. Этот шар в 1783 году впервые поднял людей в воздух

Из какого вещества нужно сделать наш куб, чтобы он не утонул, а плавал в атмосфере Земли?

Практикум по решению задач

Заметили ли Вы после знакомства с законом Архимеда, что несколько по-другому ощущаете себя? Чувствуете ли Вы, как действует на Вас сила Архимеда?

Во-первых, осознаем, что сила Архимеда **постоянно** действует на человека на Земле, потому что на Земле человек **постоянно** находится в окружении или воздуха, или воды!

Во-вторых, попробуем оценить, насколько **«ощутимо»** действие силы Архимеда на человека в воздухе и в воде.

Для этого в процессе решения задач ответим на следующие вопросы.

Почему мы оказались на дне воздушного океана Земли и ходим по земле, а не летаем в воздухе?

Чему равен вес человека в воздухе и в воде?

Как научиться плавать?

Почему человек оказался на дне воздушного океана Земли и ходит по земле, а не летает?

Качественный ответ: человек находится на дне воздушного океана, так как плотность тела человека намного больше плотности воздуха, т.е. выполняется следствие 3.

Количественный ответ можно дать после того, как будут определены и сопоставлены все силы, действующие на человека в воздухе.

Задание 1. Найдите силу Архимеда, которая действует в воздухе на человека массой $m = 51,8$ кг, и сравните ее с силой тяжести, действующей на того же человека. Средняя плотность тела человека равна $\rho_{\text{чел}} = 1036$ кг/м³. Плотность воздуха у поверхности земли равна $\rho_{\text{возд}} = 1,2$ кг/м³.

Решение. Объем человека равен:

$$V = \frac{m}{\rho_{\text{чел}}} = \frac{51,8 \text{ кг}}{1036 \text{ кг/м}^3} \approx 0,05 \text{ м}^3 \approx 50 \text{ дм}^3 \approx 50 \text{ л.}$$

Сила Архимеда, действующая на находящегося в воздухе человека объемом V , по модулю равна:

$$F_A = \rho_{\text{возд}} Vg = 1,2 \cdot 0,05 \cdot 9,8 \text{ Н} = 0,588 \text{ Н.}$$

Сила тяжести, действующая на Земле на человека объемом V и массой 51,8 кг, по модулю равна:

$$F_{\text{тяж}} = mg = 51,8 \cdot 9,8 \text{ Н} \approx 507,6 \text{ Н.}$$

Сравним модули силы Архимеда и силы тяжести:

$$\frac{F_A}{F_{\text{тяж}}} = \frac{\rho_{\text{возд}} Vg}{\rho_{\text{чел}} Vg} = \frac{\rho_{\text{возд}}}{\rho_{\text{чел}}} = \frac{1,2}{1036} \approx 0,001 \approx 0,1\%,$$

или

$$\frac{F_A}{F_{\text{тяж}}} = \frac{0,588}{507,6} \approx 0,001 \approx 0,1\%.$$

Итак, сила Архимеда, действующая на человека в воздухе у поверхности Земли, составляет всего 0,1% от силы тяжести! Вот почему мы очень прочно стоим на Земле, находясь в окружении воздуха, и не очень-то ощущаем действие силы Архимеда.

Чему равен вес человека в воздухе и в воде?

Задание 2. Найдите вес человека в воздухе и в воде с учетом действия силы Архимеда.

Решение. Очевидно, что вес человека в воздухе $P_{\text{возд}}$ (сила давления на неподвижную опору человека, стоящего неподвижно на ней) меньше силы тяжести на величину силы Архимеда:

$$\vec{P}_{\text{возд}} = \vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{F}_A, \quad P_{\text{возд}} = F_{\text{тяж}} - F_A \approx 507,6 \text{ Н} - 0,588 \text{ Н} \approx 507 \text{ Н.}$$

Чтобы определить вес человека в воде, найдем сначала значение силы Архимеда, действующей на человека, полностью погрузившегося в чистую без примесей воду, плотность которой равна $\rho = 1000$ кг/м³:

$$F_A = \rho_{\text{воды}} Vg = 1000 \cdot 0,05 \cdot 9,8 \text{ Н} = 490 \text{ Н.}$$

Вес человека в чистой воде равен:

$$\vec{P}_{\text{вод}} = \vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{F}_A, P_{\text{вод}} = F_{\text{тяж}} - F_A = \\ = 507,6 \text{ Н} - 490 \text{ Н} = 17,6 \text{ Н} \approx 18 \text{ Н!}$$

Человек практически невесом в такой воде!

Он весит в воде столько же, сколько весит пирог массой чуть меньше двух килограммов!

Именно поэтому отработка навыков обращения человека с инструментами в невесомости происходит в бассейнах с водой на Земле — в гидролабораториях. Космонавты погружаются в воду в специальных скафандрах, привыкают к состоянию, близкому к невесомости, и учатся выполнять работу, которую им предстоит выполнить в космосе (рис. 6).

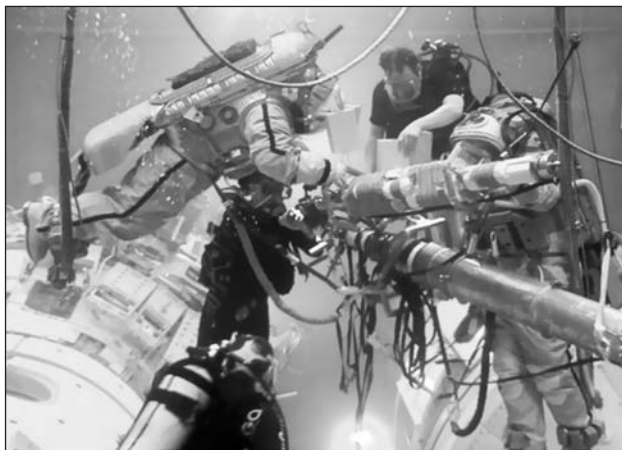


Рис. 6

При подготовке к работе на орбите советских станций «Салют-7» и «Мир» космонавты проходили тренировки в бассейне гидролаборатории.

В гидролаборатории есть макет всей станции, но он крупнее бассейна, поэтому каждый раз в бассейн погружают лишь фрагменты МКС, необходимые для текущих тренировок.

Задание 3. В воде какой плотности находящийся на Земле человек будет полностью невесом?

Решение. Из выражений

$$\vec{P}_{\text{вод}} = \vec{F}_{\text{тяж}} + \vec{F}_A = 0, P_{\text{вод}} = F_{\text{тяж}} - F_A = 0$$

следует, что человек будет полностью невесомым в воде плотностью, равной плотности тела человека: $F_{\text{тяж}} = F_A$, если $\rho_{\text{вод}} = \rho_{\text{чел}} = 1036 \text{ кг/м}^3$.

Есть ли на Земле вода с такой плотностью?

Обратимся к таблице 1. Из сравнения плотности человека с плотностью воды в разных водоемах видно, что к плотности тела человека ближе всего плотность воды в Средиземном море и в Индийском океане.

Таблица 1

Значения плотности воды в разных водоемах²

Название водоема	ρ , кг/м ³
Индийский океан	1034
Средняя плотность морской воды	1025
Красное море	1041
Средиземное море	1036
Черное море	1018
Озеро Развал	1200
Средняя плотность чистой воды	1000

Задание 4. Найдите равнодействующую силу действия на человека силы Архимеда и силы тяжести человека, пытающегося нырнуть в воду озера Развал. Плотность воды в нем равна $\rho_{\text{вод}} = 1200 \text{ кг/м}^3$.

² Примечания к таблице значений плотности воды в разных водоемах.

1. Средняя соленость океана примерно соответствует солености стакана воды, в котором размешана чайная ложка соли.

2. Вода в озере Развал в г. Соль-Илецк представляет собой насыщенный соляной раствор, содержащий более 200 г соли на литр воды. Озеро не замерзает даже в самые сильные морозы. Начиная с глубины 2–3 м и до дна, имеет круглый год отрицательные температуры. По химическому составу и концентрации соли вода в озере Соль-Илецка похожа на воду в Мертвом море. В озере нет живых организмов и никакой растительности.

Решение. Можно предсказать результат ныряния человека в воду озера Развал. Так как плотность тела человека меньше плотности воды в озере, то равнодействующая силы Архимеда и силы тяжести человека направлена вверх. Согласно следствию 2 человек всплывет.

Модуль силы Архимеда, действующей на человека внутри воды озера, равен:

$$F_A = \rho_{\text{вод}} Vg = 1200 \cdot 0,05 \cdot 9,8 \text{ Н} = 588 \text{ Н}.$$

Сила Архимеда заметно больше силы тяжести, равной 507,6 Н (см. задание 1).

Равнодействующая силы Архимеда и силы тяжести направлена вверх и равна:

$$F_A - F_{\text{тяж}} = 588 \text{ Н} - 507,6 \text{ Н} = 80,4 \text{ Н}.$$

В результате человек на озере Развал может спокойно лежать или плавать на поверхности воды лишь частично погрузившись в воду, а вот чтобы нырнуть и остаться под водой, ему придется делать усилия больше, чем 80,4 Н.

Задание 5. Найдите объем $V_{\text{п}}$ погруженной части тела человека, плавающего на озере Развал.

Решение. Вспомним условия плавания тел, следующие из закона Архимеда: тело плавает на поверхности жидкости, когда равнодействующая действующих на тело силы тяжести и силы Архимеда равна нулю. Это условие выполняется, когда тело погружено в жидкость настолько, что вес вытесненной им жидкости равен по модулю силе тяжести тела.

Найдем объем $V_{\text{п}}$ погруженной части тела человека:

$$\begin{aligned} F_A &= F_{\text{тяж}}, \quad \rho_{\text{вод}} V_{\text{п}} g = \rho_{\text{чел}} V g, \\ V_{\text{п}} &= \frac{\rho_{\text{чел}} \cdot V}{\rho_{\text{вод}}} = \frac{1036 \cdot V}{1200} \approx 0,86 \cdot V \approx \\ &\approx 0,86 \cdot 0,05 \text{ м}^3 \approx 0,043 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Человек может лежать на поверхности воды озера Развал, погрузившись в воду лишь на 0,86 объема своего тела.

Как научиться плавать?

Большинство людей убеждено, что человек тяжелый и тонет в воде.

Поэтому людей учат плавать.

Желающим научиться плавать обычно рекомендуют простое упражнение «Поплавок»: *«Войдя в воду по пояс, глубоко вдохните, обхватите себя за колени и постарайтесь погрузиться в воду так, чтобы ноги коснулись дна, а Вы оказались бы полностью под водой. Через некоторое время Вы почувствуете, что вода выталкивает вас на поверхность».*

Задание 6. Какой объем воздуха нужно вдохнуть человеку, чтобы он смог стать «поплачком» в морской воде?

Справочные данные: объем выдоха-вдоха человека при спокойном дыхании составляет около 500 см³; объем дополнительного вдоха после спокойного вдоха составляет около 1500 см³.

Решение. Условие всплывания «человека-поплавка»: $F_{\text{АП}} > F_{\text{тяж}}$, — модуль силы Архимеда $F_{\text{АП}}$, действующей на погрузившегося в морскую воду «человека-поплавка», должен быть больше модуля силы тяжести $F_{\text{тяж}}$, действующей на этого человека.

Сила тяжести, действующая на человека массой 51,8 кг, равна примерно 507,6 Н (см. задание 1).

Примем $F_{\text{АП}} \approx 508 \text{ Н}$ и определим объем $V_{\text{попл}}$ всплывающего «человека-поплавка»:

$$\begin{aligned} V_{\text{попл}} &= \frac{F_{\text{АП}}}{\rho_{\text{м воды}} \cdot g} \approx \frac{508 \text{ Н}}{1025 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2} \approx \\ &\approx 0,05057 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

Полученный объем больше объема человека $V_{\text{чел}}$ на ΔV :

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_{\text{попл}} - V_{\text{чел}} = 0,05057 \text{ м}^3 - 0,05 \text{ м}^3 = \\ &= 0,00057 \text{ м}^3 = 570 \text{ см}^3. \end{aligned}$$

Итак, перед тем как погрузиться в воду, человеку нужно сверх обычного дыхания сделать еще один вдох, чуть более глубокий обычного вдоха (см. справочные данные).

Но если Вы хотите проверить полученный результат, то проделайте эксперимент:

нащупав в озере или в бассейне дно и зайдя в воду по пояс, сделайте сверх обычного дыхания еще один вдох, чуть более глубокий обычного. Погрузитесь, приседая целиком в воду, и обхватите руками колени. Вы почувствуете, что вода выталкивает вас на поверхность!

Решаем задачи

Задача 1. Для измерения плотности жидкости изготовлен прибор из стеклянной пробирки. Пробирка частично заполнена песком для того, чтобы в жидкости она плавала в вертикальном положении. В воде пробирка плавает, погружаясь на 9 см, в неизвестную жидкость — погружаясь на 10 см. Какова плотность этой жидкости?

Задача 2. На одной чашке чувствительных равноплечих весов находится деревянный брусок, на другой — стальная гири массой 1 кг. При взвешивании в воздухе наблюдается равновесие. Какова масса деревянного бруска? Плотность дерева 880 кг/м^3 , плотность стали 7900 кг/м^3 , плотность воздуха $1,2 \text{ кг/м}^3$.

Задача 3. Воздушный шар объемом 300 м^3 заполнен водородом. Масса оболочки шара и корзины 200 кг. Какой максимальный полезный груз может поднять воздушный шар? Плотность воздуха $1,2 \text{ кг/м}^3$, плотность водорода $0,09 \text{ кг/м}^3$.

Задача 4. На фотографии представлен кусок льда, имеющий форму цилиндра, плавающий в воде (рис. 7). Определите приблизительно с помощью этой фотографии плотность льда. Вода заполняет стакан до краев.



Рис. 7

Сравните ваши решения с приведенными ниже.

Решение задачи 1. В первом и во втором случаях сила Архимеда равна силе тяжести, действующей на трубку. При неизменности силы тяжести одинаковы и значения силы Архимеда:

$$\rho_1 V_1 g = \rho_2 V_2 g.$$

Плотность ρ_2 неизвестной жидкости:

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{V_1}{V_2} = \rho_1 \frac{l_1}{l_2},$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотности воды и неизвестной жидкости, V_1 и V_2 — объемы погруженной части трубки, l_1 и l_2 — длины погруженной в жидкость части трубки. Подставляя числовые значения, находим искомую плотность: $\rho_2 = 900 \text{ кг/м}^3$.

Решение задачи 2. Равновесие весов означает, что вес деревянного бруска равен весу гири. Вес тела в воздухе равен разности силы тяжести и силы Архимеда:

$$m_6 \cdot g - V_6 \cdot \rho_v \cdot g = m_{\Gamma} \cdot g - V_{\Gamma} \cdot \rho_v \cdot g,$$

$$m_6 - \frac{m_6}{\rho_6} \rho_v = m_{\Gamma} - \frac{m_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}} \rho_v,$$

$$m_6 \left(\frac{\rho_6 - \rho_v}{\rho_6} \right) = m_{\Gamma} \left(\frac{\rho_{\Gamma} - \rho_v}{\rho_{\Gamma}} \right),$$

$$m_6 = m_{\Gamma} \frac{\rho_6}{\rho_{\Gamma}} \cdot \frac{\rho_{\Gamma} - \rho_v}{\rho_6 - \rho_v},$$

$$m_6 = 1 \cdot \frac{880}{7900} \cdot \frac{7900 - 1,2}{880 - 1,2} \approx 1,0012 \text{ кг}.$$

Решение задачи 3. При максимальной нагрузке воздушного шара сила Архимеда F_A равна по модулю сумме веса оболочки шара с корзиной P_1 , веса водорода в шаре P_2 и веса полезного груза P_3 :

$$F_A = P_1 + P_2 + P_3.$$

Сила Архимеда равна весу вытесненного воздуха:

$$F_A = m_{v3} g = \rho_{v3} V g,$$

вес водорода в шаре равен:

$$P_2 = m_{\text{вд}} g = \rho_{\text{вд}} V g.$$

Используя данные из условия задачи, найдем максимальную массу m_3 полезного груза:

$$P_3 = F_A - P_1 - P_2,$$

$$m_3 g = \rho_{\text{вз}} V g - 200 \cdot g - \rho_{\text{вд}} V g,$$

$$m_3 = \rho_{\text{вз}} V - 200 - \rho_{\text{вд}} V,$$

$$m_3 = 1,2 \cdot 300 \text{ кг} - 200 \text{ кг} - 0,09 \cdot 300 \text{ кг} = 133 \text{ кг}.$$

Решение задачи 4. Измерения на фотографии показали, что цилиндр из льда высотой 50 мм плавает при погружении в воду приблизительно на глубину 44 мм. По закону Архимеда вес вытесненной льдом воды равен весу льда:

$$m_{\text{в}} g = m_{\text{л}} g \Rightarrow \rho_{\text{в}} \cdot V_{\text{в}} = \rho_{\text{л}} \cdot V_{\text{л}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \rho_{\text{в}} \cdot S \cdot h_{\text{в}} = \rho_{\text{л}} \cdot S \cdot h_{\text{л}}.$$

Отсюда плотность льда равна:

$$\rho_{\text{л}} = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot h_{\text{в}}}{h_{\text{л}}} \approx \frac{1000 \text{ кг/м}^3 \cdot 44 \text{ мм}}{50 \text{ мм}} \approx 880 \text{ кг/м}^3.$$

Примечание: поскольку результаты ваших измерений зависят от размера страницы, Вы, наверное, получите другие значения высоты льда и глубины его погружения в воду.

Ваш результат близок к табличному значению плотности льда?

Решаем дополнительные задачи

Задача 5. На человека, плавающего на поверхности воды, действует сила Архимеда 800 Н. На сколько увеличится эта сила после того, как человек дополнительно вдохнет 1 дм³ воздуха?

Задача 6. В измерительном цилиндре уровень воды находился на делении 100 см³. До какого деления повысится уровень воды в цилиндре при опускании в воду 20 г льда? Как изменится уровень воды в цилиндре после таяния льда? Плотность

воды 1000 кг/м³, плотность льда 900 кг/м³.

Задача 7. На равноплечих весах произведено взвешивание алмазов. Алмазы были уравновешены железной гирей массой 20 г. Какова масса алмазов, если взвешивание произведено в воздухе? Плотность воздуха 1,2 кг/м³, плотность алмаза 3545 кг/м³, плотность железа 7974 кг/м³.

Задача 8. Масса воздушного шара 300 кг. Сколько килограммов гелия потребуются для того, чтобы шар мог поднять полезный груз массой 150 кг? Каким будет объем шара? Плотность воздуха 1,2 кг/м³, плотность гелия 0,178 кг/м³.

Задача 9. В сезон 2013–2014 гг. пилотами клуба «Аэронавт», Андреем и Артемом Денисенко, впервые был поднят в небо самый большой в то время воздушный шар в России. Объем воздушного гиганта — 8500 м³. Чему равна сила Архимеда, действующая на воздушный шар? Чему равна масса шара вместе с наполняющим его воздухом и кабиной, если он поднялся и неподвижно висит над Землей? Примите $g \approx 10 \text{ м/с}^2$, плотность воздуха 1,2 кг/м³.

Остался ли этот шар самым большим до настоящего времени?

Тест для самоконтроля

1. Чему равна сила Архимеда, действующая на человека весом 700 Н при плавании на поверхности воды? Примите $g \approx 10 \text{ м/с}^2$.

2. Человек плавает на поверхности воды. Как и на сколько изменится значение силы Архимеда после того, как человек выдохнет воздух объемом 1 дм³? Плотность воздуха равна 1,2 кг/м³. Примите $g \approx 10 \text{ м/с}^2$.

3. На человека под водой действует сила Архимеда 500 Н. Чему равна сила Архимеда, действующая под водой на того же человека, если перед погружением он вдохнул 5 дм³ воздуха? Примите $g \approx 10 \text{ м/с}^2$, плотность воды $\rho \approx 1000 \text{ кг/м}^3$.

4. На человека под водой действует сила Архимеда 500 Н. Чему равна сила Архимеда, действующая под водой на того же человека, если перед погружением он выдохнул

5 дм³ воздуха? Примите $g \approx 10 \text{ м/с}^2$, а плотность воды $\rho \approx 1000 \text{ кг/м}^3$.

5. Мыльный пузырь в безветренную погоду поднимается в воздухе вверх. Какое соотношение между силой тяжести mg и силой Архимеда F_A , действующими на мыльный пузырь, верно для этого явления?

1) $F_A > mg$. 2) $F_A < mg$. 3) $F_A = mg$.
4) сила Архимеда в этом случае на мыльный пузырь не действует.

6. Рассмотрите фотографию (рис. 8). На ней изображены предметы с разной плотностью, которые расположились в воде на поверхности или на дне сосуда. Если бы Вы вошли в воду, то как бы плавало Ваше тело? Как плоское семя акации, яблоко или галька?



Рис. 8

И в заключение учителю и юным любителям закона Архимеда.

Варианты завершения изучения темы «Закона Архимеда» могут быть разными, но главная цель — дать возможность показать свои достижения в понимании закона Архимеда и успехи в эксперименте.

Можно организовать олимпиаду с докладами и демонстрациями.

Можно провести «масштабный» эксперимент по запуску шаров с грузом под девизом: «Какой максимальный груз может поднять детский шарик, наполненный гелием?»

А может быть найдутся умельцы и запустят свой настоящий шар?!

Ответы

к дополнительным задачам

Ответ к задаче 5. Сила Архимеда, действующая на плавающего человека после дополнительного вдоха, увеличится примерно на 0,012 Н.

Ответ к задаче 6. Уровень воды в цилиндре повысится до деления 120 см³. После таяния льда уровень воды в цилиндре не изменится.

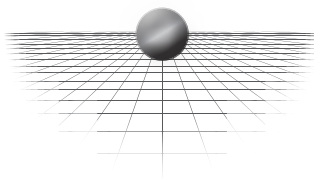
Ответ к задаче 7. Масса алмазов примерно равна 20,0038 г.

Ответ к задаче 8. Для заполнения шара потребуется примерно 78,4 кг гелия, объем шара должен быть не менее 440 м³.

Ответ к задаче 9. Сила Архимеда, действующая на воздушный шар, равна 99 960 Н, масса шара равна примерно 10 т.

Ответы на задачи теста

1. 700 Н. 2. Уменьшится на 0,012 Н.
3. 550 Н. 4. 450 Н. 5. $F_A > mg$.
6. Яблоко.



КАК ОБРАЗУЕТСЯ РАДУГА?

Г.М. Чулкова , д.ф.-м.н., профессор, Московский педагогический государственный университет, профессор, МИЭМ ВШЭ, Москва; gm.chulkova@mpgu.su	G.M. Chulkova , DrSci (Physics and Mathematics), Professor, Moscow State Pedagogical University; Moscow Institute of Electronics and Mathematics (HSE); gm.chulkova@mpgu.su
А.И. Елантьев , к.ф.-м.н., доцент, Москва; anivel2006@rambler.ru	A.I. Elantiev , PhD (Physical and Mathematical), Associate Professor; anivel2006@rambler.ru
Ключевые слова: радуга, преломление и отражение света, угол рассеяния, дисперсия света, интерференция, поляризованный свет	Keywords: rainbow, refraction and reflection of light, scattering angle, light dispersion, interference, polarized light
В статье в историческом аспекте рассматриваются основные этапы изучения и объяснения явления радуги. Обсуждается, как развитие представлений о волновой природе света позволило объяснить все особенности радуги	In the article, in the historical aspect, the main stages of the study and explanation of the rainbow phenomenon are considered. It is discussed how the development of ideas about the wave nature of light made it possible to explain all the features of the rainbow
УДК 372.853	DOI 10.47639/0130-5522_2022_6_31

«Радуга — это такое изумительное чудо природы...»

Рене Декарт

Введение

Умение объяснять с научной точки зрения явления, происходящие в природе, является необходимым элементом подготовки школьного учителя. Включение такого материала в канву урока способствует более глубокому усвоению предмета и помогает формированию научной картины мира. В образовательном процессе особенно важна роль учителя физики, поскольку многие природные явления имеют физическую природу и могут быть описаны на физическом языке. Важную роль в обучении играют такие хорошо известные ученикам явления как дождь, закат и восход Солнца, затмение Луны, молния и т.д. Одним из самых впечатляющих явлений является радуга. Разноцветная дуга, возникающая на небе, кажется цветным волшебным мостом, попади на который, и исполнятся все твои самые заветные желания. Недаром радуга часто является и центральным понятием мифических преданий различных народов, и элементом пейзажа знаменитых художников, и сим-

волом самых различных сообществ — от государств до музыкальных групп.

История

Радугу видели все. Ее описание приводится еще в Библии. Ной увидел ее, когда закончился всемирный потоп. Он воспринял это грандиозное явление как знамение, посланное Богом. В течение тысячелетий поэты и ученые пытались описать и объяснить радугу. Вначале она воспринималась как некоторый объект, и это послужило основой для многих мифов и легенд. В дальнейшем, по мере развития естественнонаучной философии, была отмечена связь радуги и Солнца.

Либо после дождя, либо в брызгах водопада появляется яркая дуга с цветными полосами, которые сильно отличаются по яркости и четкости. Но порядок их всегда одинаков — внутри дуги фиолетовая полоса, которая, плавно меняя оттенки, переходит в синюю, голубую, затем в зеленую, желтую, оранжевую и, наконец, красную, обрамляющую дугу с внешней стороны (см. рис. на обложке).

Есть и другие характерные черты радуги, которые выражены слабее и наблюдаются не всегда. Выше в небе над первой радугой может появиться вторая дуга, в которой цветовые полосы располагаются в обратном порядке — красная внутри, а фиолетовая снаружи. При внимательном наблюдении можно заметить, что область между двумя этими дугами заметно темнее окружающего неба. Эта темная область получила название темной Александровой полосы по имени древнегреческого философа Александра Афродисийского [1], впервые описавшего ее около двухсотого года нашей эры.

Иногда можно увидеть слабые полосы, обычно розовые и зеленые, на внутренней стороне первой дуги (рис. 1). Это проявление интерференции.



Рис. 1. Дуги высших порядков

Нередко можно встретить такую точку зрения, что геометрическая оптика целиком объясняет это явление. Иными словами, объяснение возникновения дуги на небе после дождя представляет лишь исторический интерес. На самом деле, законченная количественная теория радуги была создана лишь в начале XX в. Выяснилось, что решение этой проблемы требует привлечения современных представлений о природе света. Нельзя обойтись без понятий интерференции, дифракции, поляризации и других свойств фотонов. Учет всех факторов требу-

ет применения довольно изощренных математических методов, некоторые из которых были созданы лишь в XX в. [2].

Считается, что первое научное объяснение радуги предложил Аристотель. Он полагал, что радуга возникает в результате необычного отражения солнечных лучей от облаков под определенным углом. Примерно такой же точки зрения придерживались веком позже и арабские ученые. Но это была эпоха наблюдений и качественных рассуждений. Эпоха количественных измерений и экспериментальных исследований пришла существенно позже — в средневековье.

В 1266 г. Роджер Бэкон впервые измерил угол между падающим и отраженным лучами, при котором возможно наблюдение радуги. Этот угол оказался равным примерно 42° , а вторая дуга располагалась выше первой примерно на 9° . В 1304 г. немецкий монах Теодорик (Дитер) из Фрайбурга предположил, что радугу создает каждая капелька воды в отдельности, а не коллектив капелек облака, как полагал Аристотель. Для доказательства этого Теодорик сделал то, что встречается очень редко в средневековой науке — он поставил эксперимент с наполненной водой колбой и проследил путь лучей света, создающих радугу.

На 300 лет это открытие Теодорика было забыто. Лишь в 1637 г. Декарт повторил описанный опыт вновь. Ученый показал, что лучи света от Солнца, прошедшие внутрь капли, преломляются и отражаются либо один раз, либо два раза (рис. 2 и 3), а затем выходят наружу и собираются вблизи направлений, которые соответствуют либо первой, либо второй радугам. При каждом отражении интенсивность света ослабляется, поэтому яркость второй радуги заметно меньше. В промежутке между углами 42° и 52° свет рассеивается незначительно и образует темную Александрову область [3, 4].

Так как показатель преломления зависит от длины волны излучения вследствие

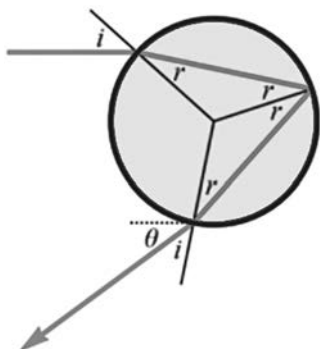


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая ход лучей в капле воды

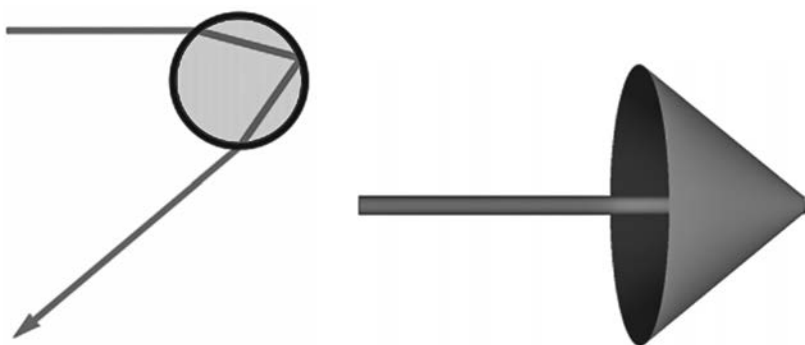


Рис. 3. Ход лучей в капле для первой радуги и конус лучей с полураствором 42° , отраженных от капли

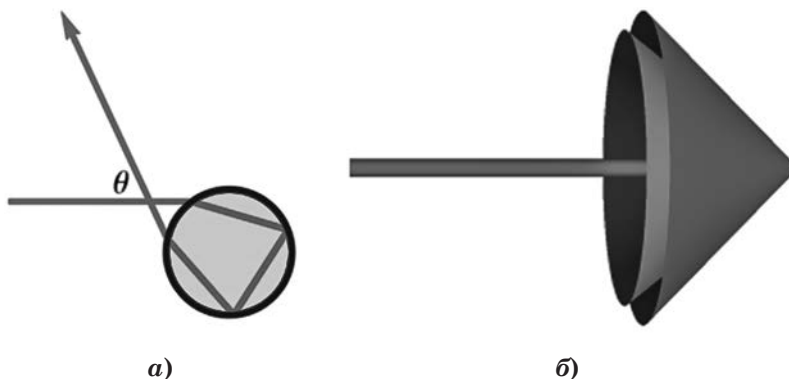


Рис. 4. а) Ход лучей в капле для второй радуги. б) Конус с полураствором 42° находится внутри конуса с углом полураствора 51°

дисперсии, то разные цветовые компоненты радуги видны под разными углами.

Работы Декарта

Используя законы преломления и отражения света для множества точек на границе вода–воздух, Декарт провел тщательные расчеты траекторий многих лучей, приходящих в каплю воды. Рассмотрим параллельный пучок света, падающий на сферическую каплю. Естественно, что лучи выходят из капли под разными углами в зависимости от расстояния x от оси пучка, которое называется прицельным параметром (рис. 5а). Точки, рассчитанные Декартом, приведены на рисунке 5б. Лучи, падающие на каплю в направлении $x = 0$ (прицельного параметра), пройдя через центр капли

и отразившись один раз от ее внутренней стенки, рассеиваются под углом 180° , возвращаясь назад. По мере возрастания x траектория луча смещается от центра капли и угол рассеяния уменьшается. Но Декарт обнаружил, что это уменьшение продолжается до практически максимального значения x , близкого к 1, при котором солнечный луч скользит по капле, лишь коснувшись ее поверхности. Угол рассеяния достигает минимума, который равен 138° , а затем снова начинает возрастать [5].

Декарт исходил из следующих положений: так как свет в капле распределяется равномерно, то поток рассеянного света максимален в том направлении, которое соответствует наиболее слабой зависимости угла рассеяния от x . То есть максимальная

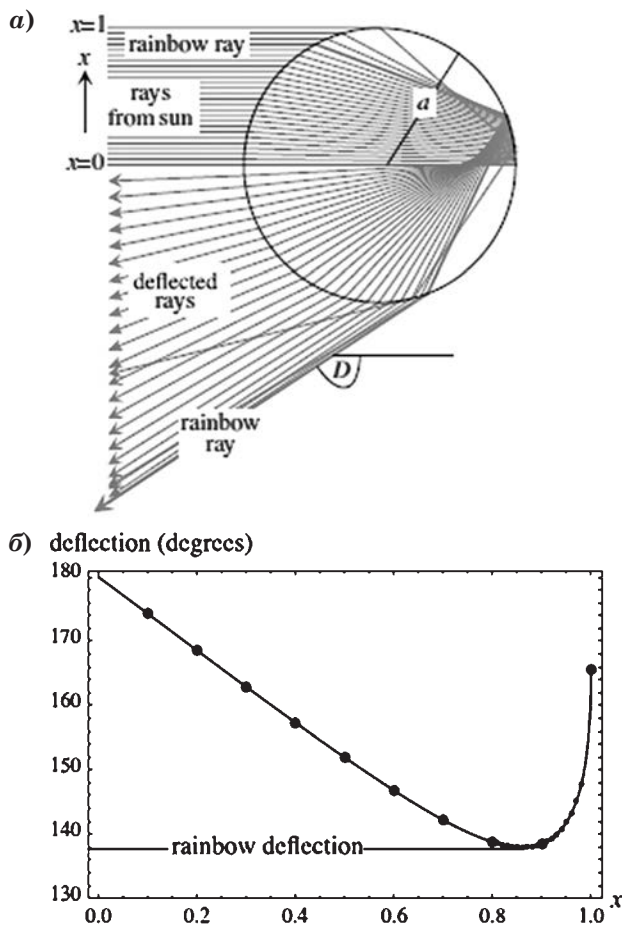


Рис. 5. а) Лучи в капле дождя, распространяющиеся под разными прицельными параметрами; б) функция угла отклонения луча в зависимости от прицельного параметра x с указанием точек, рассчитанных Декартом (рисунок из работы [1])

яркость радуги достигается тогда, когда в одном направлении собирается свет, рассеянный от наиболее широкого интервала x . А это условие выполняется вблизи точки минимума угла рассеяния. То, как будет изменяться угол рассеяния, зависит от показателя преломления (Декарт считал его постоянным) и значения x . Он полагал, что все значения x равновероятны. Ясно, что от размера капель ничего не зависит, и геометрия рассеяния одинакова как для капелек облаков, так и для круглой колбы с водой,

которой в опытах пользовались Декарт и Теодорик. Сейчас это можно показать, используя законы преломления и тригонометрические функции. Во времена Декарта не было развитой тригонометрии, и ему пришлось проводить достаточно сложные вычисления. А мы для нахождения зависимости отклонения луча света D в зависимости от прицельного параметра x можем записать соотношение:

$$D(x) = \pi - \left(4 \arcsin \frac{x}{n} - 2 \arcsin x \right). \quad (1)$$

Минимальные значения D и x находим из условия:

$$\frac{dD}{dx} = \frac{2(\sqrt{n^2 - x^2} - 2\sqrt{1 - x^2})}{\sqrt{(1 - x^2)(n^2 - x^2)}} = 0 \quad (2)$$

для

$$x = x_{\min} = \sqrt{\frac{4 - n^2}{3}}.$$

Получаем минимальное значение угла рассеяния:

$$D_{\min} = D(x_{\min}) = 2 \cos^{-1} \left(\frac{(4 - n^2)^{3/2}}{n^2 3^{3/2}} \right) = 180^\circ - 42,03^\circ \quad (3)$$

для $n = 4/3$.

Декартова картина радуги замечательна своей простотой. Яркость зависит от скорости изменения угла рассеяния, который, в свою очередь, определяется двумя факторами: показателем преломления (который считается постоянным) и прицельным параметром, все значения которого считаются равновероятными.

В настоящее время для расчетов можно использовать компьютер и смоделировать ход сразу 100 лучей, падающих на каплю. На рисунке 6 представлена картина лучей, выходящих из капли после одного и двух отражений [5].

Обратим внимание на яркость света, выходящего из капли. Из рисунка 6а и рисунка 5 можно видеть, что концентрация лучей, выходящих из капли, мала в центре пучка

и чрезвычайно велика на границах пучка. Границы практически прямолинейны и совпадают с крайними лучами, которые идут под максимальным углом 42° для внутренней радуги и 51° для внешней.

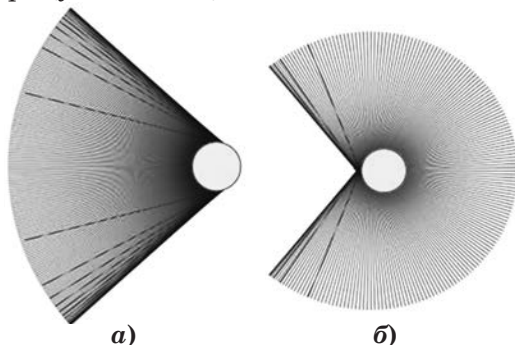


Рис. 6. Лучи, выходящие из капли после одного а) и двух б) внутренних отражений

Как можно видеть на рисунках 6а и 6б, вершина конуса более ярких лучей с углом 42° расположена вблизи задней поверхности капли, а вершина конуса с углом 51° (они менее яркие и находятся вблизи передней поверхности капли). Поэтому более яркий конус находится внутри менее яркого.

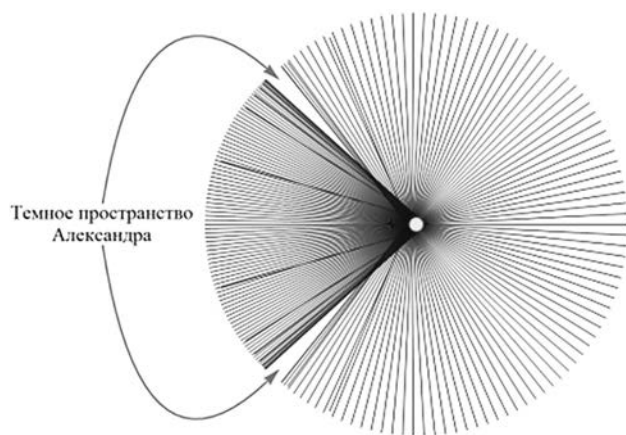


Рис. 7. Два конуса (рисунок 6) и образование Александрова пространства

Если наложить друг на друга рисунки 6а и 6б, то можно увидеть, что две радуги разделены пространством, в которое не попадает ни один из лучей, отраженных однократно или двукратно в капле (рис. 7). Между областями, содержащими лучи, выходящие

из капли после одного и двух внутренних отражений (указаны стрелками на рис. 7), практически нет лучей, поэтому это пространство выглядит более темным (темное Александрово пространство).

Работы Ньютона

Ньютон в 1704 г. в своем трактате «Оптика» описал свои опыты с призмами, представил свою теорию цвета и применил ее для объяснения радуги. Его опыты доказали, что белый свет представляет собой совокупность цветов и лучи разных цветов имеют свой показатель преломления. Сейчас мы знаем, что это явление называется дисперсией света, и можем представить изменение показателя преломления воды в виде зависимости от длины волны света, представленной на рисунке 8.

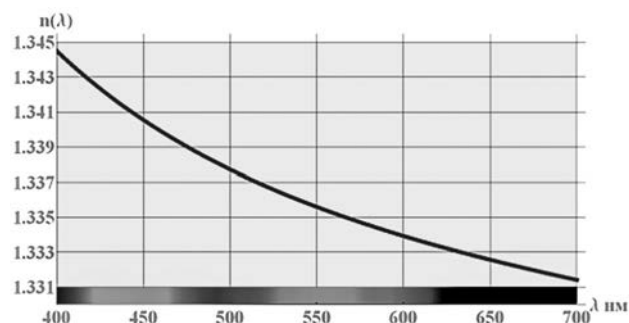


Рис. 8. Зависимость показателя преломления воды от длины волны видимого спектра

По данным этого графика можно заметить, что расчеты углов Декарта были проведены для красного цвета. Ньютон, используя значения показателей преломления, рассчитал угловые радиусы и ширины первой и второй радуг. Эти результаты можно свести к таблице 1. По этим данным получается обосновать порядок чередования цветов в первой и второй радугах [6].

Угловая ширина вычислена в приближении параллельности лучей, идущих от Солнца. Но Ньютон учел, что угловой диаметр Солнца примерно $30'$, и получил полную ширину первой радуги — $2^\circ 15'$.

Таблица 1

	Цвет	Угловой радиус	Угловая ширина
Первая радуга	Фиолетовый	40°16'	1°46'
	Красный	42°02'	
Вторая радуга	Красный	50°59'	3°11'
	Фиолетовый	54°10'	

Вот так Декарт и Ньютон смогли объяснить наиболее характерные свойства радуги: появление первой и второй дуг, появление темного пространства между ними, угловое расположение дуг, чередование цветных полос в них. Для этого потребовались представления лишь геометрической оптики. Однако их теория не могла объяснить появление дополнительных дуг (рис. 1). Дополнительные дуги появляются с внутренней, более светлой стороны основной (первой) дуги [7].

Вклад Юнга и Эйри

Оптическое явление, объясняющее появление дополнительных дуг, было открыто в 1803 г. Юнгом. Это интерференция. Сложение волн может привести либо к усилению (при совпадении фаз), либо к ослаблению (если волны в данную точку приходят в противофазе). Юнг обратил внимание, что два отраженных в капле воды луча, рассеянных под одним и тем же углом вблизи экстремального, будут интерферировать. При значениях угла, немного превышающем экстремальный угол, возникают два луча, отраженных от разных точек, но идущих в одном направлении. При прохождении через каплю пути этих лучей отличаются незначительно, и лучи дают максимум интенсивности. По мере увеличения угла оптическая разность путей этих лучей возрастает. Когда она достигает половины длины волны, лучи гасят друг друга. При дальнейшем увеличении угла вновь происходит взаимное усиление. Таким образом, возникает периодическое изменение интенсивности, т.е. чередование более ярких и более темных цветных полос — радуги высших порядков.

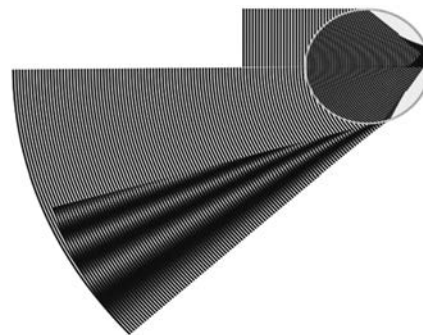


Рис. 9. Схема образования радуг высших порядков

В продолжение можно добавить, что в 1838 г. Джорж Эйри использовал теорию дифракции для уточнения описания радуги. Она позволила уточнить расположение дуг, в том числе высших порядков. Также Эйри удалось устранить существенный недостаток предыдущих теорий — бесконечное значение интенсивности света на границах всех дуг. Дифракция позволила объяснить проникновение света в темное Александрово пространство. Эйри выразил интенсивность рассеянного света через функцию, представляющую собой интеграл (теперь функция носит его имя). Интенсивность света является квадратом этой функции Эйри

$$Ai(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} dt \cos\left(\frac{1}{3}t^3 + xt\right). \quad (4)$$

Распределение интенсивности света по Эйри аналогично дифракции на краю прямолинейного экрана. На светлой стороне основной дуги появляются осцилляции интенсивности, соответствующие дополнительным дугам высших порядков. Положение и ширина полос отличаются от теории Юнга.

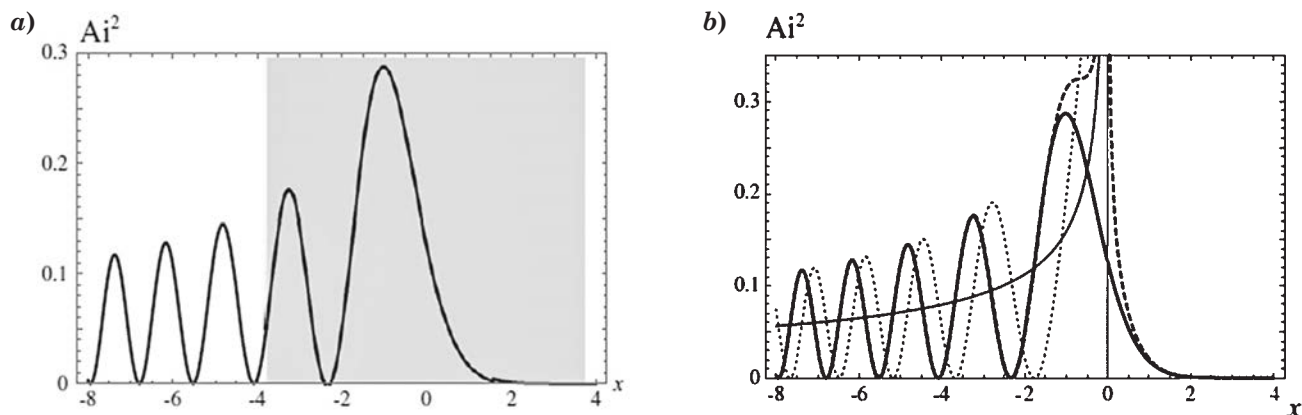


Рис. 10. *а)* Квадрат функции Эйри, пропорциональный интенсивности света. Заштрихованная область цвета, указывает диапазон, который Эйри вычислил путем численного интегрирования. *б)* Осциллирующая кривая: интенсивность Эйри; сплошная кривая: приближение геометрической оптики; пунктирная кривая: приближение интерферирующих лучей Юнга; штрих-пунктирная кривая: асимптотика Стокса низшего порядка (рисунок из работы [1])

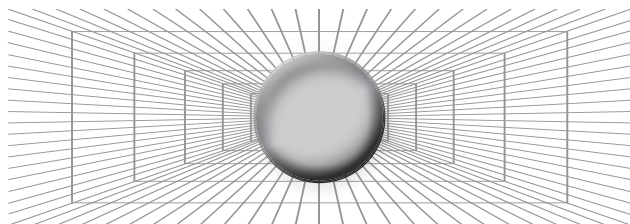
Дифракция меняет освещенность с темной стороны радуги: она не обрывается резко, а убывает постепенно по мере перехода в Александрову область (рис. 10). Вычисления Эйри справедливы для монохроматической радуги. Чтобы применить его метод к реальной радуге, нужно проинтегрировать все по видимой части спектра и дополнить особенностями восприятия цветов глазом человека.

Пока мы не уделили внимание такой характеристике света как поляризация. А ведь в результате отражений света в капле воды происходит изменение относительного вклада состояний с различной поляризацией. Оказывается, что лучи, образующие радугу, почти полностью поляризованы. Это объясняется тем, что при определенном угле падения, называемом углом Брюстера, отраженный луч становится поляризованным в плоскости, перпендикулярной плоскости падения. В этом можно убедиться, рассматривая радугу через поляризатор и вращая его вокруг направления луча. Такая сильная поляризация обусловлена удивительным свойством: радугу порождают лучи, угол падения которых на внутреннюю поверхность капли очень близок к углу Брюстера [8].

Объяснения радуги занимают важное место в развитии геометрической и волновой оптики, но, к сожалению, в школьных учебниках и учебниках по общей физике этому явлению почти не уделяется внимания.

Литература

1. *Berry M.V.* Nature's optics and our understanding of light// *Contemporary Physics*. 2015. Vol. 56. No. 1. P. 2-16. <http://dx.doi.org/10.1080/00107514.2015.971625>.
2. *Кикоин А.К.* Что такое радуга? // *Квант*. 1984. № 12. С. 20–21.
3. *Панов А.* Радуга Декарта–Ньютона–Юнга // *Квант*. 2016. № 3. С. 10-14.
4. *Панов А.* Радуга Декарта–Ньютона–Юнга (окончание) // *Квант*. 2016. № 4. С. 8–12.
5. *Минарт М.* Свет и цвет в природе. — М., 1959.
6. *Гершензон Е.М., Малов Н.Н., Мансуров А.Н.* Оптика и атомная физика. — М., 2000.
7. *Варламов С.* Почему радуги бывают разными // *Квант*. 2013. № 1. С. 46–48.
8. *Трифонов Е.Д.* Еще раз о радуге // *Соровский образовательный журнал*. 2000. Т. 6. № 7. С. 53–58.



ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ СОБЫТИЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО ХАРАКТЕРА — НАУЧНОЕ ШОУ «СОЗДАЙ АТМОСФЕРУ» (ОНЛАЙН-ФОРМАТ)

Л.А. Бордонская , д.п.н., профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита; gsbordo@yandex.ru	L.A. Bordonskaya , DrSci (Pedagogy), Professor, Transbaikalsk State University, Chita; gsbordo@yandex.ru
Е.А. Игумнова , д.п.н., профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита; igumnova1@mail.ru	E.A. Igumnova , DrSci (Pedagogy), Professor, Transbaikalsk State University, Chita; igumnova1@mail.ru
С.С. Серебрякова , к.п.н., доцент, Забайкальский государственный университет, г. Чита	S.S. Serebryakova , PhD (Pedagogy), Associate professor, Transbaikalsk State University, Chita
Ключевые слова: интеграция, образовательное онлайн-событие, научное шоу, метаобъект, атмосфера	Keywords: integration, educational online-event, science show, metaobject, atmosphere
Статья посвящена реализации процесса интеграции в образовании на основе метапредметного подхода, позволяющего раскрывать единство мира и его познания, единство науки и культуры. На примере внеаудиторной деятельности по физике показано, что успешно может применяться такая форма обучения и воспитания как образовательное онлайн-событие, спроектированное вокруг метаобъекта «Атмосфера». Приведены его содержательные аспекты, модель организации образовательного события «Создай атмосферу» и взаимодействия его участников, описан ход образовательного события и даны задания командам	The article is devoted to the implementation of the process of integration in education on the basis of a meta-subject approach, which allows revealing the unity of the world and its knowledge, the unity of science and culture. Using the example of out-of-class activities in physics, it is shown that such a form of education and upbringing as an educational online event designed around the «Atmosphere» meta-object can be successfully applied. The substantive aspects of the meta-object «Atmosphere» are given; a model for organizing the educational event «Create an Atmosphere» and the interaction of its participants; the course of the educational event and tasks for the teams are described
УДК 372.853	DOI 10.47639/0130-5522_2022_6_38

Интеграция в образовании обеспечивается единством всех образовательных областей, отражающих все сферы окружающего мира и бытия человека. Это дает возможность расширения предметных областей, их объединения, обеспечивая продуцирование нового знания, создает благоприятные условия для обучения, воспитания и развития обучаемых.

Осуществить интеграцию в образовании

можно при выделении метаобъекта как своеобразной «узловой точки» как сложного конструкта, допускающего его рассмотрение с разных позиций и различных точек зрения. В качестве метаобъекта могут быть выбраны идеи, проблемы, подходы, принципы, знания (понятия, законы, теории, картины мира), события, объекты, явления, приборы, устройства, знаки, символы и т.п. [3, 8, 9].

Значительные возможности интеграции

информации из различных областей знаний предоставляет внеучебная деятельность, когда можно широко и свободно обсуждать вопросы единства и целостности мира и его познания.

Эта деятельность метапредметного характера предполагает разнообразие форм образовательных событий, обеспечивающих участникам получение разносторонних знаний о действительности, раскрытие единства и целостности мира. В условиях интеграции образования она допускает разнообразие формата, средств проведения интегрированных мероприятий. Одной из таких форм можно считать образовательное событие как особую форму специально организованной ситуации, выводящей образовательный процесс за рамки обыденности. Вариантом образовательного события с организацией внеучебной деятельности событийного характера будет научное шоу [1, 3].

Нами было спроектировано, подготовлено и проведено в дистанционном формате образовательное событие интегрированного характера — научное шоу «Создай атмосферу». Исследование организовано на базе Забайкальского государственного университета.

Атмосфера — полифункциональное понятие, которому существует много толкований. Родственными понятиями этого слова являются — «дух», «настрой», «ритм». Поэтому было очень важно создать атмосферу научного шоу через научное содержание, раскрывающее различные аспекты метаобъекта «Атмосфера» и яркие детали видения, звучания и ощущения. Интеграция естественнонаучной и гуманитарной областей осуществлялась за счет привлечения материалов, отражающих в художественной форме специфику и особенности атмосферных явлений, а также историю исследования атмосферы Земли (фрагменты литературных произведений, репродукции произведений живописи, рисунки исследователей атмосферы, фотографии), а также интеграции форм обучения.

Рассмотрим содержательный аспект интеграции естественнонаучного и гуманитарного знания, выбрав в качестве «узловой точки» метаобъект «Атмосфера». Атмосфера — газовая оболочка планеты вообще и нашей родной планеты Земля, удерживаемая около нее гравитацией. Метаобъект «Атмосфера» как сложный конструкт допускает его рассмотрение с разных сторон и под разными углами зрения, фокусирует различные области научного знания: физику, астрономию, биологию, географию, химию, экологию, историю науки и культуры (табл. 1).

Научное шоу «Создай атмосферу» было реализовано в форме ролевой игры. Интересные факты об атмосфере планет и Земли преподносились аудитории в форме онлайн-диалога ведущего и «специалистов-ученых в области исследования атмосферы», роль которых играли студенты разных курсов. В мероприятии в режиме онлайн-включения приняли участие социальные партнеры — специалисты Института природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН и филиала ФБУ «Рослесозащита» «Центр защиты леса Забайкальского края». Создать атмосферу образовательного события — это значит организовать коллективное переживание во время участия в массовом мероприятии. В рамках шоу была организована командная деятельность студентов, находящихся удаленно друг от друга, с дальнейшим представлением на шоу результатов своей работы. Каждой команде необходимо было решить экологическую задачу на вычисление класса пожарной опасности и комплексного показателя пожарной опасности в лесу по условиям погоды (индекс Нестерова) и выполнить кратковременное индивидуальное задание по выявлению из предложенной информации (текст, иллюстрации, строки стихотворений и т.п.) физического явления, обусловленного наличием земной атмосферы, и поиску информации для ответов на вопросы по данному явлению. Эксперты оценивали результаты работы

Таблица 1

Область научно-го знания	Содержательные аспекты метаобъекта «Атмосфера»
Физика	– Физические характеристики атмосферы Земли: давление, нормальное атмосферное давление, масса, молярная масса, плотность, температура, влажность и др. – Опыты, подтверждающие существование атмосферного давления. – Барометрическая формула: изменение атмосферного давления и плотности газа в атмосфере с высотой. – Физические причины парникового эффекта в атмосфере Земли. – Тепловая структура нашей атмосферы (тропосфера, стратосфера, мезасфера, термосфера). Объяснение изменения температуры атмосферы с высотой. – Экранирующее действие земной атмосферы: защита от жесткого электромагнитного излучения (жесткий УФ, рентген, гамма излучение), идущего из космоса, космического холода, потоков мелких частиц, сгорающих в атмосфере. – Объяснение цвета земного неба в различное время суток; изменение цвета неба с высотой; влияние озонового слоя на оптические характеристики атмосферы. – Физические явления, обусловленные наличием атмосферы: радуга, миражи, гало, полярные сияния, возможность распространения звуков и др.
Астрономия	– Факторы наличия атмосферы у планеты: температура, магнитное поле, гравитационный потенциал у поверхности планеты. – Влияние наличия в атмосфере планеты облаков на повышение яркости ее диска, увеличения отражательной способности поверхности планеты. – Значение атмосферы в поддержании теплового баланса планет (парниковый эффект в атмосфере планет Солнечной системы). – Эволюция планеты Земля и изменение химического состава ее атмосферы. – Влияние химического состава атмосферы на цвет неба различных планет Солнечной системы. – Астрономические явления, обусловленные наличием атмосферы: сумерки (гражданские, навигационные, астрономические), метеоры и болиды, астрономическая рефракция, мерцание звезд, «кровавая Луна» во время лунного затмения, «темное лунное затмение» и др. – Термосфера — зона полетов орбитальных станций, кораблей и спутников
Химия	– Химический состав атмосферы планет Солнечной системы. – Химический состав первичной атмосферы Земли. – Химический состав современной атмосферы Земли и его изменение с высотой. – Механизмы пополнения химического состава атмосферы Земли. – Озоновый слой. – Парниковые газы. – Химический состав стратосферных аэрозолей, полярных стратосферных облаков
Биология	– Влияние биосферы на химический состав атмосферы Земли. – Значение атмосферы Земли для поддержания жизни на планете. – Озоновый слой и его роль для жизни на Земле
География	– Строение атмосферы Земли: слои атмосферы Земли (тропосфера, стратосфера, мезасфера, термосфера) и их характеристики. – Озоновые дыры в атмосфере Земли. – Погодные явления (облака, туман, метель, осадки, ураган и др.). – Влияние парникового эффекта на изменение климата Земли

Экология	– Виды загрязнения атмосферы Земли (физические, химические, биологические). – Источники загрязнения атмосферы (природные, искусственные). – Влияние извержения вулканов на изменение оптической и тепловой структуры атмосферы Земли. – Последствия загрязнения (парниковый эффект, кислотные дожди, озоновые дыры, смог и т.п.). – Защита атмосферы Земли (Киотский протокол, очистка воздуха, борьба с пожарами и др.)
История науки	– Измерение атмосферного давления (Э. Торричелли). – Исследование стратосферы (О. Пиккар, П. Кипфер, А. Васенко, П. Федосенко, И. Усыкин и др.). – Исследование физических явлений, обусловленных наличием атмосферы (Аристотель, Р. Декарт, И. Ньютон, М.В. Ломоносов, Б. Франклин, К. Биркеланд и др.). – Исследование парникового эффекта в атмосфере Земли (Ж. Фурье, Дж. Тиндаль, С. Аррениус и др.). – Исследование влияния извержения вулканов на изменения в атмосфере Земли (Р. Вербеек, К. Фламмарион и др.)

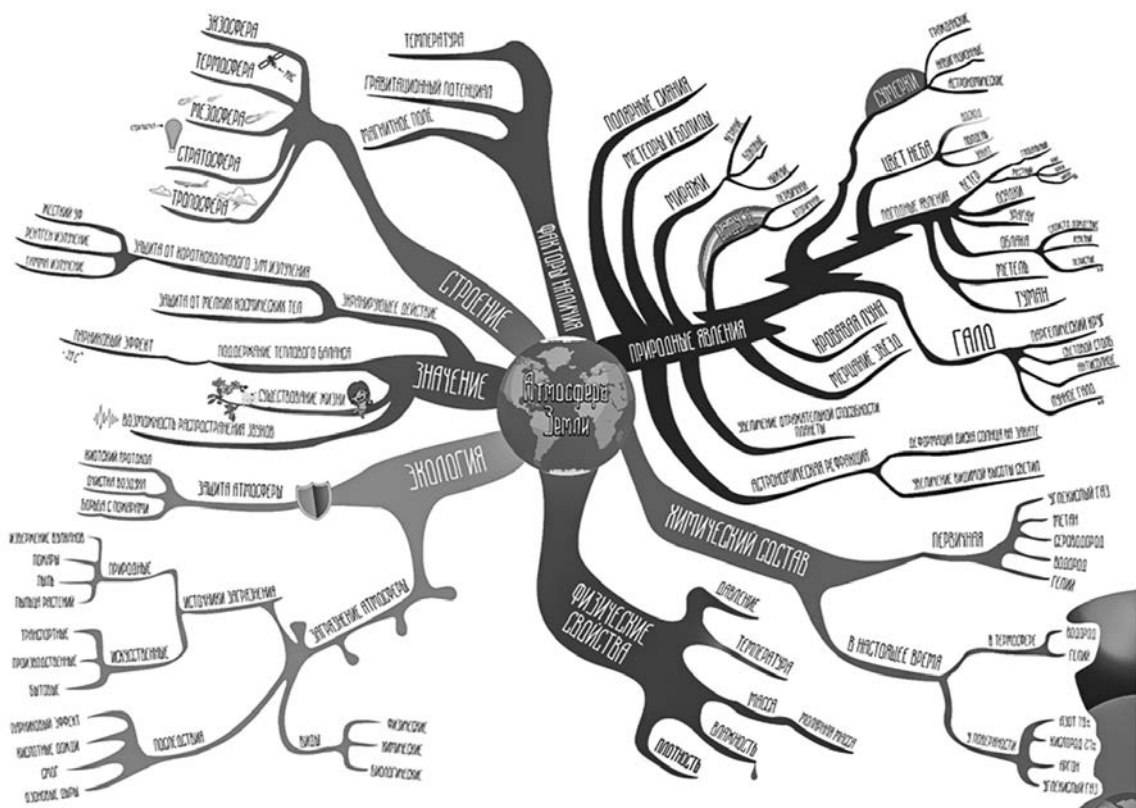


Рис. 1. Интеллект-карта «Атмосфера Земли»

команд и выявляли победителей, которые были оглашены во время шоу.

В итоге образовательного события, рас-

крывшего метаобъект «Атмосфера», была представлена и озвучена интеллект-карта «Атмосфера Земли» (рис. 1).

Остановимся на некоторых аспектах организации образовательного события «Создай атмосферу».

Онлайн-формат проведения мероприятия предусматривал особую деятельность команды организаторов (преподавателей и студентов).

1. Определение содержательной информации об атмосфере, выявление особенностей онлайн-формата проведения, формы проведения и видов деятельности участников образовательного события; определение хода мероприятия в соответствии с разработанной моделью (рис. 2) и подготовка сценария; разработка конкретных заданий командам.

2. Подготовка техники для сетевого взаимодействия участников, ее апробация.

3. Предварительная работа с командами, которая должна обеспечить их деятельность в онлайн-режиме (подбор команд, выбор капитана, определение названия команды, пробное включение сетевого взаимодействия); информирование всех участников об особенностях организации работы в ходе образовательного события.

Ход образовательного события «Создай атмосферу» схематично дан в таблице 2.

В образовательном событии принимали участие три команды студентов: «Пятый элемент», «Передаточное число», «Фата Моргана». Каждой команде необходимо было решить экологическую задачу, выявить из предложенной информации конкретное атмосферное явление и выполнить задания по нему. Первой команде предлагался текст, описывающий физическое явление в атмосфере — радугу. Второй команде — рисунок с изображением атмосферного явления мираж. Третьей команде — фрагмент стихотворения М.А. Дудина «Ах, как играет этот север» о полярном сиянии. Задания, которые предлагались участникам команд, выполнены по анализу атмосферного явления, приведены в таблице 3.

Ниже приведем текст предлагаемой командам экологической задачи на вычисление класса пожарной опасности и комплексного показателя пожарной опасности в лесу по условиям погоды (индекс Нестерова) [2].

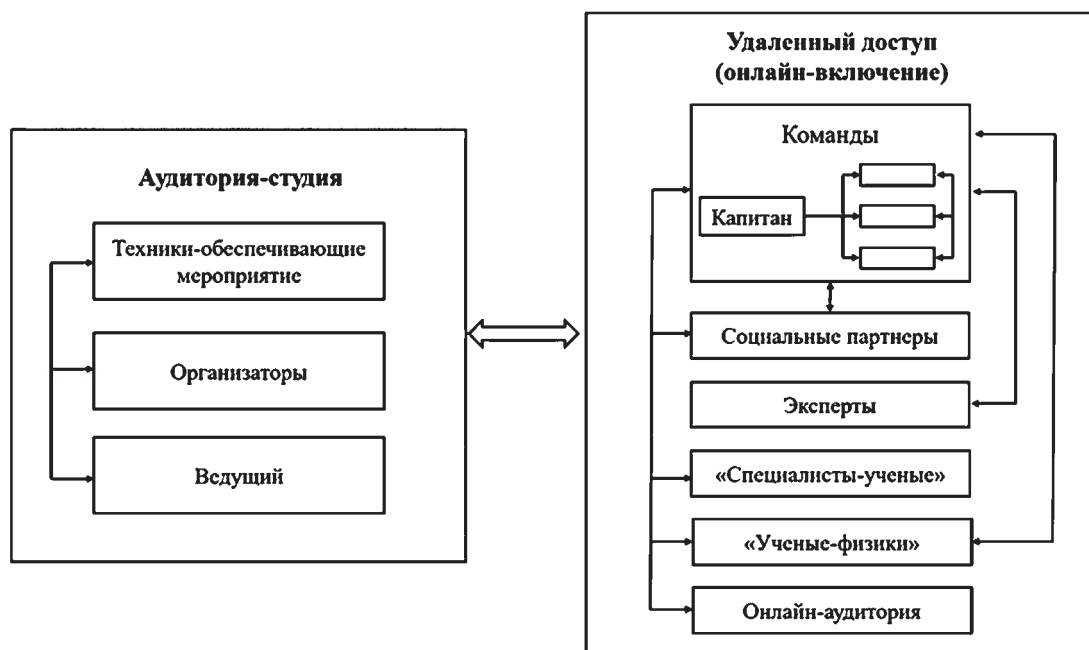


Рис. 2. Модель организации образовательного события и взаимодействия участников

Таблица 2

Ход образовательного события «Создай атмосферу»

Этап	Деятельность в студии (аудитории)	Деятельность в удаленном доступе и онлайн-включении
1	<i>Звучат фанфары</i> Вступительное обращение ведущего к гостям и участникам шоу	
	Ведущий представляет слово капитанам команд	Креативное представление команд (визитная карточка)
	Отправка заданий командам	Участники команд, получив задания, временно отключаются от мероприятия и, находясь удаленно друг от друга, их выполняют; проводят коллективное обсуждение итогового варианта представления выполненного задания. Через 20 минут команды отправляют бланки с ответами и решениями экспертам
2	Пока команды выполняют задания, ведущий организует погружение гостей шоу в мир интересных фактов об атмосфере планет и Земли в форме онлайн-диалога со «специалистами-учеными»	Онлайн-включения двух «ученых-специалистов в области изучения атмосферы и атмосферных явлений» для ответов на вопросы ведущего. Роль «ученых» играли студенты
	Ведущий предоставляет слово социальным партнерам мероприятия	Выступление социальных партнеров
3	<i>Звучат фанфары</i> Ведущий предоставляет слово командам	Команды поочередно представляют результаты выполненных заданий
	Ведущий после выступления каждой команды предоставляет слово «специалисту-ученому-физику» в области изучения того атмосферного явления, о котором рассказывала команда	Онлайн-включения «ученых-физиков» с объяснением физических основ и специфики конкретного атмосферного явления. Роль «ученых-физиков» играли студенты
		Во время выступления «ученых-физиков» эксперты в соответствии с критериями оценивают правильность и полноту выполнения заданий, креативность выступления
4	<i>Звучат фанфары</i> Ведущий озвучивает результаты экспертной проверки выполнения заданий командами	
	Ведущий предлагает участникам команд поделиться впечатлениями об участии в шоу	Онлайн-включения капитанов команд для ответного слова
5	<i>Подведение итогов</i> Ведущий демонстрирует и озвучивает содержание интеллект-карты, наглядно представляющей в единстве различные аспекты темы образовательного события	

5	Ведущий обращается с заключительным словом и просьбой к участникам и гостям шоу заполнить анкету, выразив свое отношение к состоявшемуся образовательному событию	Рефлексия. Участники и гости шоу отвечают на вопросы анкеты и отправляют их организаторам
	Демонстрация видео ролика «Мир не прост»	

Таблица 3

Задания командам по анализу атмосферного явления

Задания	Ответы
Назовите атмосферное явление, описанное в фрагменте повествовательного текста (или стихотворения) или представленное на рисунке	
Назовите физическое(ие) явление(я), лежащее(ие) в основе объяснения данного атмосферного явления	
Назовите имена ученых, занимавшихся исследованием и объяснением данного атмосферного явления	

Таблица 4

Метеоданные для расчета комплексного показателя пожарной опасности

Дата	Температура, °C		Осадки за сутки, мм	Комплексный показатель	Класс пожарной опасности
	воздуха (t)	точки росы (t_p)			
24.V	25,4	1,8			
25.V	29,8	0,3	0,3		
26.V	35,1	0,2	2,2		
27.V	39,0	0,1	0,2		

Задание. Используя предложенные метеоданные (табл. 4), необходимо рассчитать показатель пожарной опасности за 4 дня и для каждого дня установить класс пожарной опасности по погоде (данные вписать в соответствующие колонки таблицы 4). Исходя из полученных данных, ответьте на вопрос: в какой из дней наиболее высока вероятность возникновения лесного пожара?

Расчет комплексного показателя начинается с начала пожароопасного сезона. Для его вычисления используют формулу:

$$КП_n = КП_{n-1} \cdot K + t \cdot (t - t_p),$$

где $КП_n$ — комплексный показатель на текущий день; $КП_{n-1}$ — комплексный показатель в предшествующий день; K — ко-

эффициент учета осадков, выпавших за последние сутки (при осадках объемом до 3 мм коэффициент равен единице, при осадках 3 мм и более коэффициент равен нулю); t — температура воздуха, °C; t_p — температура точки росы, °C.

Комплексный показатель (КП) на первый день пожароопасного сезона рассчитывают по формуле:

$$КП_{23.V} = t \cdot (t - t_p),$$

где КП — комплексный показатель на первый день пожароопасного сезона; t — температура воздуха, °C; t_p — температура точки росы, °C.

Класс пожарной опасности определить по таблице 5.

Таблица 5

Шкала пожарной опасности

Класс пожарной опасности	Величина комплексного показателя	Пожарная опасность
I	до 300	отсутствует
II	301–1000	малая
III	1001–4000	средняя
IV	4001–10000	высокая
V	более 10000	чрезвычайная

Интеграция естественнонаучной информации вокруг «узловой точки» метаобъекта «Атмосфера» позволяет показать точки соприкосновения учебных дисциплин, дать целостное представление о мире и его познании, способствовать становлению целостной творческой личности обучающегося.

Преподаватели и студенты (будущие учителя физики и информатики) в процессе совместной работы получили колоссальный инновационный опыт проведения образовательного онлайн-события и организации дистанционного взаимодействия.

Литература

1. Бордонская Л.А., Игумнова Е.А., Серебрякова С.С. Образовательное событие «Наука, культура, искусство: решаем задачи» // Физика в школе. 2021. № 3. С. 10–19.
2. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Сравнительный анализ методов расчета индексов пожарной опасности // Труды Гидрометцентра России. 2012. Вып. 347. С. 180–193.
3. Интеграция в открытом образовательном пространстве как фактор профессионального роста будущих педагогов: монография / Л.А. Бор-

донская, Е.А. Игумнова, С.С. Серебрякова, Т.Г. Филиппова; под ред. Л.А. Бордонской; Забайкальский государственный университет. Чита: ЗабГУ, 2020. — 294 с.

4. Ливанов Д.В. Знакомьтесь: наш мир. Физика всего на свете. — М.: Дрофа, 2019. — 236 с.

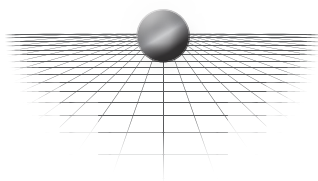
5. Сурдин В.Г. Астрономия. Популярные лекции. — М.: Литео, 2017. — 288 с.

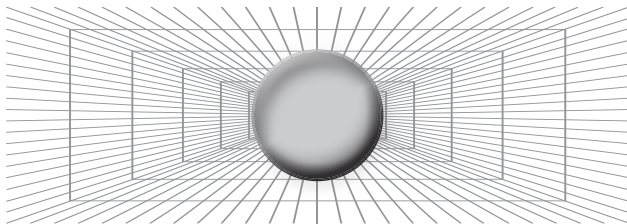
6. Тарасов Л.В. Физика в природе: Книга для учащихся. — М.: «Вербум-М», 2002. — 352 с.

7. Угольников О.С. Атмосфера Земли. Лекции 1–6. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://youtu.be/1qySvGpqtO8> (дата обращения: 09.09.2021).

8. Хуторской А.В. Метапредметный подход в обучении: научно-методическое пособие. — М.: Эйдос; Изд-во Института образования человека, 2012. — 50 с.

9. Хуторской А.В. Метапредметный подход к проектированию образования // Вестник Института образования человека. 2019. № 2. С. 6. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_41540815_72599770.pdf (дата обращения: 09.03.2022).





МАЯТНИК-СЕРДЦЕ

В.Ф. Очков , д.т.н., профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва; ochkovvf@mpei.ru	V.F. Ochkov , DrSci (Technical Sciences), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University); ochkovvf@mpei.ru
Ключевые слова: потенциальная и кинетическая энергия, закон Гука, принцип Д'Аламбера–Лагранжа	Keywords: potential and kinetic energy, Hooke's law, D'Alembert–Lagrange principle
В статье описан новый вид маятника, представляющего собой три цилиндра, стянутых резинкой. Выведено и численно решено дифференциальное уравнение колебания такого маятника	The article describes a new type of pendulum, which consists of three cylinders tied with an elastic band. The differential equation of the oscillation of such a pendulum is derived and numerically solved
УДК 372.853	DOI 10.47639/0130-5522_2022_6_46

*Комаров смотрит и видит шар.
«Что это?» — шепчет Комаров.
А с неба грохочет: «Это шар».
«Какой такой шар?» — шепчет Комаров.
А с неба грохот: «Шар гладкоповерхностный!»*
Даниил Хармс «О явлениях и существованиях»

По просторам интернета «гуляет» вот такая задача (рис. 1).

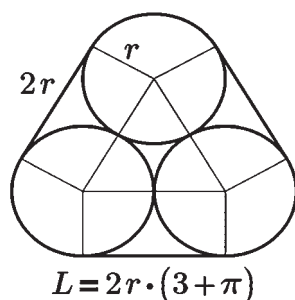


Рис. 1. Три окружности, стянутые веревкой

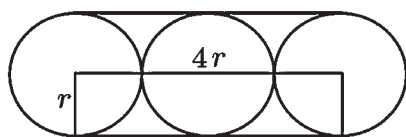
Есть три окружности с одинаковыми радиусами r . Необходимо найти длину веревки, связывающей их воедино в виде пирамиды. Задачу, кстати, можно немного усложнить и запустить назад в интернет — попросить найти площадь, ограниченную веревкой.

Ответ по длине веревки найти довольно просто. Для этого нужно начертить отрезки прямых, соединяющие центры окружностей между собой. Получится равносторонний треугольник со сторонами $2r$. Далее необходимо соединить центры окружностей с точками, где веревка отрывается от окружностей. Получатся три прямоугольника со сторонами r и $2r$. Длина веревки L будет равна длине одной окружности (длина трех дуг окружности с углом 120 градусов) плюс шесть радиусов окружностей (три длинные стороны прямоугольников). Соответствующую формулу можно увидеть внизу рисунка 1.

Задачу можно обобщить: найти длину веревки, связывающей любое число окружностей любого радиуса. Если оставить три разных окружности, но «связывать» их не веревкой, а треугольником, то мы придем к задачам, решенным итальянским мате-

матиком Мальфатти [1]. Это треугольники Мальфатти и задача Мальфатти.

А давайте перейдем от математики (геометрии) к физике и возьмем три одинаковых цилиндра массой m (три круглых карандаша, например, или три алюминиевые банки с напитками (рис. 9), стянем их не веревкой, а круглой (замкнутой) резинкой. Примерно так стягивают в пучок волосы на голове или банкноты в пачку. Потом положим все это плашмя на стол (рис. 2). Что произойдет?



$$L = 2r \cdot (4 + \pi) \quad \frac{4 + \pi}{3 + \pi} = 1.163$$

Рис. 2. Три цилиндра (вид с торца), стянутые резинкой и положенные на стол (показана формула длины резинки L и ее относительное удлинение по сравнению со случаем, показанным на рисунке 1)

Ответ тоже может показаться довольно простым: резинка стянет три цилиндра в пирамиду, показанную на рисунке 1. Длина резинки при этом минимизируется, уменьшится примерно на 17 процентов, которые мы еще упомянем. Так мыльный пузырь «стягивается» в шар, у которого, как известно, минимальная поверхность среди геометрических тел одного объема.

Но резинки бывают разными — с разной жесткостью. Тут самое время вспомнить знаменитый «школьный» закон Гука, гласящий, что растяжение резинки пропорционально силе, к ней приложенной. Коэффициент пропорциональности — это коэффициент упругости k (коэффициент Гука). Материалов, отвечающих такому линейному закону, в природе нет. Дело обстоит следующим образом. При незначительных растяжениях мы имеем некую линейность, существенно упрощающую расчеты. Наша резинка будет удлиняться менее чем на 17% (рис. 2

с числом 1,163...), и мы вправе применить тут линейный закон Гука¹. Но при значительных растяжениях линейность пропадет [2]: если резинку сильно растягивать, то она постепенно перестанет удлиняться, а потом и вовсе порвется. Если в наш расчет ввести нелинейность, то задача несколько усложнится (в формуле потенциальной энергии резинки появится интеграл), но характер ответа останется прежним.

Так вот, если резинка достаточно эластичная, то может произойти следующее.

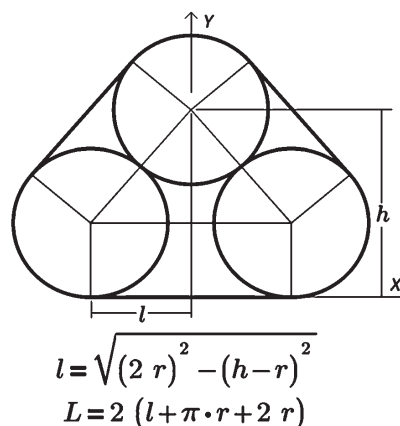


Рис. 3. Подвешенный средний цилиндр

Средний цилиндр возможно окажется в стабильном положении, показанном на рисунке 3, характеризуемым тем, что сумма потенциальных энергий верхнего цилиндра и растянутой резинки станет минимальной (принцип Д'Аламбера–Лагранжа [3]). Докажем это простым физико-геометрическим

¹ 17 и 7 — это два «красивых» простых числа, но не только. Если рассматривать простейший маятник (груз, подвешенный на веревочке), то там фигурирует число 7. Условно считается, что при угле отклонения маятника от вертикали меньшем чем на 7 градусов в дифференциальном уравнении такого маятника синус угла можно заменить на сам угол, что существенно упрощает решение задачи и дает знаменитую «школьную» формулу периода колебания маятника с квадратным корнем. Кстати, у простейшего маятника можно тоже заменить жесткую веревочку на эластичную резинку

расчетом с учетом того, что треугольник, соединяющий центры окружностей (рис. 1), теперь будет не равносторонним, а равнобедренным с длиной основания $2l$ и боковыми сторонами, равными $2r$.

На рисунке 4 показана созданная в среде Mathcad [4] функция PE с аргументами h и k , возвращающая потенциальную энергию нашей механической системы, состоящей из трех цилиндров и стягивающей их резинки. В функции PE аргумент h — это высота подъема среднего цилиндра (рис. 3), а k — коэффициент упругости резинки. Эта энергия складывается из потенциальной энергии приподнятого среднего цилиндра PE_D и потенциальной энергии растянутой резинки PE_B . Резинка, повторяем, растягивается на величину ΔL незначительно, поэтому можно задействовать в расчетах линейный закон Гука. Формула для потенциальной энергии растянутой резинки с коэффициентом упругости k , умноженным на половину квадрата растяжения резинки ΔL , повторяет формулу кинетической энергии, где вместо коэффициента упругости выступает масса, а вместо растяжения — скорость. Сразу вспоминается рогатка, передающая потенциальную энергию растянутой резинки в кинетическую энергию вылетающего из рогатки камня... Кинетическая энергия всех трех цилиндров будет учтена, когда мы будем составлять и решать дифференциальное уравнение колебательных движений цилиндров (рис. 4).

$$\begin{array}{l}
 m := 1 \text{ kg} \qquad r := 1 \text{ m} \\
 PE(h, k) := \left\| \begin{array}{l} PE_D \leftarrow m \cdot g \cdot (h - r) \\ PE_B \leftarrow \left\| \begin{array}{l} l \leftarrow \sqrt{(2r)^2 - (h - r)^2} \\ L \leftarrow 2(l + \pi \cdot r + 2r) \\ \Delta L \leftarrow L - 2r \cdot (3 + \pi) \\ k \cdot \frac{\Delta L^2}{2} \end{array} \right\| \\ PE_D + PE_B \end{array} \right\|
 \end{array}$$

Рис. 4. Формула потенциальной энергии трех цилиндров, стянутых резинкой

Но мы отвлеклись! Вернемся к нашей задаче.

На рисунке 5 показан график изменения потенциальной энергии нашей механической системы с некой потенциальной ямой — с локальным минимумом суммы энергий (точка С). Как догадывается читатель, коэффициент k (6,5 Н/м) был подобран так, чтобы у данной кривой появился локальный минимум, а правый конец кривой (точка D) был несколько выше локального максимума (точка В).

Итак, три цилиндра с радиусом r в один метр и массой m в один килограмм² стянуты резинкой с коэффициентом жесткости k , равным шести с половиной ньютон на один метр, и выложены на стол ($h = r$, точка А на рис. 5, см. также рис. 2). Затем мы медленно приподнимаем средний цилиндр (увеличиваем значение h) и помещаем его в локальный максимум (точка В). Здесь цилиндр будет находиться в метастабильном неподвижном состоянии. Малейшее внешнее воздействие (например, легкий удар по столу) может вернуть цилиндр на стол (точка А, $h = r$) либо превратить его в своеобразный маятник, который станет перекачиваться около локального минимума (точка С). Скорость затухания такого маятника будет зависеть от сил трения, ко-

² Эти значения, конечно, условные. Но сразу вспоминается старый метрологический анекдот. Диалог на экзамене.

Преподаватель:

— Что такое лошадиная сила?

Студент:

— Это сила, какую развивает лошадь ростом в один метр и весом в один килограмм.

Преподаватель:

— Да где же вы такую лошадь видели!?

Студент:

— А ее так просто не увидишь. Она хранится в Париже, в Палате мер и весов.

Вариант ответа современного школьника — жертвы ЕГЭ и рекламы, еще больше шокирующий преподавателя: «Лошадиная сила — это... шампунь».

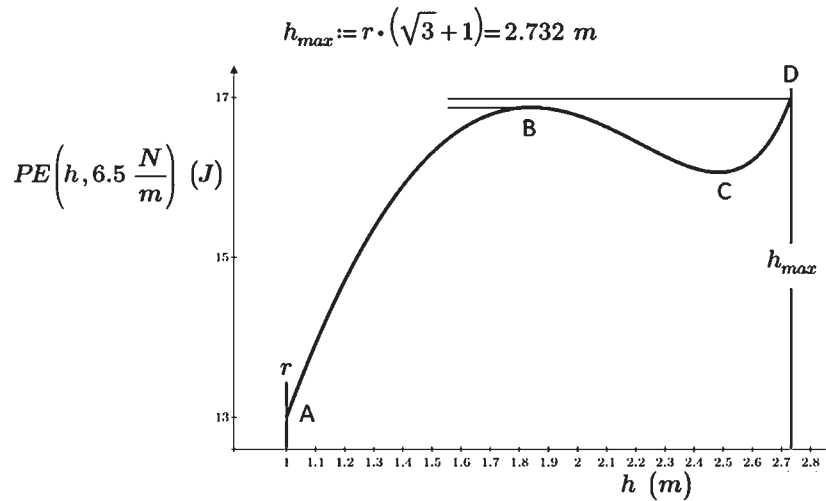


Рис. 5. График изменения потенциальной энергии трех цилиндров, стянутых эластичной резинкой (вариант 1)

торыми в нашем мысленном эксперименте можно пренебречь.

Можно поступить иначе. Переместить средний цилиндр почти на правый край кривой (точка D на рис. 5, $h = h_{max}$) и отпустить его. Если мы поднимем цилиндр выше точки локального максимума, то цилиндр «перекатится» через этот максимум и упадет на стол. Если же цилиндр будет поднят не так высоко, то он станет вести себя как маятник, — будет «перекатываться» с бока на бок» около локального минимума.

Но если коэффициент упругости k стягивающей резинки уменьшать, то маятника мы не получим. Средний цилиндр, после того как его приподнимут, «скатится» вниз на стол по кривой, показанной на рисунке 6. На этой кривой также есть метастабильная точка, но это не локальный максимум, а точка перегиба, координаты которой не сложно найти через численное решение системы двух уравнений с двумя неизвестными (рис. 6 — равенство нулю первой и второй производных функции потенциальной

Solve	
Guess values	$h := 2 \text{ m} \quad k := 7 \frac{\text{N}}{\text{m}}$
Constrains	$\frac{d}{dh} PE(h, k) = 0 \quad \frac{J}{m}$
	$\frac{d^2}{dh^2} PE(h, k) = 0 \quad \frac{J}{m^2}$
Solver	$\begin{bmatrix} h_1 \\ k_1 \end{bmatrix} := \text{Find}(h, k)$
	$h_1 = 2.217 \text{ m} \quad k_1 = 5.446 \frac{\text{N}}{\text{m}}$

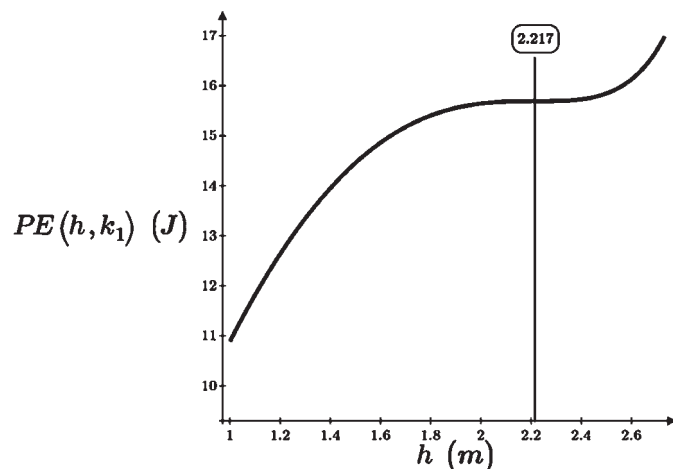


Рис. 6. Расчет точки перегиба на кривой потенциальной энергии и график изменения потенциальной энергии трех цилиндров, стянутых эластичной резинкой (вариант 2)

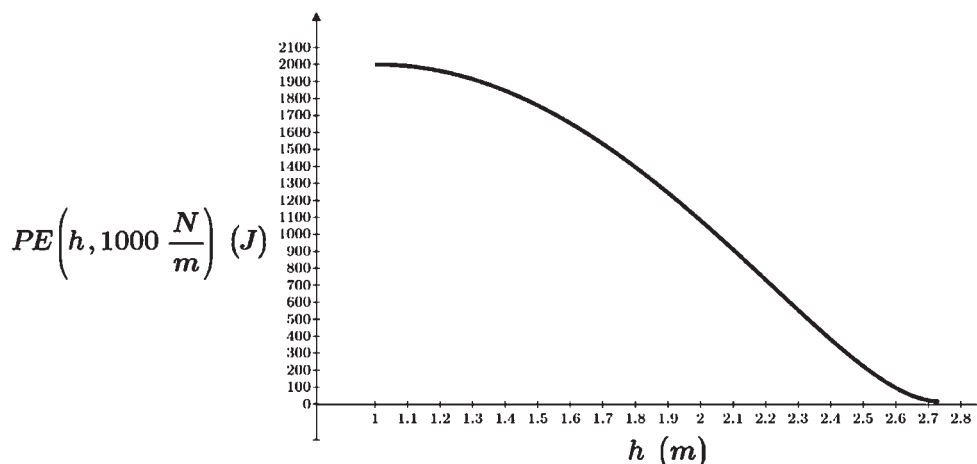


Рис. 7. График изменения потенциальной энергии трех цилиндров, стянутых жесткой резинкой (вариант 3)

энергии). В этой точке средний цилиндр будет неподвижен, но «удар по столу» заставит его скатиться вниз.

Если же резинка будет достаточно жесткой (рис. 7), то три цилиндра, лежащие на столе, также будут находиться в метастабильном состоянии. Но «легкий» удар по столу стянет цилиндры в пирамиду, показанную на рисунке 1. При этом средний шар необязательно должен оказаться наверху. Один из крайних шаров может начать подниматься первым, и вся конструкция перевернется набок.

Несложно доказать, что на концах кривой, показанной на рисунке 7, производные равны нулю.

Из задачи можно убрать «физику», оставив только «математику», точнее, элементарный функциональный анализ. Для этого переменные m , g и r нужно сделать безразмерными и присвоить им единичные значения³ (рис. 8). Получится довольно простая функциональная зависимость, которую можно анализировать методами символьной, а не численной математики и находить выражения для точек минимума, максимума и точки перегиба. Для начала следует построить семейство кривых с абсциссой h при разных значениях k .

На графиках можно показать изолинии

локального максимума (первой метастабильной точки) и точки перегиба (второй метастабильной точки). Первая изолиния при увеличении значения k будет приближаться к единице (левый край графика), а вторая — к правому краю графика (к максимальному значению h , равному корню из трех плюс единица).

Задача, описанная в статье, хороша тем, что ее несложно отобразить на простом физическом опыте (рис. 9), где показаны три фотографии алюминиевых банок, стянутых резинками — одной, двумя и тремя.

Если банки, резинки и поверхность сто-

³ Присвоение радиусу и массе единичных значений не вызывает вопросов (см. сноску 2). Но вот единица для ускорения свободного падения может кого-то смутить. Поясним! Физическая первооснова метра — это длина маятника, период колебания которого равен двум секундам [2]. Но можно было задать метр и так: метр — это такое расстояние, при котором ускорение свободного падения равно одному метру, деленному на секунду в квадрате. В школах на уроках физики для облегчения расчетов рекомендуют округлять g до 10. Мы тоже можем в нашем преобразовании на рисунке 8 переменной g присвоить десятку, а не единицу. В «хвостике» итогового выражения $h - 1$ замениться на $10h - 10$, но характер изгибов кривых это не поменяет.

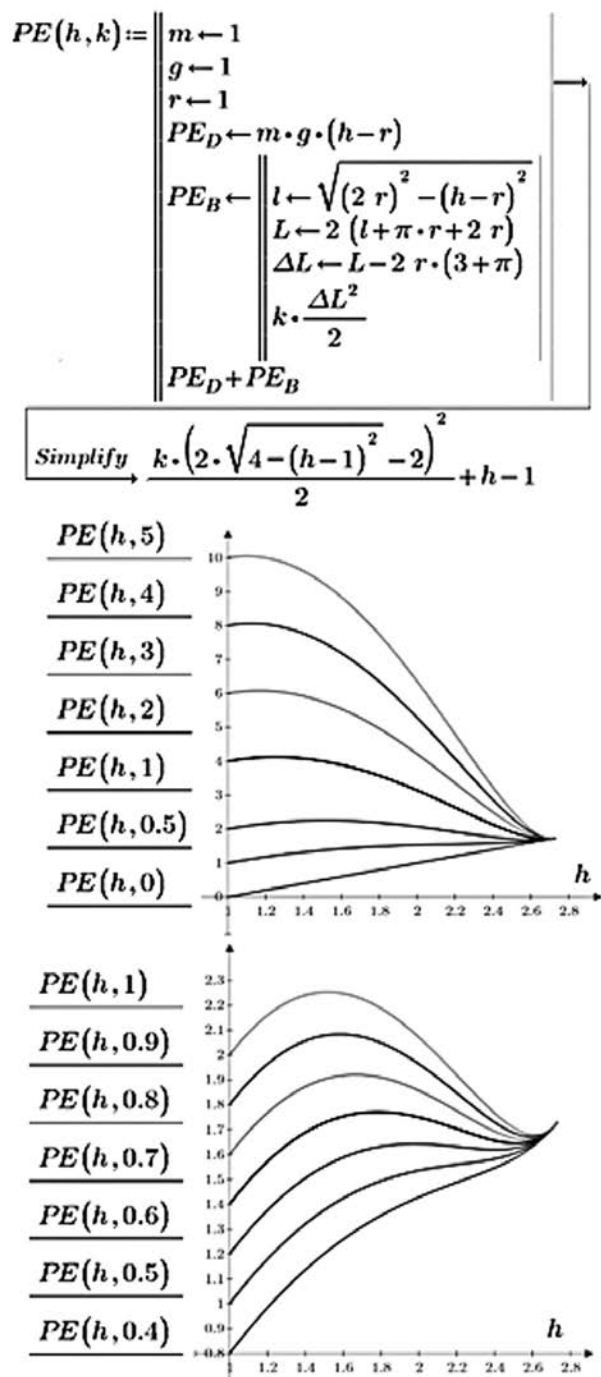


Рис. 8. Упрощение функции потенциальной энергии с показом семейства кривых

ла хорошо смазать маслом, то можно постараться получить реальный вышеописанный маятник (осциллятор). При этом неплохо бы сделать так, чтобы резинки находились в

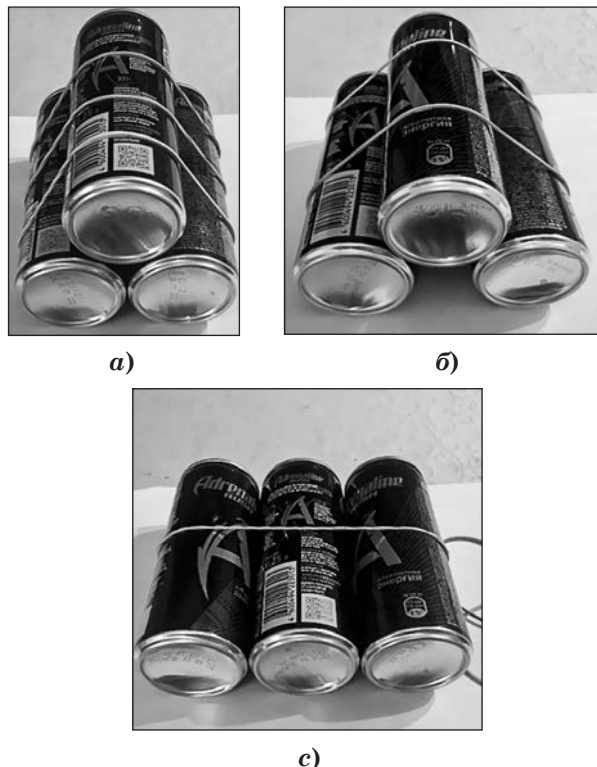


Рис. 9. Фотографии трех банок, отображающие три вышеописанные стабильные случая стягивания резинкой окружностей: а) три резинки (рис. 1), б) две резинки (рис. 3), с) одна резинка (рис. 2)

неких круговых желобках банок и не соприкасались с поверхностью стола.

Полушутливая ремарка. В банках на рисунке 9 хранятся не простые напитки, а энергетические напитки — это так называемые энергетика. На банках видна надпись (слоган) «Абсолютная энергия». Можно предположить, что в первой банке хранится «абсолютная» кинетическая энергия, во второй — «абсолютная» потенциальная энергия приподнятой средней банки, а в третьей — «абсолютная» потенциальная энергия растянутой резинки. Шутки шутками, но при колебании нашего маятника эти энергии будут переходить из одной формы в другую, но их сумма должна оставаться постоянной. Это без учета потери энергии на трение. Постоянство суммы энергий или плавное уменьшение этой суммы — один из

критериев правильности созданной математической модели нашего нового маятника.

Можно взять более трех цилиндров, стянуть их резинкой и посмотреть, как будет вести себя эта связка, если ее положить на стол.

А теперь давайте вернемся к началу статьи — к эпиграфу!

Нашу задачу можно перевести из плоскости в объем: взять не цилиндры, а «гладко-поверхностные» шары (рис. 10) и обтянуть их не резинкой, а эластичной пленкой. Пленка пусть будет прозрачной, а лучше совсем невидимой.

Если она будет достаточно жесткой, то шары выстроятся в пирамиду, показанную на рисунке 10 (см. также рис. 1). Если же пленка будет достаточно эластичной, то верхний шар опустится на стол, раздвинув нижние шары (рис. 2). Следует ожидать, что при определенной промежуточной эластичности пленки вся эта объемная конструкция поведет себя как маятник. Здесь, правда, следует принять меры к тому, чтобы нижние шары, лежащие на столе, раздвигались строго прямолинейно в нужные стороны. Для этого необходимо сделать так, чтобы они катались в неких желобках, сделанных на поверхности стола.



Рис. 10. Одиннадцать шаров в прозрачной пленке

Кроме того, можно исследовать систему с разными радиусами шаров.

Упругость резинки и пленки сильно зависит от температуры. Нагревая или охлаждая цилиндры и шары, стянутые резинкой

или пленкой, можно получить все вышеописанные случаи.

Составлено дифференциальное уравнение, решение которого дает периодические функции изменения положения центра среднего цилиндра во времени. При его составлении были учтены геометрия системы трех цилиндров с резинкой, второй закон Ньютона и то положение, что сумма двух потенциальных энергий (энергии приподнятого среднего шара и энергии растянутой резинки), а также кинетическая энергия всех трех цилиндров остается постоянной. Если учитывать трение, то эта сумма будет уменьшаться за счет диссипации энергии, превращения ее в тепло. Кроме того, можно и нужно будет учитывать явление гистерезиса периодически растягиваемой резинки — изменение во времени ее жесткости.

Без учета сил трения это сделать довольно просто (рис. 11–13).

Если рисунок 3 перевернуть вверх ногами, то можно увидеть новое стилизованное изображение сердца с тремя желудочками-окружностями. Если создать анимацию изменения во времени положений этих «желудочков», то можно увидеть биение этого сердца. На сердце, кстати, похожа замкнутая сплошная кривая на рисунке 12 (фазовый портрет решения дифференциального уравнения). Замкнутую пунктирную кривую можно было бы назвать окружностью, если бы на осях были величины одной размерности. Но формально это окружность. Первая же волнообразная кривая (график изменения высоты среднего цилиндра во времени) — это, можно сказать, некая кардиограмма такого сердца.

Более будут походить на сердце четыре шара, стянутые эластичной пленкой в некое подобие конуса (как на рис. 10). Кстати, реальное конусообразное сердце человека имеет именно четыре полости — два предсердия и два упомянутых желудочка.

Все это и позволило добавить лирику в физику — дать нашему осциллятору имя «маятник-сердце».

$$r := 1 \text{ m} \quad m := 1 \text{ kg} \quad k := 0.65 \frac{\text{m} \cdot \text{g}}{\text{r}} = 6.374 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad t_{\text{end}} := 10 \text{ s}$$

Solve

$$y(0 \text{ s}) = 1 \text{ m} \quad y'(0) = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Constrains

$$\frac{2 \cdot m \cdot (4 \cdot r^2 + y(t)^2)}{2 \cdot y(t)^2 - 8 \cdot r^2} \cdot y''(t) = g \cdot m \downarrow + \left(-2 \cdot k \cdot \left(2 \cdot y(t) - \frac{2 \cdot r \cdot y(t)}{\sqrt{4 \cdot r^2 - y(t)^2}} \right) \right) \downarrow$$

$$+ \frac{4 \cdot m \cdot y(t) \cdot (y'(t))^2 \cdot (4 \cdot r^2 + y(t)^2)}{(2 \cdot y(t)^2 - 8 \cdot r^2)^2} - \frac{2 \cdot m \cdot y(t) \cdot (y'(t))^2}{2 \cdot y(t)^2 - 8 \cdot r^2}$$

Solver

$$y := \text{Odesolve}(y(t), t_{\text{end}})$$

Рис. 11. Нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка с начальными условиями колебания среднего (верхнего) цилиндра (рис. 3)

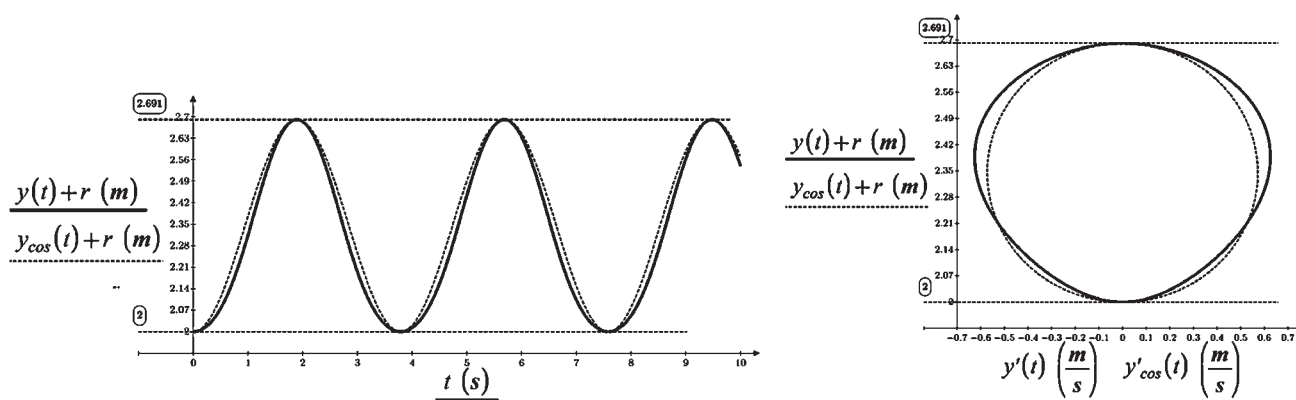


Рис. 12. Графическое отображение численного решения дифференциального уравнения колебания среднего (верхнего) цилиндра. Пунктир — синусоида

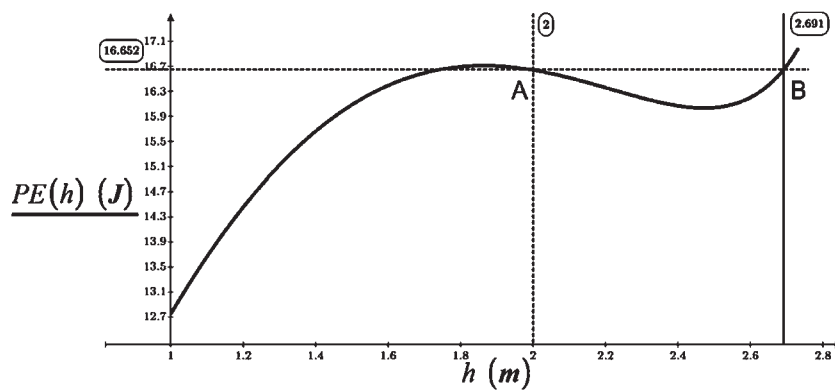


Рис. 13. График изменения потенциальной энергии колеблющегося цилиндра (рис. 12) в зависимости от высоты его подъема: А и В — точки максимального подъема

Обсуждение данной задачи, приведшей к идее нового маятника-сердца, можно посмотреть в [5]. Выражаем признательность участникам этой дискуссии. Там же можно посмотреть и анимации колебания нашего нового маятника (осциллятора), а также скачать соответствующие расчетные файлы.

Литература

1. *Очков В.Ф., Тихонов А.И. и др. Математика и новые информационные технологии // Математическое образование. 2021. № 1, (<http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/Geometry-IT.pdf>).*
2. *Очков В.Ф., Чудов В.Л., Писасич К., Герасимов Н.Г., Никульчев Е.В. Три нелинейно-*

сти маятника, или Улыбка фазового портрета // Cloud of Science. 2020. Т. 7. С. 6–39. (<http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/Pendulum.pdf>).

3. *Гантмахер Ф.Р. Лекции по аналитической механике: Учебное пособие для вузов / Под ред. Е.С. Пятницкого. — М.: Физматлит, 2005. — 264 с. (https://www.studmed.ru/gantmaher-fr-lekcii-po-analiticheskoy-mehanike_98f223dc7f3.html).*

4. *Очков В.Ф., Богомолова Е.П., Иванов Д.А. Физико-математические этюды с Mathcad и Интернет. — Издательство Лань, 2018 (<http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/T-2018/PhysMathStudies.pdf>).*

5. <https://community.ptc.com/t5/PTC-Mathcad/New-problem-with-circles/td-p/780229>.

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Издательство «Школьная Пресса» предлагает вам познакомиться с содержанием архивных номеров журнала **ФИЗИКА В ШКОЛЕ**, начиная с выпусков 1949 года.

Архивные номера дополнят и обогатят информацию по интересующей вас теме.

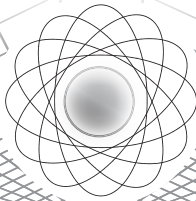
Содержание этих номеров вы найдете на сайте издательства schoolpress.ru в разделе «Архив номеров».

Интересующую вас отдельную статью или номер журнала любого года издания можно заказать в электронном виде (PDF-файл).

Заявки присылайте на электронную почту school-press@ya.ru.

Стоимость статьи — **100** рублей, номера журнала — **350** рублей.

Доставка pdf-файла на e-mail заказчика



ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КЛЮЧЕВЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ОБУЧЕНИИ РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ В VIII КЛАССЕ (НА ПРИМЕРЕ ТЕМЫ «ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ»)

Ф.М. Сабинова , к.ф.-м.н., доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Елабужский институт (филиал), г. Елабуга; FMSabirova@kpfu.ru	F.M. Sabirova , PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Kazan (Volga Region) Federal University, Yelabuga Institute (branch); FMSabirova@kpfu.ru
А.М. Имамова , студент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Елабужский институт (филиал), г. Елабуга; учитель физики, средняя общеобразовательная школа № 34 с углубленным изучением отдельных предметов, г. Набережные Челны	A.M. Imamova , student, Kazan (Volga Region) Federal University, Yelabuga Institute (branch), Yelabuga; physics teacher, Secondary school No. 34 with in-depth study of individual subjects, Naberezhnye Chelny
Ключевые слова: метод ключевых ситуаций, количество теплоты, решения задач по физике, педагогический эксперимент	Keywords: method of key situations, amount of heat, problem solving in physics, pedagogical experiment
В статье приведен сравнительный анализ решения задач традиционным способом и с использованием метода ключевых ситуаций на примере темы «Тепловые явления»	The article provides a comparative analysis of solving problems in the traditional way and using the method of key situations on the example of the topic «Heat events»
УДК 372.853	DOI 10.47639/0130-5522_2022_6_55

Одной из важнейших проблем в педагогической деятельности учителя является выбор учебного пособия, отвечающего всем требованиям педагога в современном образовании. Многие авторы пытаются сделать материал содержательным, доступным, лаконичным, понятным для любого учащегося. В нашей статье рассмотрим два учебника по физике для VIII класса по теме «Тепловые явления», авторами которых являются А.В. Пёрышкин [1] и Л.Э. Генденштейн [2].

Известно, что у многих учащихся возникает трудность восприятия такой учебной дисциплины как физика. Задачи, подразумевающие подробное решение, заставляют учеников задаться такими вопросами: с чего необходимо начать? какими формула-

ми нужно пользоваться? зачем переводить размерность из одной единицы измерения в другую? и т.д. [3]. И для того, чтобы получить ответы на эти вопросы, обучающиеся обращаются к различным источникам, одним из которых является учебное пособие.

Глава «Тепловые явления» учебника А.В. Пёрышкина содержит параграфы, каждый из которых раскрывает в полной мере информацию о процессах: нагревание (охлаждение), плавление (отвердевание), парообразование. Все проводимые опыты описываются в деталях, которые в итоге приводят к определенным умозаключениям в виде формул. В конце параграфов можно найти вопросы, упражнения и задания, которые направляют обучающихся на усвое-

ние теоретической базы в виде практических задач. Стоит отметить, что не во всех параграфах предложены задания и упражнения. Также в учебнике А.В. Пёрышкина есть рубрика «Это любопытно», помогающая ученикам расширить свой кругозор.

В качестве примера, рассмотрим задачу и метод ее решения по этому учебнику.

Берем две кастрюли, нагреваем их на одинаковых горелках, каждую на 10°C . Но в первую наливаем 1 кг воды, во вторую — 1 кг масла. В каком случае количество теплоты будет больше: количество теплоты, переданное кастрюле с водой, или количество теплоты, переданное кастрюле с маслом?

Решение. Итак, дано: $m_{\text{в}} = m_{\text{м}} = 1 \text{ кг}$; изменение температуры воды и масла одинаково, и оно равно 10°C ,

$$c_{\text{в}} = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}, \quad c_{\text{м}} = 1700 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Воспользуемся двумя формулами для расчета количества теплоты при нагревании и сравним полученные ответы:

$$Q_{\text{в}} = m_{\text{в}} c_{\text{в}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) = \\ = 1 \text{ кг} \cdot 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 10^\circ\text{C} = 42000 \text{ Дж},$$

$$Q_{\text{м}} = m_{\text{м}} c_{\text{м}} (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}) = \\ = 1 \text{ кг} \cdot 1700 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 10^\circ\text{C} = 17000 \text{ Дж}$$

получаем:

$$Q_{\text{в}} > Q_{\text{м}}.$$

Заметим, что при решении задачи ученики целенаправленно находят искомую физическую величину, используя формулы, без дополнительных рассуждений.

Прежде чем перейти к рассмотрению учебника Л.Э. Генденштейна и основы его предлагаемой методики при обучении решения задач, разберем более детально такой термин как метод ключевой задачи. Ключевая задача — задача, при которой обучающийся, усваивая алгоритм ее решения, способен решить целый ряд задач, анало-

гичных ей в рамках школьного курса. Существуют несколько подходов к пониманию данного определения [4, с. 17].

1. Задача-факт. Например, ученик получает дополнительную формулу с помощью различных преобразований и выражений, которую в последующем применяет уже в других задачах.

2. Задача-метод. Понимание данного определения кроется в том, что педагог выбирает такое минимальное количество задач по изучаемой теме для его дальнейшего разбора с детьми, после которого ребята могут решить задачу любого характера по данной теме.

3. Типовая задача. Данный подход направлен на конкретизацию в стандартной ситуации общего алгоритмического предписания к решению задач. Стоит отметить, что типовая задача и ключевая задача — термины не тождественные.

Ключевая задача тесно взаимосвязана с ключевой ситуацией. Дадим определение: ключевая ситуация — ситуация, в которой обучающийся работает с идеальными объектами, образующими содержание какой-либо предметной области [4, с. 18]. На базе идеальных объектов могут быть заложены как ключевые ситуации, так и ключевые задачи. Применяя метод, основанный на таких задачах, ученики выделяют и применяют ключевые ситуации, с учетом того, что рекомендации по структуре решений задач не предлагаются.

Суть данного метода была обоснована В.В. Давыдовым, а использование ключевых ситуаций в школьной практике по физике было реализовано Л.Э. Генденштейном.

Обратимся к другому рассматриваемому нами учебнику по физике, автором которого является Л.Э. Генденштейн [2]. Его метод строится на ключевых ситуациях. Он подразумевает самостоятельное решение различных задач учениками. Данное пособие отличается тем, что на уроке выстраивается диалог между учителем и учащимся: направляющий вопрос от педагога — ответ

от ученика. Тем самым ребенок самостоятельно приходит к верному ответу. Применяя метод ключевых ситуаций, необходимо пользоваться алгоритмом:

- 1) читая условие задачи, нужно «опустить» вопрос;
- 2) представить описанную в условии задачи ситуацию, проанализировать ее и выявить ее закономерности;
- 3) записать полученные закономерности в виде уравнения или системы уравнений;
- 4) вновь внимательно прочитать условие задачи, теперь уже принять во внимание сам вопрос (то, что необходимо найти);
- 5) решить систему уравнений относительно неизвестной физической величины.

В процессе разбора задачи обучающийся таким образом, углубляясь в ситуацию, расширяет ее. Разберем на примере.

Задача. При сгорании некоторой массы природного газа выделилось количество теплоты 4,4 МДж. Какова масса газа?

Решение. В соответствии с методом ключевых ситуаций сформулируем задачу без вопроса: при сгорании некоторой массы природного газа выделилось количество теплоты 4,4 МДж.

Представим эту ситуацию: при сгорании топлива выделилось определенное количество теплоты. Естественным образом задаемся вопросами.

– Играет ли роль, какое именно топливо используется, или нет?

– Будет ли отличаться количество теплоты при сгорании водорода при той же массе, что и природный газ?

Ответ на эти вопросы следующий: в каждом случае количество теплоты будет различным, так как различные виды топлива отличаются друг от друга.

Задаемся новым вопросом: какой физической величиной это можно показать?

q — удельная теплота сгорания топлива. Это табличная величина.

Какие закономерности характерны для этой ситуации?

Запишем соотношение, при котором про-

исходит выделении количества теплоты при сгорании природного газа:

$$Q = qm.$$

Возвращаемся к самому вопросу этой задачи: какова масса газа?

Выражая из последнего уравнения массу и подставляя в конечную формулу данные, можно определить массу природного газа:

$$m = \frac{Q}{q}, \quad m = \frac{4,4 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{4,4 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = 0,1 \text{ кг}.$$

Задания, основанные на этом соотношении [5].

– Определите количество теплоты при сгорании топлива, если известны масса природного газа и его удельная теплота сгорания.

– Определите удельную теплоту сгорания топлива, зная массу и количество теплоты, выделившееся при сгорании этого топлива.

Учебник Л.Э. Генденштейна состоит из параграфов, в которых кратко и четко изложена теория, подкреплённая заданиями разных уровней сложности и домашней лабораторной работой [2].

Сравнивая два учебника и их методы решения задач, можно задаться вопросом: как быть, если в общеобразовательном учреждении изучается физика по учебнику А.В. Пёрышкина? Есть ли возможность в таком случае использовать метод Л.Э. Генденштейна?

Для того, чтобы урок был наиболее результативным, можно теорию подавать так, как предлагается в учебнике Пёрышкина, а практические задачи решать, руководствуясь методом, предложенным Генденштейном. Так, для проверки эффективности такого решения, нами был проведен педагогический эксперимент в общеобразовательной школе в VIII классах МАОУ «Средняя общеобразовательная школа № 34 с углубленным изучением отдельных предметов» г. Набережные Челны, находящихся в равных условиях. Он был проведен дважды: в 2020/2021 и 2021/2022 учебных годах.

В каждом из этих учебных лет были взяты два класса. В одном (8 «В») был применен метод ключевых ситуаций, в другом (8 «Г») проведен традиционный урок. В 2020/2021 учебном году результаты были следующие [6, с. 137]: из 29 человек в 8 «В» 21 человек справились с заданиями (72,4%), оставшиеся 8 человек (27,5%) не решили предложенные задания; в 8 «Г» классе из 29 человек не смогли прийти к верному ответу 12 учеников (41,4%), а 17 учеников выполнили задания правильно (58,6%).

В 2021/2022 учебном году было установлено, что из 30 обучающихся в 8 «В» 22 человека успешно выполнили задания (73,3%), 8 человек не справились с задачами (26,7%). В 8 «Г» 16 человек (53,3%) смогли выполнить задания верно, 14 учеников (46,7%) столкнулись с трудностями в решениях задач.

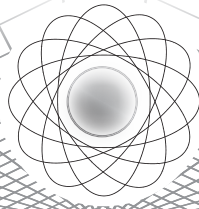
По результатам сравнительного анализа можно видеть, что прослеживается стабильность эффективности использования метода ключевых ситуаций. Стоит отметить, что количество учащихся за 2021/2022 учебный год возросло лишь на 1 человека в каждом классе, но, несмотря на это, виден рост успехов учащихся, решивших правильно задачи.

Таким образом, пользуясь методом ключевых ситуаций, можно способствовать развитию у обучающихся самостоятельного мышления. Учебно-методический комплекс, построенный на рассматриваемом методе, позволяет учащимся проводить более углубленный анализ, при котором затрагиваются разные области физики. При проведении эксперимента было заметно, что обучающиеся чувствовали себя более уверенно, когда приступали к решению той или иной задачи. Они также представляли себе ситуацию, записывали закономерности и только потом искали необходимую физическую величину. Стоит обратить внимание и на то, что после проведения педагогического эксперимента у учащихся стал прослеживаться интерес к

физике. Важно, что в процессе применения педагогом этого метода у ребят развивается умение задавать вопросы, благодаря различным обучающим играм, основанным на методе ключевых ситуаций. Можно сделать вывод, что данный метод способствует росту у учащихся мотивации изучать данную дисциплину, улучшению их знаний, а также пониманию, что научиться решать задачи по физике возможно. Учителю для этого необходимо: решать вместе с детьми новые задачи, «открывать» ребятам их решение и наблюдать за тем, в каком направлении «движется мысль» обучающихся, направлять их, принимая участие в рассуждениях [7, с. 41]. Учебник, основанный на методе ключевых ситуаций, будет хорошим подспорьем для учеников, которые стремятся понять, как решать задачи по физике.

Литература

1. Пёрышкин А.В. Физика. 8 кл.: учеб. для общеобразоват. учреждений. — М.: Дрофа, 2018. — 240 с.
2. Генденштейн Л.Э., Булатова А.А. и др. Физика. 8 класс: в 2 ч. Ч. 1 / Под ред. В.А. Орлова. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2018. — 223 с.
3. Генденштейн Л.Э. Каковы задачи задач школьном курсе физики? // Физика ПС. 2009. № 17.
4. Курочкин А.И. Понятие учебной ключевой задачи по физике // Физика в школе. 2018. № 8. С. 16–20.
5. Генденштейн Л.Э., Орлов В.А., Никифоров Г.Г. Как решать задачи по физике (основная школа). Подготовка к ГИА. — М.: Педагогический университет «Первое сентября», 2010. — 128 с.
6. Сабирова Ф.М., Имамова А.М. Использование метода ключевых ситуаций при обучении решению задач по физике // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 5–7(73). С. 134–137.
7. Генденштейн Л.Э. Шерлок Холмс и доктор Ватсон готовятся к ЕГЭ по физике // Физика ПС. 2012. № 8. С. 41–44.



АСТРОНОМИЯ

РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ: СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ НА БУДУЩЕЕ

М.Ю. Королев , д.п.н., заведующий кафедрой, Московский педагогический государственный университет, Москва; myu.korolev@mpgu.su	M.Yu. Korolev , DrSci (Pedagogy), the head of the Department, Moscow Pedagogical State University, Moscow; myu.korolev@mpgu.su
Ключевые слова: реликтовое излучение, эволюция Вселенной, анизотропия, поляризация, наземные радиотелескопы	Keywords: the cosmic microwave background, astronomy, evolution of the universe, anisotropy, polarization, ground-based radio telescopes
В статье рассматривается история изучения реликтового излучения с помощью наземных радиотелескопов в последние 15 лет. Обсуждается важность данного направления исследований для понимания эволюции Вселенной. Описываются перспективы будущих экспериментов по исследованию реликтового излучения	The article deals with the history of the study of the cosmic microwave background using ground-based radio telescopes in the last 15 years. The importance of this area of research for understanding the evolution of the Universe is discussed. The prospects of future experiments on the study of the cosmic microwave background are described
УДК 372.853	DOI 10.47639/0130-5522_2022_6_59

Введение

В этом номере журнала мы заканчиваем публикацию серии статей, посвященных исследованию реликтового излучения. В предыдущих статьях [4, 5] были рассмотрены вопросы предсказания и открытия реликтового излучения, обнаружения его анизотропии и поляризации. Подробно описано значение как космических спутников «Реликт-1», COBE, WMAP и «Планк», так и аэростатных экспериментов, и первых наземных исследований.

В статье будут рассмотрены последние исследования реликтового излучения с помощью наземных телескопов, описаны перспективы будущих исследований и подведены некоторые итоги. Эта информация поможет учителям астрономии и школьникам быть в курсе современных направ-

лений развития науки и техники. Также в статье будет обращено внимание на роль российских ученых, как теоретиков, так и экспериментаторов, в изучении реликтового излучения.

Исследования реликтового излучения с помощью наземных телескопов в течение последних 15 лет

Обратимся теперь к истории исследования реликтового излучения с помощью нового поколения наземных радиотелескопов, которые начали свою работу во второй половине нулевых годов XXI века.

Прежде всего, это 10-метровый Южный полярный телескоп (South Pole Telescope, SPT, США) (рис. 1). Данный радиотелескоп был открыт в феврале 2007 г. на станции



Рис. 1. Южный полярный телескоп в ноябре 2009 года (изображение с сайта <https://physics.illinois.edu>)

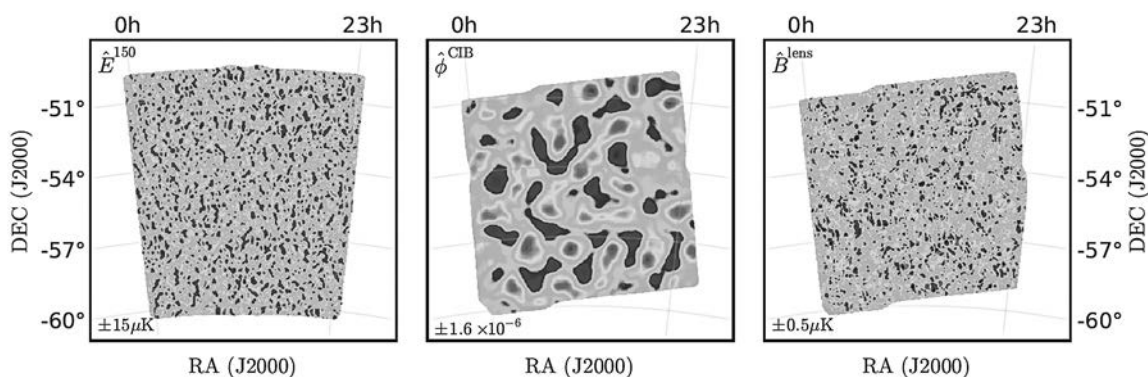


Рис. 2. Е-моды и В-моды в поляризации СМВ (левая и правая картинка соответственно) и гравитационный потенциал крупномасштабного распределения вещества, линзирующего реликтовое излучение (центральная картинка) (изображение телескопа SPT и космической обсерватории «Гершель» с сайта <https://sci.esa.int>)



Рис. 3. Телескоп VISCER2 возле Южного полярного телескопа (изображение с сайта en.wikipedia.org)

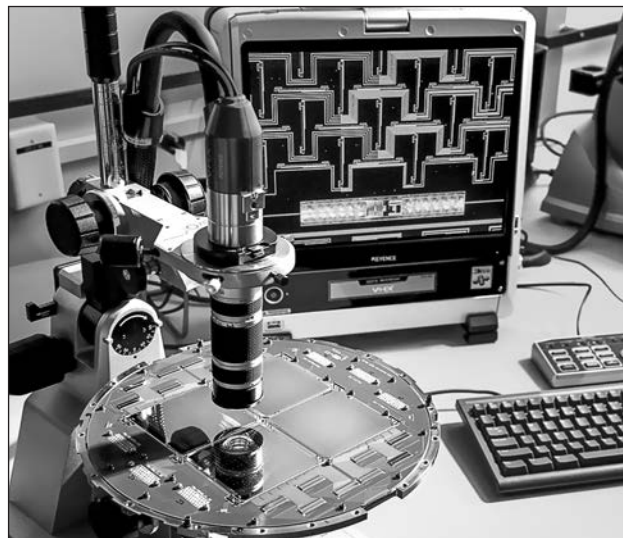


Рис. 4. Детекторная матрица VISCER2 под микроскопом (изображение с сайта en.wikipedia.org)

Амундсен-Скотт на Южном полюсе Земли в Антарктиде. Этот телескоп продолжает свою работу и в настоящее время. За это время на телескопе несколько раз меняли камеру приемника, каждый раз улучшая ее чувствительность.

Одной из задач SPT было исследование реликтового излучения, в частности, его взаимодействия с веществом галактических скоплений, и изучение поляризации реликтового излучения. На телескопе впервые была обнаружена В-мода поляризованного реликтового излучения. Ученые предполагают существование двух типов В-мод. Первый тип возникает за счет воздействия первичных гравитационных волн, образовавшихся в эпоху инфляции, на реликтовое излучение. По нему можно получать данные об инфляционном расширении Вселенной. Второй тип образуется в результате гравитационного линзирования реликтового излучения в более поздние эпохи эволюции Вселенной. Именно этот тип В-мод и был открыт телескопом SPT (рис. 2).

Далее следует отметить серию экспериментов по исследованию реликтового излучения под названием BICEP (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) и Keck Array. В этих экспериментах использовались приборы пяти поколений. Прибор BICEP1 начал работу в 2006 г., BICEP2 (рис. 3, 4) — в 2009 г. [3], Keck Array — в 2012 г., BICEP3 — в 2016 г., а BICEP Array начал устанавливаться в 2017–2018 гг. Все эти инструменты работали на Южном полюсе рядом с Южным полярным телескопом.

Основной целью всех перечисленных экспериментов являлось измерение поляризации реликтового излучения, в частности, обнаружение В-моды. В марте 2014 г. группой ученых-астрофизиков, занимавшихся обработкой данных эксперимента BICEP2, было объявлено об обнаружении В-моды. Этот результат был интерпретирован как открытие первичных гравитационных волн, которые должны были своим воздействием на реликтовое излучение привести к возникновению

поляризационной В-моды [7]. К сожалению, в сентябре 2014 г. появилась публикация исследователей, которые на основе данных спутника «Планк» показали, что результаты эксперимента BICEP2 можно полностью списать на галактическую пыль [8].

В 2006 г. на острове Мауна-Лоа на Гавайях на высоте 3400 м над уровнем моря был открыт радиотелескоп Array for Microwave Background Anisotropy (AMiBA) (рис. 5). Это первый и единственный радиотелескоп, расположенный в Америке. Он предназначен для изучения реликтового излучения, в частности, эффекта Сюняева–Зельдовича. Телескоп способен наблюдать как температурную анизотропию реликтового излучения, так и его поляризацию на мультиполях от 800 до 8000. Это соответствует угловым масштабам на небе от 2 до 20 угловых минут. Интерферометр AMiBA продолжает работать и в настоящее время.



Рис. 5. Радиотелескоп AMiBA с тринадцатью 1,2-метровыми антеннами (изображение с сайта <http://ytla.asiaa.sinica.edu.tw>)

В октябре 2007 г. начал работать 6-метровый телескоп Atacama Cosmology Telescope (ACT) (рис. 6). Он расположен на высоте 5190 м на горе Серро Токо в пустыне Атакама в Чили. Данное местоположение телескопа обусловлено тем, что большая высота и засушливая территория помогают в наблюдении реликтового излучения. Это связано с тем, что водяной пар в атмосфере

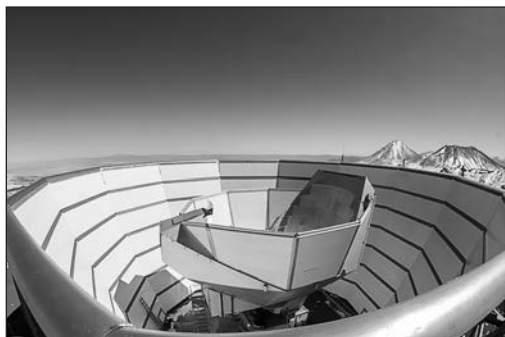


Рис. 6. Радиотелескоп АСТ
(изображение с сайта en.wikipedia.org)

ре испускает микроволновое излучение, что мешает исследовать собственно реликтовое излучение.

Телескоп предназначен для выполнения микроволновых обзоров неба с высоким разрешением. Наблюдения производятся с разрешением около одной угловой минуты на трех частотах: 145 ГГц, 215 ГГц и 280 ГГц. В 2010 и 2011 гг. были опубликованы результаты исследований, полученные на АСТ: 1) точные измерения температуры реликтового излучения; 2) обнаружение спектра мощности гравитационного линзирования реликтового излучения (рис. 7). Эти данные (совместно с данными WMAP) позволили доказать наличие во Вселенной темной энергии.

В 2012 г. недалеко от телескопа АСТ начал

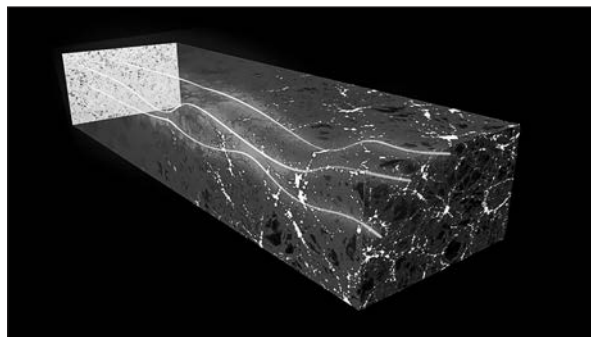


Рис. 7. Гравитационное линзирование реликтового излучения
(изображение с сайта <https://sci.esa.int>)

осуществляться эксперимент POLARBEAR (POLARization of the Background Radiation) с целью исследования поляризации реликтового излучения (рис. 8). Прибор для этого был установлен на телескопе Huan Tran (НТТ).

В 2014 г. исследователями были опубликованы результаты измерения поляризации В-моды в эксперименте POLARBEAR. Данный эксперимент охватывал меньший участок неба, чем эксперимент ВІСЕР2. Поэтому он был меньше подвержен воздействию галактической пыли. Ученые сообщили, что обнаруженная В-мода поляризованного реликтового излучения с вероятностью 97,2% имеет космологическое происхождение.

Еще один эксперимент, проведенный в пустыне Атакама в 2012–2014 гг., называл-



Рис. 8. Эксперимент Polarbear на телескопе Huan Tran (изображение с сайта en.wikipedia.org)



Рис. 9. Телескоп Atacama B-Mode Search (изображение с сайта en.wikipedia.org)

ся Atacama B-Mode Search (ABS) (рис. 9). В этом эксперименте также исследовалась поляризация реликтового излучения с целью проверки теории инфляции.

В 2015 г. в пустыне Атакама открылся комплекс телескопов **Cosmology Large Angular Scale Surveyor (CLASS)**. Целью эксперимента опять же является проверка космологической теории инфляции, попытка поиска первичных гравитационных волн на основе изучения поляризации реликтового излучения. Четыре телескопа CLASS могут делать обзор примерно 65% неба на четырех частотах (40, 91, 150 и 214 ГГц).

Ну и наконец, последняя на настоящее время строящаяся обсерватория — это обсерватория Саймонса (Simons Observatory). Она расположена рядом с телескопом АСТ и будет заниматься аналогичными задачами, включая изучение гравитационного линзирования реликтового излучения и исследование эффекта Сюняева–Зельдовича. Предполагается построить четыре телескопа: один телескоп диаметром 6 метров и три телескопа диаметром 0,5 м.

Следует обратить внимание на то, что каждый последующий телескоп использует все более чувствительные приборы для исследования реликтового излучения и получения новых данных о первоначальных эпохах эволюции Вселенной. Кроме того, все перечисленные телескопы занимаются и другими задачами: исследованиями галактик, их скоплений и т.д.

Будущие перспективы исследования реликтового излучения

Поговорим о будущих исследованиях реликтового излучения.

В настоящее время разрабатываются несколько проектов космических спутников нового поколения для исследования реликтового излучения: спутник Европейского космического агентства CORe и российский спутник «Миллиметрон». Их главная цель — обнаружение В-моды поляризации реликтового излучения, возникшей в резуль-

тате воздействия первичных гравитационных волн. Это чрезвычайно важно для исследования инфляционного расширения Вселенной в первые мгновения после Большого взрыва, когда и возникли, предположительно, это гравитационные волны.

Для этих исследований предлагается использовать новый тип высокочувствительных болометров на холодных электронах [9]. Это позволит решить проблему теплового нагрева детекторов, который мешает точным измерениям и на порядок повысит их чувствительность за счет электронного самоохлаждения на чипе прибора. Такие болометры разработаны сотрудниками Лаборатории криогенной наноэлектроники НГТУ им. Р.Е. Алексеева (Россия) и Чалмерского технологического университета (Швеция).

Проект космического спутника «Миллиметрон» («Спектр-М») разрабатывается Астрокосмическим центром Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук и другими лабораториями [6, 12]. Данный спутник является четвертым в серии аппаратов «Спектр». Первый аппарат — «Спектр-Р» («Радиоастрон») — был запущен в 2011 г. для исследования Вселенной в радиодиапазоне. Второй спутник — «Спектр-РГ» — начал работу на орбите в 2019 г. и предназначен для исследований в рентгеновском и гамма-диапазонах. Третий космический телескоп — «Спектр-УФ» — будет работать в ультрафиолетовом диапазоне. Его запуск предполагается в 2025–2027 гг. «Спектр-М» будет работать в миллиметровом и инфракрасном диапазонах длин волн и наблюдать небо с помощью криогенного телескопа диаметром 10 м. Одна из задач «Миллиметрона» — исследование анизотропии реликтового излучения. Его запуск должен быть осуществлен во второй половине 20-х гг. XXI в.

Теперь еще немного о российских ученых-космологах. В 2019 г. трем ученым — В.Ф. Муханову, А.А. Старобинскому и Р.А. Сюняеву — была присуждена медаль

и премия имени Дирака, которая учреждена Международным центром теоретической физики в Триесте. Формулировка следующая: за выдающийся вклад в физику реликтового микроволнового излучения, экспериментальные исследования которого помогли превратить космологию в точную научную дисциплину путем сочетания физики микромира с исследованиями крупномасштабной структуры Вселенной [11]. Таким образом оценен теоретический вклад российских ученых в исследование реликтового излучения.

Заключение. Итоги

Из рассмотренного в этих статьях материала видно, что в последние три десятилетия проведена огромная работа по изучению анизотропии и поляризации реликтового излучения. Осуществлено множество наземных, болонных и космических экспериментов, которые чрезвычайно расширили наши знания не только о самом реликтовом излучении, но и о первоначальных эпохах эволюции Вселенной, значениях различных космологических параметров, составе Вселенной, теориях Большого взрыва и космологической инфляции, Стандартной космологической модели Λ CDM. В то же время остаются определенные несоответствия и расхождения в данных различных экспериментов, которые требуют дополнительных исследований [1, 2, 10].

Литература

1. *Верходанов О.В.* О темной энергии замолвите слово // Троицкий вариант — Наука. — № 2 (296). — 28 января 2020 года. <https://trv-science.ru/2020/01/o-temnoj-energii-zamolvite-slovo/>.
2. *Верходанов О.В.* Есть ли проблемы с согласованием скорости расширения Вселенной? // Троицкий вариант — Наука. — № 11 (280). — 4 июня 2019 года. <https://trv-science.ru/2019/06/soglasovanie-skorosti-rasshireniya-vselennoj/>.
3. *Верходанов О.В.* Космологические результаты космической миссии «Планк». Сравнение с данными экспериментов WMAP и BICEP2 // Успехи физических наук. 2016. Т. 186. № 1. С. 3–46.
4. *Королев М.Ю.* Реликтовое излучение: предсказание, открытие и обнаружение анизотропии // Физика в школе. 2021. № 8. С. 51–58.
5. *Королев М.Ю.* Реликтовое излучение: от COBE до WMAP и «Планка» // Физика в школе. 2022. № 3. С. 52–58.
6. *Новиков И.Д.* Задачи научной программа космической обсерватории Миллиметрон и технические возможности её реализации / И.Д. Новиков и др. // Успехи физических наук. 2021. Т. 191. № 4. С. 404–443.
7. *Штерн Б.Е.* Реликтовые гравитационные волны: последний штрих в картине происхождения Вселенной? // Троицкий вариант — Наука. — № 6 (150). — 25 марта 2014 года. <https://trv-science.ru/2014/03/reliktovye-gravitacionnye-volny/>.
8. *Иванов И.П.* Новые данные обсерватории Planck закрывают чересчур оптимистичную интерпретацию результатов BICEP2. https://elementy.ru/novosti_nauki/432321/Novye_dannye_observatorii_Planck_zakryvayut_chereschur_optimistichnuyu_interpretatsiyu_rezultatov_BICEP2 (24.09.2014).
9. *Кузьмин Л.С., Панкратов А.Л.* Болометры на холодных электронах повысят чувствительность будущих космических радиотелескопов. https://elementy.ru/novosti_nauki/433573/Bolometry_na_kholodnykh_elektronakh_povysyat_chuvstvitelnost_budushchikh_kosmicheskikh_radioteleskopov/t5272091/Leonid_Kuzmin (28.11.2019).
10. *Штерн Б.Е.* Космологические сенсации в затишье после шторма // Троицкий вариант — Наука. — № 6 (300). — 24 марта 2020 года. <https://trv-science.ru/2020/03/kosmologicheskie-sensacii-v-zatishe-posle-shturma/>.
11. *Штерн Б.Е.* Теперь не хватает лишь Нобелевской // Троицкий вариант — Наука. — № 16 (285). — 13 августа 2019 года. <https://trv-science.ru/2019/08/ne-xvataet-lish-nobelevskoj/>.
12. *Новиков Д.И., Рудницкий А.Г., Авдеев В.Ю.* Криогенный телескоп воссоздаст зарю Вселенной // Троицкий вариант — Наука. — № 12 (281). — 18 июня 2019 года. <https://trv-science.ru/2019/06/millimetron/>.

Интересные инженерные сооружения

Из-за сложного рельефа ущелья (наибольшие опасения вызывало состояние бортов ущелья, сложенных трещиноватыми породами) Чиркейская ГЭС имеет некоторые особенности в конструкции и компоновке строений. Например, проектировщики отказались от подземного здания ГЭС в пользу приплотинного в связи с сомнениями в его надежности из-за сложных геологических условий. Изменение конструкции строительного тоннеля, с увеличением его длины с 350 м до 730 м, что позволило вынести его за пределы неустойчивого участка склона



Машинный зал



Водосброс



Панорама Чиркейского ущелья,
водохранилища и ГЭС

ПОДПИСКА 2023. I ПОЛУГОДИЕ

Подписывайтесь на журнал «ФИЗИКА В ШКОЛЕ»!

Издается с 1934 года. Входит в перечень ВАК

Статьям журнала присваивается DOI



Журнал
«ФИЗИКА В ШКОЛЕ»
с разделом «Астрономия»
Подписной индекс

P1611

Комплект журналов
«ФИЗИКА В ШКОЛЕ»
и «ФИЗИКА ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ»

Подписной индекс

P4996

ВНИМАНИЕ!

Комплекты журналов
со скидкой

«ФИЗИКА
В ШКОЛЕ»
и
«ФИЗИКА ДЛЯ
ШКОЛЬНИКОВ»
Подписной
индекс — P4996



Оформляйте подписку на ПЕЧАТНЫЕ ЖУРНАЛЫ издательства «Школьная Пресса»:

- В любом почтовом отделении по каталогу
«Подписные издания. Почта России»
- На сайте «Почта России»:
<https://podpiska.pochta.ru/publisher/349226>

Открыть ссылку приложением «Камера»



- Урал-Пресс: <http://www.ural-press.ru>
- На сайте издательства **SCHOOLPRESS.RU**

Оформляйте подписку на ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЕРСИИ ПЕЧАТНЫХ ЖУРНАЛОВ:

- Вы можете подписаться на наши журналы через электронно-библиотечные системы:
• Ивис - ivis.ru • Руконт - rucont.ru • БиблиоШкола – biblioclub.ru • Знаниум – znanium.com

- Подписка на электронные версии печатных журналов оформляется на сайте schoolpress.ru **СКИДКА 500 РУБ. С КАЖДОГО НОМЕРА!**

Электронная версия позволяет: получать журнал быстрее,
экономить средства за подписку и доставку.
Доставка журнала: pdf-файл – на e-mail подписчика.

Открыть ссылку
приложением
«Камера»



ВНИМАНИЕ! Вы можете купить отдельную статью и любой номер журнала
(в т.ч. за прошедшие годы) в электронном виде на сайте www.schoolpress.ru

Тел.: +7(495) 619-52-87, 619-83-80. E-mail: periodika@schoolpress.ru

ISSN 0130-5522



Физика в школе, 2022, № 6, 1–64

ISSN 0130-5522

