

**С. Д. ВАРЛАМОВ, А. Р. ЗИЛЬБЕРМАН,
В. И. ЗИНКОВСКИЙ**



**Экспериментальные
задачи на уроках физики
и физических олимпиадах**

МЦМО

С. Д. Варламов
А. Р. Зильберман
В. И. Зинковский

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ЗАДАЧИ
НА УРОКАХ ФИЗИКИ
И ФИЗИЧЕСКИХ
ОЛИМПИАДАХ

Электронное издание

Москва
Издательство МЦНМО
2016

УДК 53 (023)
ББК 22.3я721 + 74.262.22
В18

Варламов С. Д., Зильберман А. Р., Зинковский В. И.
Экспериментальные задачи на уроках физики и физических олимпиадах

Электронное издание

М.: МЦНМО, 2016

182 с.

ISBN 978-5-4439-2399-4

Открытая вами книга адресована школьным учителям физики и тем ученикам старших классов, которым интересна настоящая, реальная (конкретная, крутая и т. д.) экспериментальная физика. Полезна эта книга будет и студентам первых курсов физических отделений вузов. Возможно, её будут использовать и организаторы школьных физических олимпиад разных уровней.

В первой части книги рассматриваются простые методы измерений различных физических величин, способы оценки погрешностей измерений, приёмы, позволяющие получить приемлемую (максимальную в данных условиях) точность измерений при ограниченных экспериментальных возможностях.

Во второй части книги описаны многочисленные экспериментальные задачи для физических олимпиад, значительная часть которых была предложена авторами. Большинство задач давались на экспериментальных турах Московской городской олимпиады в разные годы. Приведены условия задач, рекомендации для организаторов олимпиады по задачам, примерные решения этих задач.

Подготовлено на основе книги: *С. Д. Варламов, А. Р. Зильберман, В. И. Зинковский. Экспериментальные задачи на уроках физики и физических олимпиадах. — 2-е изд., стереотипное. — М.: МЦНМО, 2012. — ISBN 978-5-4439-0305-7.*

Издательство Московского центра
непрерывного математического образования
119002, Москва, Большой Власьевский пер., 11,
тел. (499) 241-08-04.
<http://www.mcsme.ru>

© Варламов С. Д., Зильберман А. Р.,
Зинковский В. И., 2016.

ISBN 978-5-4439-2399-4

© МЦНМО, 2016.

ВВЕДЕНИЕ

По большому счёту обучение ведётся для того, чтобы «научившийся» мог применять свои знания на практике. Поэтому важнейшим элементом обучения является практическое использование тех приборов и методов измерений, которые уже изучены школьниками.

Традиционно при изучении физики эксперименты разделяются на две большие группы: демонстрационные эксперименты, выполняемые обычно учителем, и практические (экспериментальные) работы, выполняемые школьниками самостоятельно.

Демонстрационные эксперименты нужны в следующих случаях.

1. Когда нужно познакомить учеников с физическими явлениями и обстоятельствами, послужившими отправной точкой для формулировки основных физических законов их первооткрывателями. Как известно, обнаруженные при наблюдениях закономерности обобщаются и формулируются в виде соответствующих «законов природы». Иногда такие «законы» получают имена своих первооткрывателей, например всем известный закон Архимеда, или закон Кулона. Все законы физики имеют практическую основу — они являются обобщением опыта.

2. Когда рассматривается устройство и принципы действия измерительных приборов, основанных на различных физических явлениях. Приборов, которые позволяют измерять различные физические параметры, гораздо больше, чем основных физических законов. И хотя у каждого прибора имеется свой автор, то есть тот человек, который первым предложил и реализовал конструкцию прибора, имена авторов обычно не сообщаются школьникам. Внимание этому вопросу (авторству) уделяется только при изучении истории физики.

3. При изучении сложных технических устройств или процессов, в которых используются в комбинации различные физические явления.

Практические самостоятельные экспериментальные работы тоже могут быть разделены на группы по назначению.

1. Качественные эксперименты: соберите — включите — посмотрите — зарисуйте — сделайте вывод (словесная формулировка). Такие эксперименты нужны для непосредственного ознакомления с физическими явлениями. Например, в таком эксперименте проверяется «закон сообщающихся сосудов».

2. Количественные эксперименты: соберите — измерьте — вычислите — постройте график — запишите результат в тетрадь. Этот тип экспериментов предназначен для выработки навыков применения простейших измерительных приборов и оформления экспериментальных работ. Например, эксперимент, в котором регистрируются различные удлинения одной и той же пружины, если на ней подвешены разные грузы, относится к этому типу.

3. Творческие эксперименты: дан некий набор оборудования, которое можно использовать в эксперименте, дан объект исследования, сформулирована конечная цель, однако не даны чёткие однозначные инструкции, следуя которым можно было бы добраться до конечной цели.

Именно последний тип экспериментальных творческих работ в подробностях рассматривается на страницах книги. Работы этого типа «заставляют» учеников самостоятельно искать пути, ведущие к конечному результату, разрабатывать план действий, учитывать возможности предоставленных приборов и оборудования и добиваться получения максимально возможной точности не за счёт высокой точности приборов, а за счёт того, что выбран оптимальный метод измерений.

Такие работы позволяют ученикам реализовывать и развивать свои творческие способности, которые в других видах учебной деятельности используются в малой степени.

ЧАСТЬ 1

Предлагая серию экспериментальных заданий для школьников 9—11 классов, мы ставим целью дать им возможность освоить простые методы измерений различных физических величин, научить корректно (и без привлечения непонятных математических методов) оценивать погрешности измерений и на этой основе искать оптимальные методики и разумно организовывать эксперимент. Почти все предлагаемые задания рассчитаны на применение предельно простого оборудования, вполне доступного для кабинета физики в школе. Точность получаемых результатов должна достигаться в эксперименте за счёт удачного выбора методики, а не за счёт применения фантастически точных (и столь же дорогих) заграничных приборов. В большинстве предлагаемых работ нет «наилучшего метода измерений» — такой метод обычно бывает продиктован наличием заранее собранной хитроумной измерительной установки, методы можно придумывать, комбинировать и сравнивать по достигаемой точности и удобству проведения эксперимента — именно в этом и заключается смысл обучения умению измерять. Во многих из предлагаемых задач не так легко додуматься не только до оптимальной, но и вообще до какой-нибудь «работающей» методики — тут у разумных и быстро соображающих школьников есть явное преимущество перед учителями (авторы не исключают из этой категории и себя — в справедливости приведённого утверждения они многократно убеждались за суммарные на всех авторов 70 лет работы с одарёнными детьми).

Работы по механике

Простые измерения

Работа 1. Измерение массы, размеров и плотности тел

Цель работы — проделать простые измерения массы и размеров тел, определить плотности этих тел. Часть тел —

простой и правильной формы (цилиндр, параллелепипед), часть — произвольной формы. На этих примерах показано, как оценить точность получаемых результатов. Работа носит тренировочный характер — никаких принципиальных трудностей при измерениях нет.

Приборы: весы и разновес, линейка металлическая (деревянная, на худой конец — пластмассовая), по возможности — штангенциркуль, мерная мензурка, нитки, сосуд с чистой водой. Металлический цилиндр (можно грузик из набора по механике), деревянный параллелепипед, пластиковая или металлическая фигурка неправильной формы — для измерений плотности материалов.

Выполнение работы: для тел простой формы выполнение понятно и описано во множестве пособий — измеряют размеры и по ним рассчитывают объём тела (сразу стоит сказать, что это не самое разумное решение для получения приемлемой точности — оптимальный метод ниже будет описан), массу тела измеряют при помощи весов — точность измерений массы получается очень высокой, далее находят плотность тела простым делением. Для тел неправильной формы прямые измерения размеров для нахождения объёма не проходят — нужно воспользоваться мерной мензуркой, правда точность при этом получается довольно плохой. Главная причина плохой точности — неточность определения объёма как прямым способом — для тел правильной формы, так и при помощи погружения в воду (рис. 1).

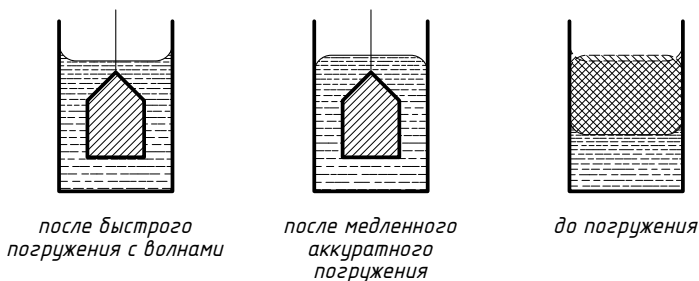


Рис. 1

Подробно о точности измерений и возникающих при таких измерениях погрешностях написано в разделе «Погрешности».

Тормоза

Работа 2. Оценка времени реакции экспериментатора

Немного странное по форме задание: оценить время реакции экспериментатора при помощи простейшего оборудования — деревянной школьной линейки длиной 30 сантиметров. Опыт следует проводить вдвоём.

На самом деле задание можно поставить и иначе — не ограничивать экспериментаторов конкретным заданием оборудования, поскольку время реакции довольно мало — оно составляет 0,1—0,3 секунды, и обычным секундомером измерить его нельзя (мешает то же время реакции!). Либо придётся пользоваться электронным секундомером, добавляя к нему несложные электронные или электромеханические приставки, либо нужно придумать что-нибудь нетривиальное. Условие задачи поставлено не очень жёстко — экспериментатор может сам предложить определение «времени реакции», приспособленное к придуманному им методу измерений. В нашем случае разумно предложить такой вариант: заметив какое-то событие (стимул), человек должен на него отреагировать, и время запаздывания мы будем считать искомым временем реакции. Конечно, всё тут нужно сделать так, чтобы не добавить к времени реакции ничего лишнего — действие экспериментатора, которым он реагирует на стимул, не должно само занимать значительного времени — скажем, тут не годится запись в журнал наблюдений времени прихода стимула. Предлагаемый автором вариант выглядит так: помощник держит линейку так, что она свисает вниз, причём нулевое деление удобно иметь снизу. Экспериментатор держит большой и указательный палец правой (левой — если он левша) руки так, что нижний конец линейки находится между пальцами и ему легко схватить падающую линейку. Помощник неожиданно отпускает линейку, экспериментатор зажимает её двумя пальцами так быстро, как сумеет. Линейка успеет пролететь некоторое расстояние — его можно измерить по её же делениям, удобно вначале держать пальцы напротив нулевого деления линейки. По этому расстоянию определим время падения, считая движение линейки равно-

ускоренным. Важно, чтобы экспериментатор держал пальцы поближе друг к другу, не касаясь при этом линейки.



Важно понять, что результаты такого эксперимента нуждаются в статистической обработке. Обычное расстояние, которое пролетает линейка, составляет 14—22 см, но в части опытов экспериментатор, зазевавшись, вообще не ловит линейку, а иногда ему удаётся «подстеречь» помощника и поймать линейку практически сразу. Ясно, что ни тот, ни другой результат не имеют прямого отношения к времени реакции (хотя — как посмотреть!), поэтому такие результаты мы просто отбросим. Проведём достаточно длинную серию измерений — несколько десятков, очень хорошо сделать несколько серий, меняясь местами с помощником (разумеется, результаты каждого участника нужно учитывать отдельно!).

Модификации этого опыта могут быть такими — испытуемый держит глаза закрытыми и должен отреагировать на звуковой сигнал, синхронизированный с моментом отпускания линейки. Сигналом может служить резкое изменение частоты звукового сигнала или прикосновение к его руке. Во всех случаях среднее время реакции будет по порядку величины одним и тем же, но может отличаться весьма существенно (до 50%).

На этом примере можно объяснить ребятам способы улучшения точности оценки измеряемой величины за счёт усреднения «разбросанных» результатов. В самом деле — будем полагать, что есть некоторое характерное время реакции

данного экспериментатора и множество факторов, которые искажают результат, одни факторы занижают, другие — завышают оценку измерения. Ясно, что при усреднении значительного числа измерений мы уменьшим ошибку определения интересующей нас величины. Куда более сложный вопрос — в какой степени у нас это получится. Только при определённых (и довольно искусственных!) предположениях о характере влияющих на измерение факторов можно это улучшение посчитать. В частности, если факторов много, влияние их независимо и они примерно одинаковы по влиянию на результат, их сумму можно считать гауссовой случайной величиной. Широко распространённые методы расчёта «стандартного отклонения среднего» основаны именно на такой модели. Насколько она разумна? Ну, если речь идёт о хорошей лабораторной установке, где причины больших возможных ошибок устранены и остались только неустраняемые флуктуации, то такая модель вполне подходит. А вот в «школьном» эксперименте с не очень точными и никогда не проверяемыми приборами предположение о гауссовой случайной погрешности вовсе не является разумным и часто приводит к очень заниженным оценкам погрешностей. В нашем случае измерений «с линейкой» сама по себе измеряемая величина не очень чётко определена, поэтому мы не вычисляем погрешность её измерения, а просто уменьшаем влияние факторов разброса.

Прочность нити

Работа 3. Измерение силы, необходимой для обрыва нити

При помощи простого оборудования — небольшой гирьки (100—200 г) и миллиметровой бумаги определить силу, необходимую для обрыва нити, которая тоже, разумеется, экспериментатору выдана, причём в достаточном количестве — 2—3 метра. Есть ещё остро заточенный карандаш, который можно использовать только для рисования.

Проблема состоит в том, что вес груза явно недостаточен для обрыва нити и не очень понятно, как из этого положения выходить. Кстати, первым делом ребята предлагают не очень

подходящие для культурных измерений варианты — вращать гирьку с помощью привязанной к ней нити в горизонтальной, а то и в вертикальной плоскости, увеличивая скорость вращения до тех пор, пока нить не оборвётся. Как при этом без секундомера определять скорость груза, неясно, неясен и более важный в данном случае вопрос — куда полетит гирька после обрыва нити. Ещё один не очень хороший вариант — отпускать гирьку с некоторой высоты, чтобы нить рвалась при резкой остановке груза. Тут не очень ясно, чему будет равна сила при рывке, — это принципиальная трудность при таком способе измерений.

Идея приемлемого варианта измерений основана на разложении сил. Подвесим груз к середине куска нити и начнём растягивать концы куска в стороны. При равновесии груза сила тяжести уравновешена векторной суммой сил натяжения с двух сторон точки подвеса. Можно измерить угол, составляемый частями нити с вертикалью (рис. 2), и провести вычисления: $2T \times \cos \alpha = mg$.

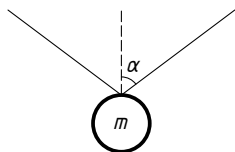


Рис. 2

На практике удобно провести вертикальную линию посередине и сделать на ней отметки пожирнее, чтобы они были лучше видны. Растягивать нить будем так, чтобы она проходила через две отмеченные точки — если лист миллиметровки у нас перед глазами и мы растягиваем нить на его фоне, то всё видно очень хорошо. Нам же останется только не пропустить отметку на вертикальной прямой, до которой поднялся груз перед самым обрывом нити. Все необходимые для расчёта отрезки будут на миллиметровке, для нахождения косинуса угла вовсе не понадобится измерять транспортиром сам угол — можно всё найти по отношению отрезков, а их можно измерить при помощи небольшого куска той же миллиметровой бумаги.

Ещё несколько существенных моментов. Прочность нити очень сильно меняется из-за наличия даже небольших дефектов — поэтому не стоит цеплять грузик непосредственно крючком к нити (удобно использовать груз с крючком из набора по механике), лучше сделать из куска нити промежуточную петлю из нескольких витков. Не стоит завязывать узелок

на «основной» нити или предварительно её растягивать — усилие обрыва может сильно измениться. Растягивать нить следует осторожно и не торопясь, но решительно. Не годится растянуть, не доводя до обрыва, отпустить немного, а потом уже потянуть сильно, нельзя и дёргать — даже несильно.

При аккуратном выполнении, повторении опыта несколько раз и усреднении полученных результатов можно получить совсем неплохую точность — во всяком случае, вполне достаточную для сравнения нескольких разных нитей по этому параметру (красивая постановка опыта: какая нить легче рвётся — белая, чёрная или коричневая?).

На идее разложения сил можно основать и множество других экспериментальных задач. Пример — проградуировать пружинку (резинку) для измерения различных сил, используя только один грузик. Пример выполнения этой работы: подвесим груз на нити, на небольшом расстоянии от груза прикрепим к нити один из концов пружинки и потянем её в сторону, оставляя всё время горизонтальной. Горизонтальность пружинки и её удлинение можно контролировать и измерять при помощи куска миллиметровки, укрепленного на стене.

Этот способ особенно точен при малых силах растяжения пружинки. Если же груз лёгкий, а пружинка тугая и предназначена для существенно больших сил, то удобнее подвесить груз на пружинке и отводить его в сторону при помощи горизонтально расположенной нитки. Перед тем как давать подобный эксперимент школьникам, полезно упомянуть (конечно, не прямо перед самой задачей) о возможности использования разложения сил в практической ситуации — например, разобрать известную проблему вытаскивания бегемота из болота при помощи прочной верёвки и расположенного рядом дерева. Без этого догадаться ребятам будет очень трудно.

Вес купюры

Работа 4. Измерение веса небольшого куска бумаги

Измерить вес небольшого куска миллиметровки (или купюры 10 руб). Использовать можно монетку достоинством

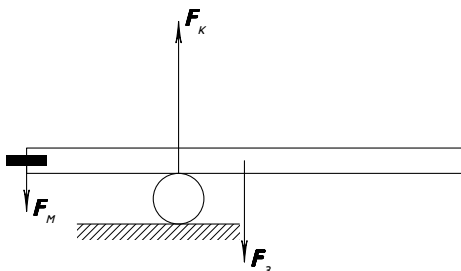


Рис. 3

1 копейка (они ещё существуют и имеют массу ровно 1 г), круглый незаточенный карандаш и собственно кусок миллиметровой бумаги — он должен иметь форму прямоугольника, его размер удобно взять 5×15 сантиметров.

Проще всего взвесить кусок бумаги на весах, но их использовать нельзя — в списке оборудования весы отсутствуют. Наличие монеты известной массы подсказывает способ с применением рычага — но в данной ситуации ничего похожего на рычаг нет — карандаш плохо подходит для этой цели, да и применять его можно только для рисования — в условии это специально оговорено. Единственная вещь, из которой можно попробовать сделать рычажные весы, — сам кусок бумаги. Правда он совсем мягкий и гнётся — но это не беда, его можно сложить в несколько раз, сделать полоску и отогнуть края. Получится этакий «швеллер» из бумаги — довольно жёсткий и лёгкий. Эту полоску можно уравновесить на пальце, на карандаше, на ещё одной конструкции, изготовленной из бумаги, и т. п. Важно только точно отметить положение прямой, относительно которой наступает равновесие. Далее можно поступить таким образом: укрепить монетку на краю полоски и снова её уравновесить. Все расстояния можно измерять прямо по миллиметровым отметкам на полоске, смещение двух осей равновесия и длина прямоугольной полоски дают возможность рассчитать отношение масс полоски и монетки, т. е. найти массу бумажки. Разумеется, полезно сделать несколько измерений при разных положениях монеты относительно полоски.

На рис. 3 показаны силы, действующие на бумажный швеллер со стороны других тел: монеты, карандаша, Земли.

Если сравнить результаты грамотно проведённых измерений и результат прямого взвешивания на точных весах — после окончания работы очень полезно вынуть из шкафа весы и дать ребятам возможность оценить точность полученных ими результатов, — точность получается довольно хорошей, погрешность составляет порядка 3—5%. Вообще интересны способы, которые подходят для взвешивания совсем лёгких тел — зёрна риса, таракана — отдельная проблема возникает, если таракан ещё жив, — и т. п.



Маятник

Работа 5. Исследование маятника

Исследование математического и не вполне математического маятников. Задача состоит из нескольких отдельных маленьких исследований: какие факторы влияют на скорость затухания колебаний, как меняется период колебаний при увеличении угловой амплитуды, как можно получить характер зависимости периода от длины нити, если не разрешается пользоваться секундомером.

Математический маятник — это абстракция, модель. Приблизиться к этой модели можно, уменьшая размеры тела на конце нити, уменьшая массу нити по сравнению с массой тела, снижая затухание колебаний. Менее массивная нить сильнее растягивается в сравнении с толстой нитью из того

же материала. Удлинение нити меняется во время колебаний. При проходе грузом нижнего положения (положения равновесия) длина нити наибольшая, а при максимальном отклонении от положения равновесия нить имеет наименьшую длину. Период колебаний (время между двумя последовательными прохождениями груза положения равновесия в одну сторону) при увеличении угловой амплитуды колебаний увеличивается как для идеального математического маятника, так и для реального маятника. Дополнительное увеличение периода реального маятника происходит за счёт растяжения нити, поэтому экспериментально полученная зависимость периода колебаний от амплитуды не вполне совпадает с известной зависимостью, описываемой чисто кинематической формулой.

На периоде колебаний сказывается и трение. Причин для затухания колебаний несколько — сопротивление воздуха обычно даёт наибольший вклад. Ещё одной причиной увеличения затухания является «ёрзание» нити в точке подвеса — укреплять нить следует аккуратно, добываясь подвеса в точке. Важно и то, как прикреплён к нити грузик, — и в этом месте может выделяться тепло. Но есть и другие причины. Как сделать маятник из нити и грузика, чтобы затухание получилось поменьше?

Поговорим об этом немного подробнее. Роль сопротивления воздуха можно снизить, увеличивая кинетическую энергию системы за счёт утяжеления грузика и выбирая нить потоньше, чтобы снизить лобовое сопротивление. Однако при этом сильнее выражен ещё один фактор — тяжёлый груз заметно растягивает тонкую нить. Растяжение нити при раскачивании груза периодически увеличивается и уменьшается, и при этом выделяется теплота. Очень интересен вопрос о том, какое отношение к изменению амплитуды имеет такое выделение тепла — вроде бы это всё силы внутренние, и они не должны влиять на колебания. С другой стороны, если тепло выделяется, то амплитуда обязана уменьшаться — это следует из закона сохранения энергии. Как разрешить этот парадокс?

Идея понятна: тепло выделяется в нити при наличии относительного движения закреплённого конца нити и грузика

(в идеальном маятнике расстояние между ними не должно изменяться!). Если принять за начало отсчёта расстояние между точкой закрепления нити и грузом в том случае, когда колебания отсутствуют, то при колебаниях расстояние между ними растёт, когда нить натянута с силой, большей mg , и укорачивается, когда сила натяжения нити меньше mg . При этом груз движется, и вектор его скорости \vec{v} составляет с направлением действующей на него со стороны нити силы \vec{F} угол, не равный 90° , то есть мощность, развиваемая этой силой $(\vec{F}\vec{v})$, не равна нулю. В среднем за период работа этой силы отрицательна, то есть запас механической энергии маятника с каждым периодом уменьшается. Аккуратное рассмотрение довольно сложно — лучше остановиться вовремя, пока в этом вопросе почти всё ясно.

При тщательном изготовлении такого маятника затухание получается небольшим — амплитуда уменьшается вдвое за 20—30 колебаний. Тут можно устроить забавное соревнование — кто из ребят сделает маятник с наименьшим затуханием. Результаты легко наблюдать при прямом сравнении сделанных маятников (стоит заранее оговорить приблизительную величину периода).

Точные измерения можно проводить только с таким маятником, у которого затухание мало. Для измерений необходимо использовать секундомер. Точность измерений периода колебаний при использовании одного-двух десятков колебаний получится хорошей, если разумно проделать измерения. Чтобы скомпенсировать ошибки «нажатия», придётся отвести маятник и отпустить его, после этого нажать секундомер в момент прохождения нижней точки (в этом положении скорость максимальна и точность фиксации момента получается наилучшей), после чего выждать заданное число периодов и остановить секундомер точно в той же фазе колебаний. В этом случае частично компенсируется ошибка, связанная с временем реакции наблюдателя. Кроме того, ошибки будут «разложены» на несколько периодов.

Если же нас интересует не точное значение периода, а влияние параметров маятника на период, тут возможны измерения и без использования секундомера. Способ таких измерений не очевиден, однако вполне доступен разумному

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Часть 1	5
Работы по механике	5
Простые измерения	5
Тормоза	7
Прочность нити	9
Вес купюры	11
Маятник	13
Электрические измерения на постоянном токе	17
Резисторы	18
Большие сопротивления	20
Точные измерения	24
Нагрузочная кривая	26
Зависимость сопротивления от температуры	27
Баллистический метод	32
Малые интервалы времени	35
Погрешности	38
Приборы и способы измерений физических величин	48
Правила записи измеренных величин с указанием ошибок	51
Вероятности осуществления событий	51
Как не следует поступать, или гипотетический школьник	53
Часть 2	58
Планирование эксперимента	59
Оформление отчёта о работе	60

Экспериментальные задачи физических олимпиад	62
Механика	62
Термодинамика и молекулярная физика	88
Электрические измерения	105
Колебания и переменный ток	127
Магнитные измерения	147
Оптика	151
Самодельный манометр	156
Использование технических средств	159
Школьные мини-лаборатории «NOVA5000»	161
Реле в экспериментальных задачах	165
Задачи, которые ещё не давались на олимпиаде . . .	168
Приложения	175
Инструкция по технике безопасности для учеников, работающих в школьной учебно-научной лаборатории	175
Оценки успеваемости в академии генерального штаба (1880 г.)	176