

Университетский курс
общей физики

М.В.Семенов, А.А.Якута

МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД

ЛЕКЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Под общей редакцией В.А.Алешкевича

МОСКВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ МГУ
1999

УДК 53.07 (075.8)

ББК 22.3

Механика сплошных сред. Лекционный эксперимент.

(Университетский курс общей физики)

Семенов М.В., Якута А.А.

изд-во Физического факультета МГУ, 1999 г., 56 стр., илл.

Пособие содержит описания лекционных экспериментов по механике сплошных сред, которые являются составной частью раздела «Механика» курса общей физики.

Для студентов и преподавателей физических специальностей университетов и высших учебных заведений.

*Михаил Владимирович Семенов
Алексей Александрович Якута*

Механика сплошных сред. Лекционный эксперимент.
(Университетский курс общей физики)

Под общей редакцией проф. В.А.Алешкевича

Оригинал-макет подготовлен Издательской группой физического факультета МГУ (тел. 939-5494). Подписано в печать 20.05.1999. Сдано в набор 11.06.1999. Формат В5, гарнитура Times, печать ризо, объем 3,5 печ.л., тираж 100 экз. Отпечатано в отделе оперативной печати физического факультета МГУ. Заказ №

Издательство Физического факультета МГУ. Лицензия ЛР021293 от 18.06.98. Москва, 119899, Воробьевы горы, МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет.

© Семенов М.В., Якута А.А., 1999

© Виноградов М.П. (обложка и оформление), 1999

© Физический факультет МГУ, 1999

Предисловие

На кафедре общей физики ведется работа по подготовке и изданию оригинального курса “Общая физика”, предназначенного для студентов физических специальностей вузов.

Курс будет охватывать четыре раздела: “Механика”, “Молекулярная физика”, “Электромагнетизм” и “Оптика”, соответствовать новым учебным программам, разработанным на физическом факультете МГУ, и отражать современные тенденции и технологии физического образования.

Отличительной особенностью данного курса является то, что в нем наиболее последовательно в методическом отношении проводится точка зрения о существенном единстве основных форм обучения физике: лекций, лабораторных экспериментов и семинарских упражнений. Лекции по каждой теме начинаются с демонстрации основных экспериментальных фактов, которые затем анализируются и обобщаются в виде физических законов и соотношений. Такой “экспериментальный” подход к изложению материала закрепляется при выполнении лабораторных экспериментов, цель которых — научить студентов навыкам самостоятельной постановки и решения физических проблем, проведению экспериментальных исследований, включая компьютерное моделирование, а также методам интерпретации и анализа экспериментальных данных. Более глубокое понимание основных физических явлений и закономерностей достигается на семинарских занятиях.

В соответствии с поставленными задачами каждый раздел курса будет состоять из четырех пособий: “Лекции”, “Лекционный эксперимент”, “Лабораторный эксперимент”, “Семинарские занятия”. Пособия, написанные в едином методическом ключе, будут комплектоваться видеокассетами и лазерными дисками (CD ROM) с записями лекционных демонстраций, а также дискетами с описаниями модельных экспериментов.

Описания лекционных экспериментов по механике сплошных сред представляют из себя часть готовящегося к изданию курса “Механика” и являются приложением к лекциям по данной теме. В пособии описаны эксперименты, которые в течение ряда лет демонстрируются при чтении курса общей физики студентам МГУ. Большая часть из них разработана в Кабинете физических демонстраций сотрудниками физического факультета МГУ.

Авторы выражают глубокую благодарность Г.Е.Пустовалову за внимательное прочтение рукописи и ценные замечания, М.П.Виноградову за подготовку рукописи к изданию, а также М.Е.Горбачеву за помощь в работе.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Упругие свойства тел

1.1. Закон Гука:	
1) модель кристалла NaCl (шарики с пружинами)	7
2) пружинный динамометр	7
1.2. Типы деформаций (растяжение—сжатие, сдвиг; изгиб, кручение):	
1) модель из пластин с пружинами	7
2) резиновые модели: брусок с нанесённой сеткой и брусок со штырьками	7
3) деформация висящего тела	8
4) деформация кручения	9
1.3. Упругая и остаточная деформация:	
1) свинцовая, медная и стальная пластинки, зажатые в тисках	9
2) прибор для растяжения проволоки со шкалой и стрелкой	9
1.4. Стрела прогиба	10
1.5. Прочность пустотелой трубки (опыт Умова)	11
1.6. Изменение поперечного сечения образца при растяжении	11
1.7. Зависимость упругих свойств от температуры (резина и стальная пружина)	12
1.8. Зависимость упругих свойств от времени воздействия; среда Максвелла и среда Кельвина—Фохта.	12

2. Гидро- и аэростатика

2.1. Давление внутри жидкости:	
1) мембранный манометр	14
2) образование фонтана из отверстия в дне сосуда, погруженного в воду	14
2.2. Закон Паскаля:	
1) шар Паскаля	14
2) сосуд с манометрическими трубками	14
3) гидравлический пресс и опыты с ним	15
2.3. Давление жидкости на стенки сосуда:	
1) сосуд Мариотта	16
2) прибор Паскаля (гидростатический парадокс)	17
2.4. Сжимаемость жидкости:	
1) пьезометр Вайнгольда	17
2) искра в жидкости	18
3) простреливание сосуда с водой	19
2.5. Закон Архимеда:	
1) “ведерко” Архимеда	19
2) демонстрация по Эйхенвальду на весах с гидростатическим взвешиванием	20
3) “присасывание” тела ко дну сосуда	20

2.6. Распределение давления в жидкости при её вращении:	
1) жидкость в цилиндрическом сосуде	21
2) легкий и тяжелый шарики в изогнутой трубке с маслом на центробежной машине	21
2.7. Плавание тел:	
1) картезианский “водолаз”	22
2) прогибание поверхности воды под металлическим диском	23
3) шарик Галилея	23
4) остойчивость, метацентрическая высота	24
5) непотопляемость корабля	25
2.8. Атмосферное давление:	
1) опыт Торричелли	26
2) магдебургские полушария	27
3) раздавливание банки атмосферным давлением	28
4) опыт с переворачиванием стакана с водой, накрытого бумагой	28
5) перекачка воды и раздувание резинового шарика под колоколом воздушного насоса	29
6) зависимость давления от высоты	29
7) подъём мыльных пузырей, заполненных метаном	30
8) газовый сифон	30

3. Гидро- и аэродинамика

3.1. Ламинарное и турбулентное течения жидкости (прибор Поля–Колбанова)	32
3.2. Обратимость ламинарного течения (“фазовая память”)	33
3.3. Уравнение Бернулли:	
1) трубка с сужением	34
2) сирена Клемана–Дезорма	35
3) парение шарика в струе газа или жидкости	35
4) парение шарика в трубке переменного сечения	36
5) втягивающее действие струи (шарик на подвесе)	36
6) пульверизатор и водоструйный насос	36
3.4. Статическое и динамическое давление в потоке жидкости и газа:	
1) трубки Пито и Прандтля	37
2) гидравлический удар	38
3) сифон, не требующий засасывания	39
3.5. Реакция струи:	
1) сосуд с водой на тележке	39
2) полет ракеты	40
3) отклонение изогнутой трубки при истечении из нее воды	40
4) сегнерово колесо	40
3.6. Эффект Магнуса:	
1) тележка с вращающимся цилиндром (модель судна Флетнера)	41
2) скатывание легких цилиндров с наклонной плоскости	42
3) полет вращающегося цилиндра (“мёртвая петля”)	42
4) “резаный” мяч	43
3.7. Течение вязкой жидкости:	
1) падение давления вдоль трубы	44
2) распределение скоростей по сечению потока	44

3.8. Вихри:	
1) “смерч” в воронке с водой	45
2) “смерч”, возбуждаемый магнитной мешалкой	45
3) кольцевые вихри в воздухе (дымовые кольца)	46
4) кольцевые вихри в жидкости	47
5) полукольцевые вихри у поверхности жидкости (по Гельмгольцу, “весло”)	47
3.9. Диск Рэлея	48
3.10. Явление “подсасывания”:	
1) свеча за диском, обдуваемым воздухом	48
2) реактивная тележка с отражательной заслонкой на воздушной дорожке – движение “назад”	49
3.11. Физические основы авиации:	
1) демонстрация обтекания тел на приборе Поля–Колбанова	49
2) возникновение подъемной силы крыла (диапанель)	50
3) опыты с аэродинамической трубой	51
4) модель вертолета; авторотация	52
Видеозаписи лекционных экспериментов	54
Список лекционных экспериментов на видеокассете «Механика сплошных сред»	55

1. Упругие свойства тел

1.1. Закон Гука:

1) модель кристалла $NaCl$ (шарики с пружинами).

Модель, собранная из белых и черных шариков, соединенных пружинами (рис. 1.1.1), служит для демонстрации происхождения упругих сил при деформациях кристаллической решетки твердых тел. Модель может использоваться также для демонстрации различных типов деформаций и тепловых колебаний решетки твердых тел.

2) пружинный динамометр.

Демонстрируется пропорциональность растяжения стальной спиральной пружины числу подвешенных на ней одинаковых грузов. Пружина снабжена стрелкой, показывающей деформацию на расположенной рядом шкале с равномерно нанесенными делениями (рис. 1.1.2). Вначале производится постепенное нагружение, а затем разгрузка пружины; гистерезис и остаточная деформация отсутствуют.

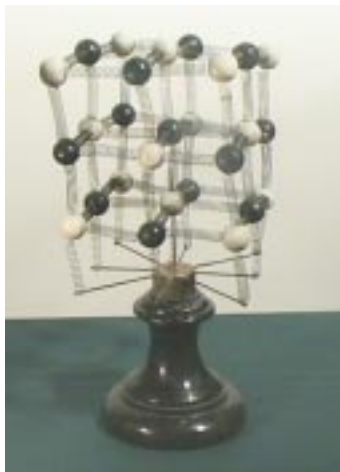


Рис. 1.1.1



Рис. 1.1.2

1.2. Типы деформаций (растяжение—сжатие, сдвиг; изгиб, кручение):

1) модель из пластин с пружинами.

Модель деформируемого твердого тела состоит из нескольких пластмассовых квадратных пластинок, соединенных по углам упругими элементами — одинаковыми пружинами (рис. 1.2.1). Демонстрируются основные типы однородных и неоднородных деформаций: растяжение—сжатие, сдвиг, изгиб и кручение.

2) резиновые модели: брусок с нанесённой сеткой и брусок со штырьками.



Рис. 1.2.1

Неоднородные деформации — изгиб и кручение — демонстрируются при помощи резиновых моделей: бруска прямоугольного сечения с нарисованной на нем сеткой с квадратными ячейками и длинного бруска квадрат-

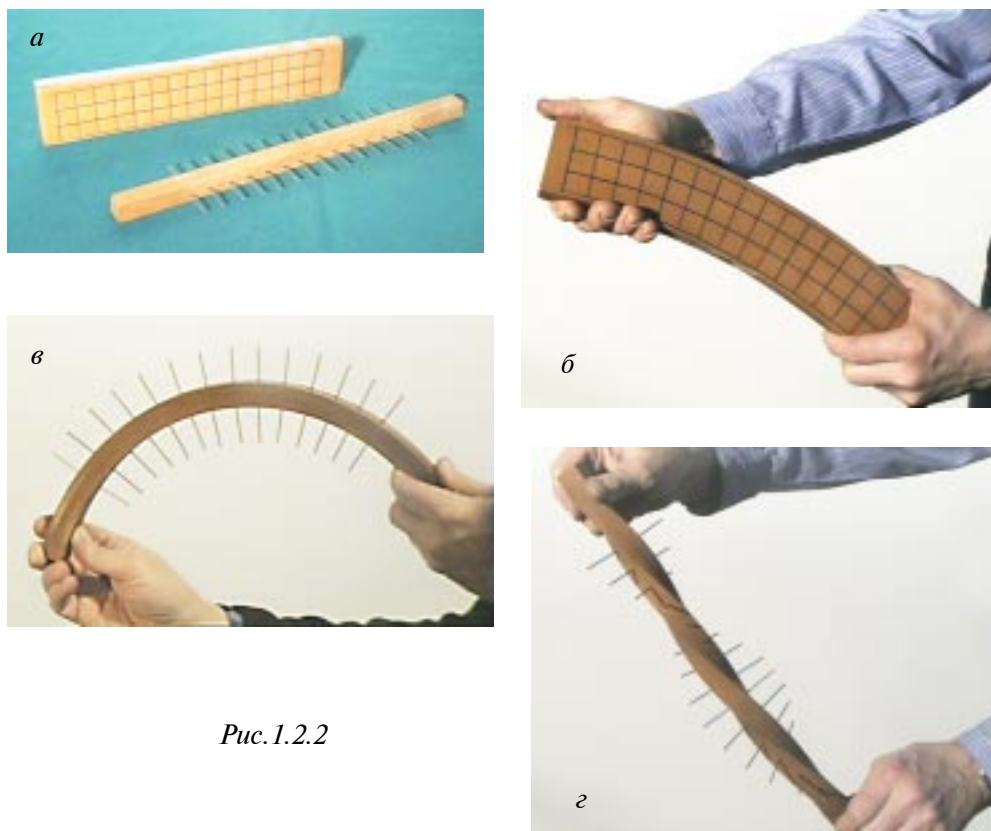


Рис.1.2.2

ного сечения, через который продеты металлические штырьки (рис. 1.2.2а). Сетка и штырьки позволяют продемонстрировать распределение деформаций в теле. Изгибая брусок с сеткой, наблюдают изменение размеров и формы ячеек в разных местах бруска (рис. 1.2.2б). Изгибая брусок дугой в плоскости штырьков, наблюдают уменьшение расстояния между концами штырьков с внутренней стороны дуги и увеличение этого расстояния с внешней стороны (рис. 1.2.2в), что говорит о сжатии внутренних и растяжении внешних слоев резины. Поворачивая верхнюю часть бруска со штырьками относительно нижней вокруг его оси, по положению штырьков наблюдают распределение деформаций в бруске при его кручении (рис. 1.2.2г).

3) деформация висящего тела.

Наблюдается неоднородная деформация растяжения свободно висящего тела – мягкой массивной пружины, подвешенной за конец на штативе (рис. 1.2.3). Хорошо заметно, что деформация нарастает снизу вверх – приблизительно по линейному закону.



Рис.1.2.3

4) деформация кручения.

Для демонстрации используется прибор – модель вала, состоящего из двух частей разного диаметра. Два прямых куска стальной проволоки одинаковой длины (около 0,7 м) и разного диаметра (около 5 и 2 мм) сварены встык так, что их оси совпадают. На концах проволок и в месте их сварки перпендикулярно к ним припаяны три параллельных стрелки-указателя длиной около 15 см. Вал устанавливается в горизонтальном положении так, что конец толстой проволоки жестко закреплен, а стык и конец тонкой проволоки могут свободно вращаться в опорах (рис. 1.2.4).

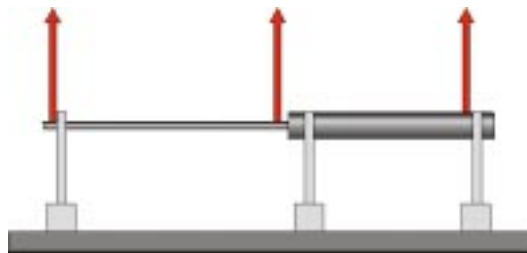


Рис. 1.2.4

Опыт демонстрируется в теневой проекции: вначале на экране получают три совпадающих тени стрелок, затем поворачивают конец тонкой проволоки за стрелку на угол $50-70^\circ$ и наблюдают различие в углах кручения у двух частей “вала”. Для сравнения демонстрируется опыт с однородным “валом” диаметром 2–3 мм, снабженным такими же стрелками-указателями на его концах и посередине. В этом случае углы кручения обеих половинок “вала” одинаковы.

1.3. Упругая и остаточная деформация:

1) свинцовая, медная и стальная пластинки, зажатые в тисках.

Для различных материалов предел упругости достигается при разных величинах деформации. Это можно показать при помощи следующей демонстрации. В тисках зажимают за концы в вертикальном положении три сложенные вместе пластинки одинаковой длины, изготовленные из различных материалов – свинца, меди и стали. Если подвергнуть пластинки одинаковой деформации изгиба, нажав на них в горизонтальном направлении пальцем, то после снятия нагрузки свинцовая пластинка останется в сильно деформированном состоянии, медная пластинка будет иметь значительно меньшую остаточную деформацию, а стальная пластинка вернется в исходное положение (рис. 1.3.1). Это объясняется тем, что при одинаковой деформации у свинцовой пластинки мы заходим в область пластической деформации глубже, чем у медной, а стальная пластинка остается в пределах области упругих деформаций.

2) прибор для растяжения проволоки со шкалой и стрелкой.

Вертикальная стойка высотой около 2 м закрепляется струбциной на демонстрационном столе. В верхней части к ней прикреплена медная проволока диаметром 0,6–0,8 мм, которая внизу обернута вокруг блока, снабженного стрел-



Рис. 1.3.1



Рис. 1.3.2

или оба конца длинной деревянной балки прямоугольного сечения с соотношением сторон 2:3 (рис. 1.4). Для демонстрации малых стрел прогиба в большой аудитории используются видеочамера и телевизионный монитор.

Стрела прогиба u легкой горизонтальной балки прямоугольного сечения длиной ℓ с вертикальной h и горизонтальной b сторонами, изготовленной из материала с модулем Юнга E , при закреплении одного конца (“консоль”) и

приложении к другому нагрузки P может быть определена по формуле: $u = \frac{4P\ell^3}{Eb h^3}$.

После поворота балки на 90° вокруг горизонтальной оси стрела прогиба умень-

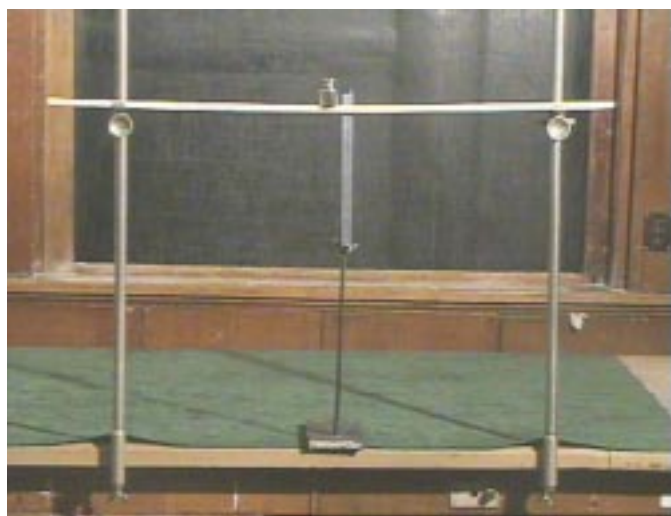


Рис. 1.4

шой-указателем длиной около 1 м. К нижнему концу проволоки подвешиваются грузы. При нагружении проволоки блок поворачивается, и стрелка смещается вдоль шкалы с делениями (рис. 1.3.2). Масса грузов и длина стрелки подобраны так, что при добавлении каждого следующего груза (по 1 кг) стрелка в пределах упругих деформаций смещается на одно деление. После достижения предела текучести (при нагрузке больше 4–5 кг) грузы снимаются, и наблюдается появление остаточной деформации – стрелка не возвращается к исходному положению.

1.4. Стрела прогиба

Количественные соотношения для стрел прогиба балок демонстрируются при помощи установки, состоящей из шкалы с делениями, груза и двух штативов, в зажимах которых могут закрепляться один

шается в $\left(\frac{b}{h}\right)^2 = 1,5^2 = 2,25$ раза.

При опоре балки на оба конца и приложении той же нагрузки посередине стрела прогиба уменьшается по сравнению с консольным способом крепления в 16 раз, если концы свободно лежат на опорах, и в 64 раза, если концы закрепляются.

Наблюдаемые на установке стрелы прогиба при различных

способа крепления балки в пределах ошибок согласуются с приведенными выше данными теоретического расчета. Балка длиной около 1 м изготовлена из бальсового дерева и имеет в сечении размер 14×21 мм. При нагружении гирькой массой 100 г для консольного способа крепления получаются стрелы прогиба около 40 и 80 мм (при двух возможных положениях сторон сечения h и b). При опоре на концы для второго положения сечения получаются стрелы прогиба около 5 мм (свободные концы балки) и около 1 мм (закрепленные концы).

Для качественной демонстрации зависимости стрелы прогиба от способа крепления концов балки можно использовать метровую стальную или деревянную линейку. Концы линейки кладут на подставки, а гирьку ставят на середину линейки. Если прижать оба конца линейки к подставке тяжелыми грузами, то стрела прогиба уменьшается. Если же прижать только один конец линейки, а грузик подвесить ко второму концу, то стрела прогиба резко увеличивается.

1.5. Прочность пустотелой трубки (опыт Умова)

Данный опыт, предложенный Н.А.Умовым, демонстрирует прочность балки на изгиб в зависимости от формы ее поперечного сечения.

Для демонстрации берется лист бумаги, который сам по себе не обладает большой прочностью на изгиб и, будучи закреплен за один край (консольно), гнется даже под собственным весом без какой-либо внешней нагрузки. Затем лист сворачивается в трубку (диаметром около 40 мм), которая просовывается в проволочное кольцо, снабженное крюком, и кладется концами на две опоры (рис. 1.5). Если постепенно увеличивать нагрузку на трубку, подвешивая на крюк грузы, то она может выдержать значительный вес: в зависимости от плотности используемой для опыта бумаги балка ломается при нагрузке от 1 до 2 кг.



Рис. 1.5

1.6. Изменение поперечного сечения образца при растяжении

Демонстрируется уменьшение сечения цилиндрического куска резины при растяжении. Кусок толстой (диаметром 20–30 мм) вакуумной резиновой трубки длиной около 0,5 м закреплен в штативе за верхний конец (рис. 1.6). На нее плотно надето металлическое кольцо, удерживающееся силами трения. Если потянуть трубку рукой за нижний конец, то она растягивается, при этом ее диаметр уменьшается, и кольцо соскальзывает вниз. Затем трубку переворачивают и повторяют опыт, закрепив другой ее конец.



Рис. 1.6

1.7. Зависимость упругих свойств от температуры (резина и стальная пружина)

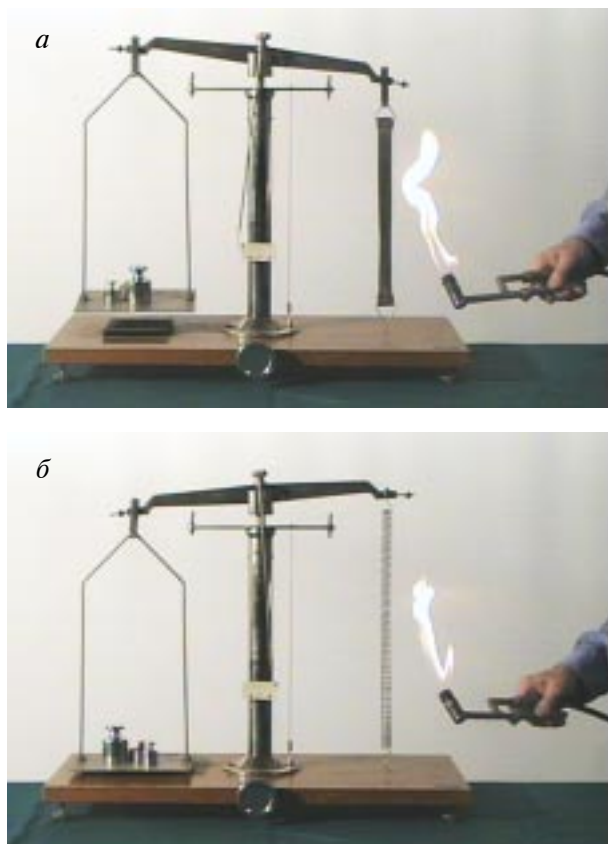


Рис. 1.7

Установка для демонстрации зависимости упругих свойств от температуры представляет из себя весы, вместо одной из чашек которых к коромыслу прикрепляется в вертикальном положении либо резиновая лента, либо стальная пружина. Нижний конец ленты или пружины крепится к основанию весов, после чего весы уравниваются грузами. Далее лента или пружина слегка подогревается по всей длине газовой горелкой (рис. 1.7а, б), и стрелка весов отклоняется, демонстрируя противоположное изменение упругих свойств резины и стали при нагревании: у резины упругость возрастает с ростом температуры, а у стали — уменьшается, что приводит к сокращению резиновой ленты и удлинению пружины при нагревании под действием постоянной нагрузки. После остывания стрелка весов

возвращается к исходному положению, что говорит об отсутствии остаточных деформаций. При сильном локальном нагревании горелкой стальная пружина теряет упругие свойства и подвергается необратимой пластической деформации — нагретый виток сильно растягивается и после остывания более не сжимается до исходного состояния.

1.8. Зависимость упругих свойств от времени воздействия; среда Максвелла и среда Кельвина—Фохта

Деление веществ на упругие и пластичные, или вязкие среды достаточно условно. Одно и то же вещество может одновременно проявлять и упругие, и пластические свойства, причем его поведение различается в зависимости от времени воздействия. В последнее время появилось много высокомолекулярных полимерных материалов, которые позволяют продемонстрировать этот эффект.

Для демонстрации используются два разноцветных шарика — желтый, скатанный из упругопластичной среды (среда Максвелла) и красный железобразный, изготовленный из вязкоупругой среды (среда Кельвина—Фохта) (рис. 1.8). При медленном надавливании пальцем первый шарик ведет себя, как неупругая среда, не восстанавливает свою форму после снятия нагрузки и медленно

растекается по столу, как жидкость. Напротив, второй шарик после надавливания восстанавливает свою форму и не растекается. При быстрых воздействиях, например, при ударе о стол после броска шариков, их поведение противоположно: первый хорошо отскакивает от стола, почти не теряя скорости, а второй расплющивается в лепешку, растекаясь по столу после удара, как упавшая капля жидкости, и только потом постепенно возвращается к исходной шарообразной форме.



Рис. 1.8

2. Гидро- и аэростатика

2.1. Давление внутри жидкости:

1) мембранный манометр.

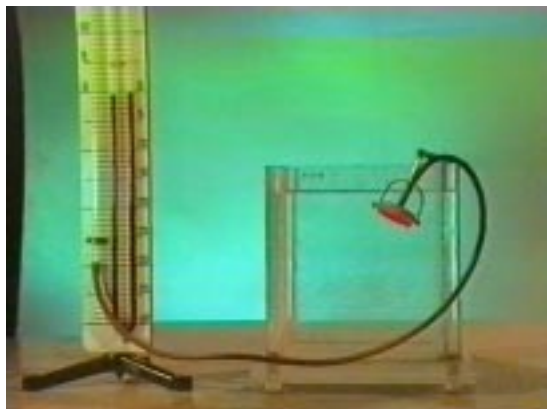


Рис. 2.1.1.

Тонкая резиновая пленка натянута на короткий цилиндрический стакан, соединенный трубкой с U-образным манометром. При погружении стакана в большой сосуд с водой манометр регистрирует увеличение давления, пропорциональное глубине погружения (рис. 2.1.1). Стакан установлен на оси, что позволяет поворачивать мембрану и исследовать распределение давления внутри жидкости в разных направлениях при постоянной глубине погружения. Демонстрируется независимость давления от направления, т.е. справедливость закона Паскаля.

2) образование фонтана из отверстия в дне сосуда, погруженного в воду.

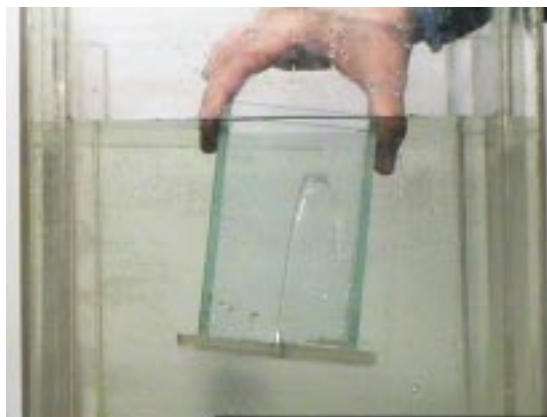


Рис. 2.1.2.

Открытый сверху прозрачный сосуд с маленьким отверстием в дне, заткнутым резиновой пробкой, частично погружают в большой прозрачный сосуд с водой (рис. 2.1.2). После удаления пробки из отверстия начинает бить фонтан воды, почти достигающий уровня воды в большом сосуде. Опыт демонстрирует наличие избыточного давления на некоторой глубине внутри жидкости.

2.2. Закон Паскаля:

1) шар Паскаля.

Шар Паскаля (рис. 2.2.1) представляет из себя сферический сосуд, снабженный со всех сторон в диаметральной плоскости соплами малого диаметра. К сосуду припаян насос в виде цилиндрической трубки с поршнем. После заполнения шара водой и надавливания на поршень из отверстий сопел вытекают струйки воды. Одинаковая длина струек доказывает справедливость закона Паскаля. Опыт полезно показать дважды, располагая сопла сначала в горизонтальной, а затем в вертикальной плоскости.

2) сосуд с манометрическими трубками.

В закрытый прозрачный сосуд через уплотнительные прокладки в крышке вставлены три открытые сверху стеклянные трубки, нижние концы которых

находятся на одном уровне, но отогнуты в различных направлениях: вверх, вниз и вбок (рис. 2.2.2а). В крышке сосуда имеется еще одно отверстие, через которое в сосуд можно наливать жидкость и нагнетать воздух. Сосуд заполняется подкрашенной жидкостью выше уровня отверстий в трубках, и внутрь него при помощи шприца нагнетается небольшое количество воздуха. После этого жидкость во всех трех трубках поднимается на одинаковую высоту, демонстрируя независимость давления от направления (рис. 2.2.2б).



Рис. 2.2.1.

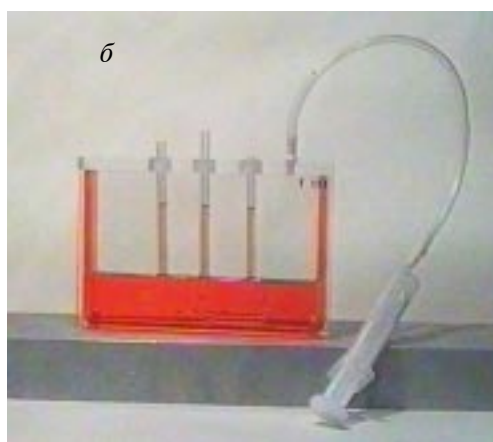
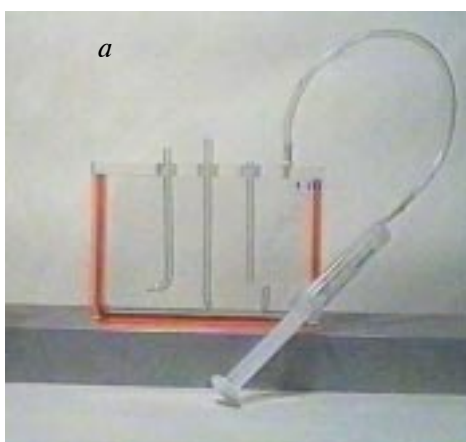


Рис. 2.2.2.

3) гидравлический пресс и опыты с ним.

Одним из устройств, использующих закон Паскаля, является гидравлический пресс (рис. 2.2.3а). Он состоит из двух сообщающихся цилиндрических сосудов — малого и большого диаметра. Сосуды заполнены машинным маслом и закрыты поршнями. Цилиндр малого диаметра снабжен клапанами и используется как насос. При надавливании рычагом на его поршень давление в системе повышается, и поршень рабочего цилиндра, который имеет большой

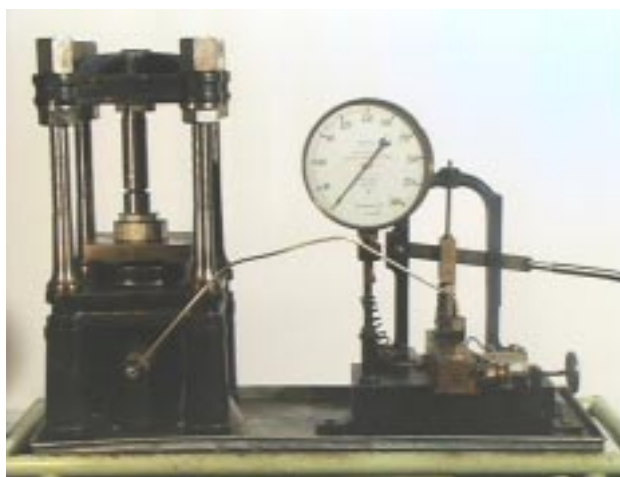


Рис. 2.2.3а

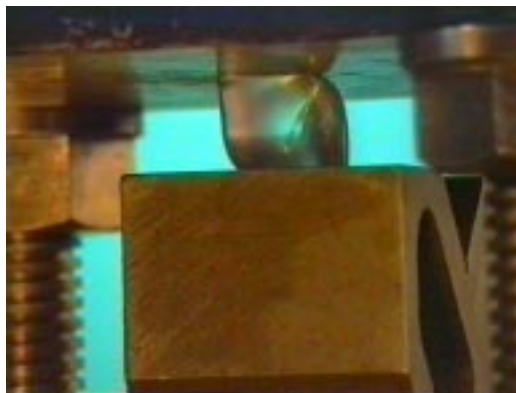


Рис.2.2.3б.

ше. Демонстрируется также пластическая деформация и последующее растрескивание цилиндрического образца из оргстекла при сдавливании вдоль оси цилиндра. В последнем случае видно (рис. 2.2.3б), что плоскости растрескивания наклонены к оси примерно под углом 45° , при котором максимальны сдвиговые напряжения в образце. Можно продемонстрировать прессование различных рыхлых образцов, например, ваты, в специальных стальных пресс-формах.

2.3. Давление жидкости на стенки сосуда:

1) сосуд Мариотта.



Рис.2.3.1.

Сосуд Мариотта позволяет обеспечить постоянную скорость вытекания струек воды из сосуда. Для этого в сосуд с водой, в боковой стенке которого есть несколько маленьких отверстий, погружается сверху трубочка, пропущенная через герметичный сальник в горловине сосуда. Отверстия в стенке сосуда могут закрываться пробками. Скорость вытекания струйки воды из сосуда определяется разностью высот нижнего конца трубочки и отверстия, из которого вытекает струйка, и сохраняет постоянное значение до тех пор, пока трубочка остается погруженной в воду, поскольку из-за подсосывания воздуха внутрь сосуда при вытекании воды давление на нижнем конце трубочки постоянно и равно атмосферному. Из трубочки при этом выходят пузырьки воздуха, и хорошо заметно, что параболическая форма струи не изменяется с течением времени (рис. 2.3.1). Скорость вытекания легко регулируется перемещением трубочки вверх или вниз. Если конец трубочки находится на уровне или ниже соответствующего отверстия, то жидкость из него не вытекает. Когда конец трубочки находится выше уровня воды в сосуде, скорость струек по мере вытекания воды падает.

2) прибор Паскаля (гидростатический парадокс).

Прибор состоит из трех открытых сверху и снизу стеклянных сосудов — цилиндрического и двух усеченных конических (конусом вверх и конусом вниз), штатива и весов с плоской чашкой. Сосуды по очереди закрепляются в штативе таким образом, чтобы их открытые снизу основания упирались в чашку весов. На другую чашку помещаются гири. Сосуды должны иметь одинаковые площади оснований, которые должны быть тщательно отшлифованы для плотного прилегания к плоской чашке весов; для улучшения уплотнения можно использовать смазку. При проведении эксперимента в сосуды наливается вода и демонстрируется, что отрыв чашки весов от нижнего основания сосудов происходит при разной массе налитой воды — у сосуда конусом вверх она меньше массы гирь на другой чашке весов, у сосуда конусом вниз — больше, а у цилиндрического — равна ей. В то же время отрыв происходит при одинаковом уровне воды во всех трех сосудах, что доказывает то, что давление на дно сосуда определяется не массой, а уровнем воды, налитой в сосуд. Демонстрация этого эксперимента в таком виде требует тщательной подготовки и занимает много времени.

Упрощенный вариант демонстрации представляет собой прозрачную диапанель, внутри которой имеются три полости соответствующей формы, соединенные между собой в нижней части трубками (рис. 2.3.2). Диапанель устанавливается в вертикальном положении, внутрь нее напускается подкрашенная жидкость, затем панель с зеркалами для поворота светового потока устанавливается на кодоскоп и в проекции на экран демонстрируется, что уровень жидкости во всех трех сосудах одинаков при одинаковом давлении в их нижней части, хотя количества жидкости в сосудах различны. Давление жидкости и ее уровень в сосудах можно изменять при помощи шприца, из которого жидкость через гибкую трубку напускается снизу в диапанель.

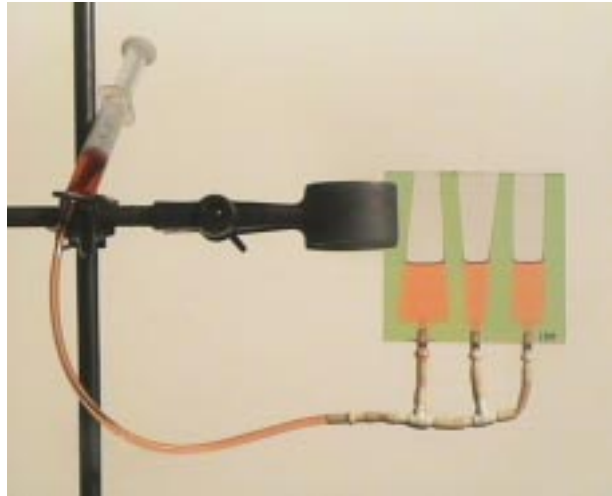


Рис. 2.3.2.

2.4. Сжимаемость жидкости:

1) пьезометр Вайнгольда.

Пьезометр Вайнгольда служит для демонстрации сжимаемости жидкостей (идея опыта была предложена в свое время Эрстедом) и устроен следующим образом (рис. 2.4.1). В замкнутый прочный цилиндр с прозрачными стеклянными стенками можно накачивать насосом воздух, создавая давление в 2–3 атмосферы. Внутри цилиндра закреплены два вертикально расположенных стеклянных капилляра длиной около 100 мм и диаметром около 1 мм: один запаян сверху и заполнен воздухом, а к другому сверху припаяна стеклянная сфера объемом около 100 см³, заполненная исследуемой жидкостью, в данном случае — дистиллированной



Рис. 2.4.1.

Дистиллированная вода, используемая в опыте, должна быть тщательно обезгажена путем длительного кипячения. Пьезометр весьма чувствителен к нагреванию, поэтому при проецировании на экран между прибором и фонарем надо устанавливать тепловой фильтр, например, кювету с водой.

2) *искра в жидкости.*

Малую величину сжимаемости жидкости, т.е. ее практическую несжимаемость, можно продемонстрировать при помощи следующего опыта. Конденсатор большой емкости (около 100 мкФ) заряжается от высоковольтного источника питания до напряжения в 2–3 кВ и подключается к двум близко расположенным электродам, между которыми проскакивает искра и выделяется запасенная в конденсаторе энергия. Электроды опущены в стеклянный стакан (рис. 2.4.2). Если стакан пуст, то при разряде с ним ничего не происходит, а если заполнить его водой, то возникающая после проскакивания искры ударная волна разрушает стакан. Опыт проделывается также с алюминиевым цилиндром (корпусом от электролитического конденсатора), заполненным водой. После разряда он раздувается и лопается. Эксперимент демонстрирует принципы электроэрозионной обработки материалов и штамповки деталей при помощи ударных волн в жидкости, а также работу струйных принтеров, где капли чернил выбрасываются из сопла при проскакивании микроскопических искр внутри чернил.



Рис. 2.4.2.

водой. Нижние концы обоих капилляров погружены в чашку со ртутью, которая заполняет и часть объема второго капилляра. Первый капилляр служит для измерения давления воздуха в цилиндре: при повышении давления до двух атмосфер воздух в этом капилляре сжимается вдвое, и ртуть поднимается на половину его высоты. При этом уровень ртути во втором капилляре поднимается всего на 5 мм, так что сжимаемость воды, т.е. относительное уменьшение ее объема воды при увеличении давления на одну атмосферу, очень мала и составляет примерно $1/20000$.

3) простреливание сосуда с водой.

Два пластмассовых стакана, наполовину заполненных водой, ставят на подставку и простреливают с расстояния 2–3 м пулями из пневматической винтовки (рис. 2.4.3). Вначале стреляют по одному из стаканов выше уровня воды: при этом в нем появляются две дырки, но сам он не разрушается. После выстрела по другому стакану ниже уровня воды он лопаётся, поскольку при попадании в него пули вода не успевает подняться и сжимается на величину объема пули, что приводит к резкому возрастанию давления на стенки стакана и его разрыву. При этом в месте попадания на стенке стакана остается отпечаток свинца, как при ударе пули о твердую преграду.



Рис.2.4.3.

При показе демонстрации надо соблюдать особую осторожность. Стрелять следует в сторону стены аудитории, противоположной зрителям; позади стакана надо поставить пулеулавливатель, например, картонную коробку, заполненную листами мягкого картона. Ни в коем случае нельзя стрелять вхолостую – это приводит к порче винтовки!

2.5. Закон Архимеда:

1) “ведерко” Архимеда.

Справедливость закона Архимеда может быть легко продемонстрирована на весах при помощи так называемого “ведерка” Архимеда (рис. 2.5.1), которое представляет из себя два тонкостенных цилиндра, плотно вставляющихся друг в друга, так что внутренний объем внешнего цилиндра-“ведерка” точно равен объему вставленного в него закрытого цилиндра. Оба цилиндра подвешиваются к коромыслу весов друг над другом и уравновешиваются гирями, поме-



Рис.2.5.1.

щаемыми на другую чашку весов. Нижний закрытый цилиндр помещается в высокий стакан, в который наливается вода до тех пор, пока она не накроет весь нижний цилиндр. Равновесие весов при этом за счет появления выталкивающей силы нарушается, т.е. погруженный цилиндр “теряет в весе”. Затем верхнее “ведерко”, находящееся выше уровня воды в стакане, заполняется доверху водой, после чего равновесие весов восстанавливается. Это говорит о том, что “тело, погруженное в жидкость, теряет в своем весе столько, сколько весит вытесненная им вода”, т.е. что справедлив закон Архимеда в своей оригинальной формулировке.

2) демонстрация по Эйхенвальду на весах с гидростатическим взвешиванием.

Одним из стандартных методов определения объема и плотности тел сложной формы является гидростатическое взвешивание, основанное на законе Архимеда. Принцип таких измерений можно продемонстрировать следующим образом. Возьмем в качестве исследуемого тела, например, 100-граммовую гирьку



Рис. 2.5.2.

из стандартного набора разновесов. Поместим ее на одну чашку весов, а на другую поставим вторую такую же гирьку. Весы при этом будут уравновешены, т.е. масса гирьки равна 100 г. Под чашкой весов, на которой находится исследуемая гирька, поставим стакан с дистиллированной водой, плотность которой известна и составляет около 1 г/см^3 , и опустим гирьку в воду на тонкой проволоке, прикрепленной к чашке. Равновесие весов нарушится (рис. 2.5.2), и его можно восстановить, добавив на данную чашку разновесы. В данном случае оказывается, что их масса составляет около 11,2 г, т.е. объем гирьки равен $11,2 \text{ см}^3$. Таким образом, плотность гирьки равна $100/11,2 \approx 8,9 \text{ г/см}^3$ — это плотность латуни, из которой изготовлена гирька.

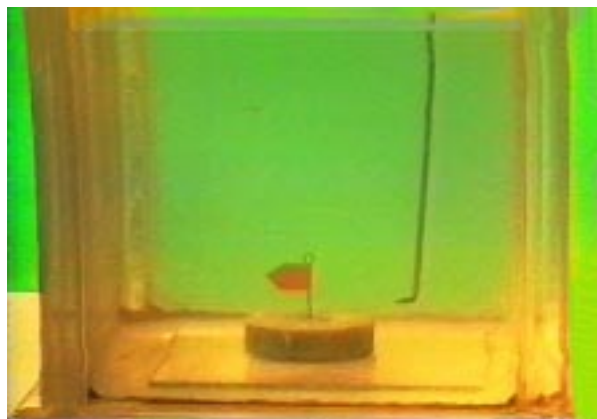


Рис. 2.5.3.

3) “присасывание” тела ко дну сосуда.

Выталкивающая сила (сила Архимеда) действует на тело, погруженное в жидкость, только в том случае, если жидкость окружает тело со всех сторон, в том числе и

снизу. В противном случае может наблюдаться явление присасывания тела ко дну сосуда. Это можно продемонстрировать при помощи парафиновой шайбы с гладкой нижней поверхностью.

Шайба опускается в прозрачный сосуд с водой, на дне которого лежит гладкая стеклянная пластина из зеркального стекла. Плотность парафина несколько меньше плотности воды, поэтому шайба плавает на поверхности. Если погрузить шайбу на дно, плотно прижав ее к стеклянной пластине и выдавив из-под нее всю воду (это можно сделать, так как парафин не смачивается водой), то шайба под действием давления находящегося над ней столба воды “присосется” ко дну сосуда (рис. 2.5.3). Ее можно двигать по дну проволочным крючком – шайба не будет всплывать. Для того, чтобы оторвать шайбу ото дна и заставить ее вновь всплыть, требуется приложить некоторое усилие.

Отметим, что явление, подобное описанному, может возникать, когда подводная лодка ложится на грунт. После этого ей бывает достаточно трудно оторваться от дна и всплыть.

2.6. Распределение давления в жидкости при её вращении:

1) жидкость в цилиндрическом сосуде.

Распределение давления во вращающейся жидкости можно продемонстрировать при помощи прозрачного стеклянного цилиндра с водой, установленного на валу центробежной машины. При раскручивании цилиндра жидкость за счет вязкого трения о стенки также постепенно раскручивается, и ее первоначально плоская свободная поверхность в установившемся режиме приобретает форму параболоида вращения (рис. 2.6.1). На оси центробежной машины столб воды имеет минимальную высоту, а при удалении от оси его высота растет пропорционально квадрату расстояния. Это говорит о том, что давление внутри вращающейся жидкости минимально на оси вращения и нарастает по параболическому закону по мере удаления от этой оси. Если увеличить угловую скорость вращения жидкости, то параболоид вытягивается и становится более “острым”.



Рис. 2.6.1.

2) легкий и тяжелый шарики в изогнутой трубке с маслом на центробежной машине.

Распределение давления во вращающейся жидкости можно также продемонстрировать при помощи закрытой на концах изогнутой трубки, заполненной прозрачным маслом и помещенной на валу центробежной машины. В трубке находятся два шарика – тяжелый свинцовый и легкий пенопластовый. Пока трубка покоится, легкий шарик находится наверху, у конца трубки, а тяжелый – внизу, около изгиба трубки. При раскручивании трубки тяжелый шарик “тонет” (рис. 2.6.2), т.е. движется в область с максимальным давлением

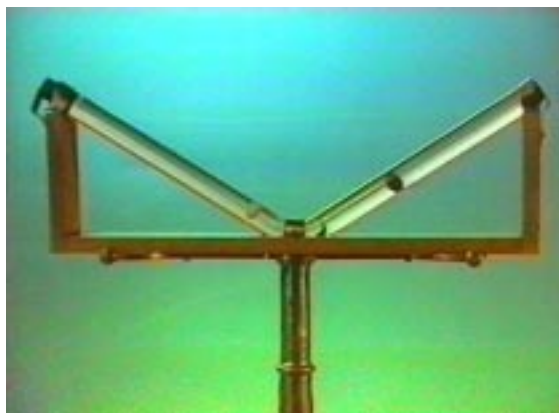


Рис.2.6.2.

— вверх, к концу трубки, а легкий движется в направлении, противоположном градиенту давления, т.е. в область с минимальным давлением — вниз, к оси вращения. После остановки вращения тяжелый шарик снова опускается вниз, а легкий всплывает вверх по трубке.

2.7. Плавание тел:

1) картезианский

“водолаз”

Тела, погруженные в жидкость, плавают в том случае, если их средняя плотность

равна плотности жидкости. Плавучесть тела можно регулировать, изменяя его среднюю плотность. Например, в подводных лодках это делают, продувая балластные цистерны. Этот принцип плавания тел под водой можно продемонстрировать при помощи устройства, называемого “картезианским водолазом”.

Прибор устроен следующим образом (рис. 2.7.1). В герметично закрытой резиновой мембраной стеклянной колбе, наполненной водой, плавает перевернутая пробирка, частично



Рис.2.7.1.

заполненная воздухом. В нижней части пробирки через затыкающую ее пробку пропущена стеклянная трубка с оттяжками, которые изогнуты под прямым углом и образуют сопла сегнера колеса. При нажатии на мембрану сверху давление внутри жидкости увеличивается, жидкость затекает в пробирку, средняя плотность пробирки с жидкостью увеличивается, и “водолаз” тонет. При уменьшении давления на мембрану жидкость вытекает из пробирки, объем воздуха в ней увеличивается, и “водолаз” всплывает.

Истечение воды из сопел сегнера колеса при всплытии “водолаза” приводит к его закручиванию. Этот эффект используют для создания забавной игрушки. “Водолаз” выдувается из стекла в виде полого чертика, а трубочка, через которую втекает и вытекает вода, делается в виде хвоста, обернутого вокруг тела чертика. Если поместить такую игрушку в закрытую пластиковую

бутылку из-под газированной воды, наполненную водой, то при сдавливании бутылки чертик будет тонуть, а при уменьшении давления на бутылку он будет всплывать и при этом быстро вращаться. Следует отметить, что затекание жидкости внутрь “картезианского водолаза” не приводит к его закручиванию.

2) прогибание поверхности воды под металлическим диском.

Обычно считается, что тела плавают на поверхности жидкости, если их средняя плотность меньше плотности жидкости. При этом влиянием малых сил поверхностного натяжения пренебрегают. Однако иногда они могут играть важную роль. Примером является плавание на поверхности воды стальной иголки, смазанной маслом и не смачиваемой из-за этого водой. Поверхность прогибается, увеличивая объем вытесненной несмачиваемой иголкой воды и обеспечивая ее плавучесть, хотя плотность иголки значительно превышает плотность воды.

Другим примером, более подходящим для демонстрации в большой аудитории, является следующий опыт. На поверхность воды, налитой в широкую кювету, кладут тонкий алюминиевый диск диаметром около 30 см, покрытый для уменьшения смачивания тонким слоем масла или парафина. Диск прогибает поверхность воды и плавает, даже если поставить на его центр груз массой 50–100 г (рис. 2.7.2). Подсчет показывает, что основную роль в этом случае играют выталкивающие силы, возникающие из-за прогибания поверхности жидкости, а силы поверхностного натяжения явно недостаточны для удержания диска с грузом на плаву. Для аккуратного опускания диска на воду следует использовать трифилярный подвес, закрепляя его нити симметрично на краю диска; при этом надо следить, чтобы под диском не оставалось воздушных пузырей.

3) шарик Галилея.

Восковой шарик (диаметром около 5 см) имеет плотность 0,95–0,99 г/см³ и плавает на поверхности воды. Если внутрь него вдавить металлический грузик, чтобы средняя плотность шарика чуть-чуть превысила плотность воды, то шарик тонет, если его бросить в сосуд с водой. Если же аккуратно положить шарик на поверхность воды, которая не смачивает воск, то шарик останется на плаву, не-



Рис. 2.7.2.



Рис. 2.7.3.

много прогибая поверхность воды вокруг себя. Утонувший в большом сосуде с водой шарик можно поднять на поверхность, не прикасаясь к нему, если погрузить в воду перевернутый вверх дном стакан и накрыть им шарик, лежащий на дне (рис. 2.7.3). При этом шарик начинает плавать на поверхности воды внутри стакана, и его можно аккуратно поднять до уровня воды в сосуде, а затем осторожно убрать стакан. При этом, чтобы шарик снова не утонул, надо не создавать больших волн на поверхности. Поэтому для показа опыта удобно использовать химический стакан, имеющий оттянутый “носик” — такой стакан легко отрывается от поверхности воды, почти не возмущая ее.

4) *стойчивость, метацентрическая высота.*

Условия устойчивого плавания тел на поверхности и внутри жидкости существенно отличаются. Если тело полностью погружено в жидкость, то оно будет устойчиво (стойчиво) плавать, только если его центр масс расположен ниже центра давления — точки приложения силы Архимеда, находящейся в центре масс вытесненной жидкости. При плавании тел на поверхности жидкости это условие не является обязательным: плавание может быть устойчивым, даже если центр масс тела лежит выше центра давления. Теория устойчивости кораблей при качке была разработана известным русским ученым, академиком А.Н.Крыловым. Для того, чтобы тело плавало устойчиво, при качке должен возникать момент сил, возвращающий его к положению равновесия. При наклоне плавающего тела центр давления смещается, и момент сил будет возвращающим, если линия приложения силы Архимеда пересекает линию, проведенную вертикально через центр масс при неотклоненном положении тела, выше центра масс. Точка пересечения этих линий называется “метacentром”, а ее высота над центром масс тела — “метацентрической высотой”. Таким образом, плавание будет устойчивым, если метацентрическая высота положительна. Ее величина определяется соотношением размеров тела и положением его центра масс, а для однородных тел — соотношением размеров и отношением их плотности к плотности жидкости.

Для демонстрации зависимости устойчивого положения плавающего тела от соотношения его размеров используются деревянные цилиндры одинаковой высоты и плотности, но разного диаметра. Цилиндры вертикально опускаются



Рис.2.7.4а.

в воду, налитую в большой прозрачный сосуд (рис. 2.7.4а). Они устойчиво плавают в разных положениях: если диаметр цилиндра заметно превышает его высоту, после опускания его ось остается вертикальной, а если диаметр меньше высоты — ось цилиндра принимает горизонтальное положение. Это объясняется тем, что при наклоне от вертикального положения у первого цилиндра центр давления смещается сильно, и

метацентрическая высота положительна, а у второго – слабо, и она отрицательна. При горизонтальном положении оси второго цилиндра ее наклон приводит уже к сильному изменению положения центра давления, и метацентрическая высота становится положительной, а плавание в таком положении – устойчивым.

Зависимость метацентрической высоты от положения центра масс плавающего тела демонстрируется при помощи цилиндрического поплавка, вдоль оси которого продет стержень. По концам стержня, выступающим из поплавка, можно передвигать два одинаковых грузика и закреплять их в разных положениях (рис. 2.7.4б). Если грузики расположены симметрично у концов стержня, то поплавок устойчиво плавает в горизонтальном положении. Если же сместить один из грузиков к торцу цилиндра, то центр масс поплавка сместится в сторону от центра давления, возникнет опрокидывающий момент сил (метацентрическая высота станет отрицательной), и поплавок повернется и займет вертикальное устойчивое положение. Опыт иллюстрирует опасность перемещения массивных грузов на кораблях, особенно если груз находится на палубе: при этом метацентрическая высота резко изменяется, и корабль может потерять устойчивость и перевернуться.



Рис. 2.7.4б.

груз находится на палубе: при этом метацентрическая высота резко изменяется, и корабль может потерять устойчивость и перевернуться.

5) непотопляемость корабля.

Данный опыт позволяет продемонстрировать “непотопляемость корабля” при получении пробойны в случае сохранения его устойчивости. Метод, предложенный академиком А.Н.Крыловым, иллюстрируется на модели, представляющей собой прозрачный цилиндрический сосуд, разделенный на три одинаковых отсека (рис. 2.7.5). Отсеки имеют отверстия, плотно закрываемые резиновыми проб-

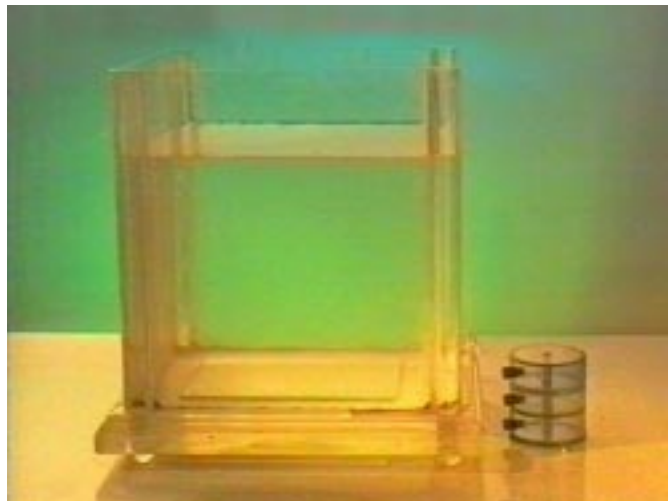


Рис. 2.7.5.

ками. Пустой сосуд устойчиво плавает в горизонтальном положении. Если образовалась “пробоина”, и один из крайних отсеков заполнился водой, цилиндр теряет остойчивость и переворачивается в вертикальное положение. Чтобы вернуть ему остойчивость, заполняют водой другой крайний отсек. Тогда, потеряв в плавучести, цилиндр возвращается в горизонтальное положение. Так же поступают в случае получения пробоины кораблем, разделенным на герметичные отсеки: затопляют симметричный отсек, корабль не теряет остойчивости и может быть отбуксирован в порт для ремонта.

2.8. Атмосферное давление:

1) опыт Торричелли.

В классическом опыте Торричелли пустота над уровнем ртути в запаянном конце трубки возникает лишь в том случае, когда длина трубки в миллиметрах превышает атмосферное давление, выраженное в миллиметрах ртутного столба (рис. 2.8.1а, б). Одним из вариантов опыта является демонстрация U-



Рис. 2.8. 1а.

образного ртутного манометра высотой около 200 мм под стеклянным колоколом форвакуумного насоса (рис. 2.8.1в). Пока не включена откачка, пустое пространство над уровнем ртути в трубке отсутствует. После включения насоса давление под колоколом падает, и когда оно достигнет разности высот столбиков ртути в сообщающихся трубках манометра, над ртутью в первоначально полностью заполненной трубке появляется “торричеллиева пустота”, объем которой растет по мере откачки пространства под колоколом. После выключения насо-

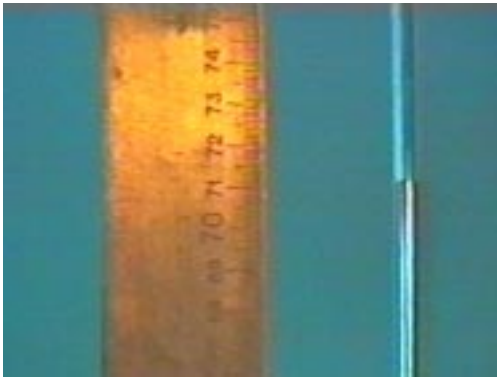


Рис. 2.8. 1б.



Рис. 2.8. 1в.

са при медленном напусканнии воздуха под колокол наблюдается увеличение разности высот ртути в коленах манометра — до тех пор, пока пустота не исчезнет.

Проведение опытов со ртутью на лекциях не разрешается по правилам техники безопасности, поэтому указанные демонстрации могут быть показаны только в видеозаписи. Величина атмосферного давления может быть измерена на лекции при помощи точного барометра-анероида, имеющегося в Кабинете физических демонстраций.

2) магдебургские полушария.

Опыт, доказывающий большую величину атмосферного давления, был впервые проведен в 1654 году в Германии немецким ученым и инженером Отто фон Герике. При помощи сконструированных им насосов он откачал воздух между двумя герметичными полушариями диаметром около 1 м, плотно пригнанными друг к другу и соединенными через уплотнительную прокладку. Далее полушария пытались оторвать друг от друга при помощи лошадей, которые растягивали их в разные стороны (рис. 2.8.2а). Даже 4 пары лошадей с каждой стороны не смогли этого сделать, пока внутренний объем полушарий не был сообщен с атмосферой через специальный клапан.



Рис.2.8.2а.

Для нашей демонстрации используются полушария диаметром около 12 см, так что предельная нагрузка, еще не отрывающая их друг от друга, составляет примерно 100 кг. На одном из полушарий имеется кран для откачки и последующего напуска воздуха. Стык полушарий промазывается вакуумной



Рис. 2.8.2б.

смазкой, затем они соединяются, подвешиваются на штатив и откачиваются форвакуумным насосом. После откачки к нижнему полушарию подвешивается двухпудовая гири (32 кг) (рис. 2.8.2б), и она висит до тех пор, пока между полушариями не будет напущен воздух. При проведении опыта на небольшом расстоянии под гирей устанавливается резиновая амортизирующая прокладка.

3) раздавливание банки атмосферным давлением.

Красивый опыт по действию атмосферного давления, описанный в свое время в книге Я.И.Перельмана “Занимательная физика”, можно продемонстрировать, вскипятив воду в металлической банке, которую можно плотно закрыть крышкой. Для проведения опыта годятся, например, двухсотграммовые жестяные банки из-под растворимого кофе. Для хорошего уплотнения крышка банки смазывается вакуумной смазкой.

В банку наливается небольшое количество воды, и она нагревается горелкой. Когда вода закипит и ее пары полностью вытеснят весь воздух из



Рис. 2.8.3.

банки, нагрев прекращается, и банка плотно закрывается крышкой. Затем банку поливают холодной водой, водяные пары в ней конденсируются, и давление внутри резко падает. Если в банке практически не осталось воздуха, то давление в ней после охлаждения до комнатной температуры может уменьшиться в несколько десятков раз. В результате банка сплющивается атмосферным давлением (рис. 2.8.3).

4) опыт с переворачиванием стакана с водой, накрытого бумагой.

Простой опыт, демонстрирующий наличие атмосферного давления, заключается в переворачивании полного стакана с водой, накрытого куском плотной вощеной бумаги. При этом вода из стакана не выливается, поскольку на бумагу снизу действует сила атмосферного давления (рис. 2.8.4). Силы поверх-

ностного натяжения в данном случае не могут удерживать бумагу, поскольку она покрыта воском и не смачивается водой. Для большей эффектности на дно стакана перед показом опыта можно положить небольшую гирьку или десяток монет. После переворачивания они окажутся на бумаге, которая, несмотря на это, будет держаться на стакане.

5) *перекачка воды и раздувание резинового шарика под колоколом воздушного насоса.*

В стеклянную колбу, частично заполненную подкрашенной жидкостью, вставлена через пробку изогнутая трубка, одним концом упирающаяся в дно колбы, а другим — в дно пустого стакана, в который она опущена. К середине трубки для увеличения наглядности опыта привязан почти не надутый завязанный воздушный шарик. Вся система накрывается прозрачным стеклянным колоколом, из-под которого можно откачивать воздух форвакуумным насосом (рис. 2.8.5). После начала откачки воздух, остающийся в колбе, выжимает жидкость через трубку в стакан, а воздушный шарик раздувается; после окончания откачки воздух, напускаемый под колпак, перегоняет жидкость обратно из стакана в колбу и сжимает шарик. Демонстрацию опыта полезно повторить несколько раз.

б) *зависимость давления от высоты.*

В длинный цилиндрический стеклянный сосуд с небольшими отверстиями у концов через припаянную посередине трубку напускается метан из газовой сети. Выходящий из отверстий газ поджигается. Пока со-



Рис. 2.8.4.



Рис. 2.8.5.

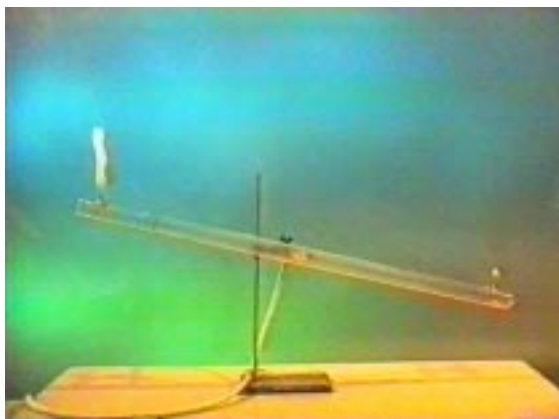


Рис. 2.8.6.

суд горизонтален, длина языков пламени одинакова. Если сосуд наклонить, то за счет разницы плотностей воздуха и метана (метан примерно вдвое легче воздуха) длина языков пламени станет неодинаковой. Разность давлений внутри и снаружи сосуда, от которой зависит скорость выхода газа, будет на разных концах сосуда различна: внизу меньше, чем при горизонтальном положении сосуда, поскольку давление воздуха нарастает при уменьшении высоты быстрее, чем у метана, а наверху больше, поскольку давление метана при увеличении высоты падает медленнее, чем у воздуха. Поэтому на нижнем конце сосуда язык пламени при наклоне уменьшается, а на верхнем — увеличивается (рис. 2.8.6); затем сосуд вновь приводится в горизонтальное положение, и опыт повторяется с наклоном сосуда в другую сторону.

7) *подъём мыльных пузырей, заполненных метаном.*

Возникновение подъемной силы, действующей на мыльный пузырь, заполненный метаном, можно по аналогии с предыдущей демонстрацией объяснить тем, что разность давлений легкого метана и вдвое более тяжелого воздуха на верхней поверхности пузыря больше, чем на нижней. Это



Рис. 2.8.7.

приводит к появлению направленной вверх суммарной силы, действующей на оболочку пузыря, и к подъему пузыря в воздухе. Пузыри выдуваются из мыльного раствора через трубку, присоединенную к газовой сети (рис. 2.8.7). После демонстрации полета пузырей можно поднести к одному из них зажженную зажигалку и наблюдать вспышку сгорающего в воздухе метана, находившегося внутри мыльного пузыря.

8) *газовый сифон.*

Тяжелые газы, попадающие в атмосферу, могут накапливаться в низинах, подземных выработках, коммуникациях и т.д. Особенно это касается углекислого газа, который ядовит и не поддерживает ни жизни, ни горения. Поэтому все места возможного скопления опасных газов должны хорошо проветриваться. Опыт, демонстрирующий перетекание углекислоты в низкие места, проводится следующим образом.

Два цилиндрических стеклянных сосуда устанавливаются на разной высоте и соединяются сифонной трубкой; в верхний сосуд напускается углекислый газ из баллона. Когда уровень углекислоты, которая тяжелее воздуха, достигает сгиба сифона на краю верхнего сосуда, подача газа прекращается, и он постепенно перетекает через сифон в нижний сосуд. Чтобы увидеть, как это происходит, наверху вблизи сгиба сифонной трубки помещается горящая свечка, и в нижний сосуд опускается палочка с укрепленными на ней на разной высоте тремя горячими свечками: по мере подъема уровня углекислоты в сосуде свечки по очереди гаснут (рис. 2.8.8). После продувки

нижнего сосуда воздухом опыт повторяется, но перетекание газа фиксируется уже не при помощи свечек, а визуально, при освещении установки светом вольтовой дуги, поскольку показатели преломления воздуха и углекислого газа заметно отличаются.



Рис.2.8.8.

3. Гидро- и аэродинамика

3.1. Ламинарное и турбулентное течения жидкости (прибор Поля–Колбанова)

Прибор для наблюдения ламинарного и турбулентного течения жидкости, а также для наблюдения обтекания различных тел потоком жидкости устроен следующим образом (рис. 3.1а). На кодоскопе установлена под небольшим углом к горизонту



Рис.3.1а.

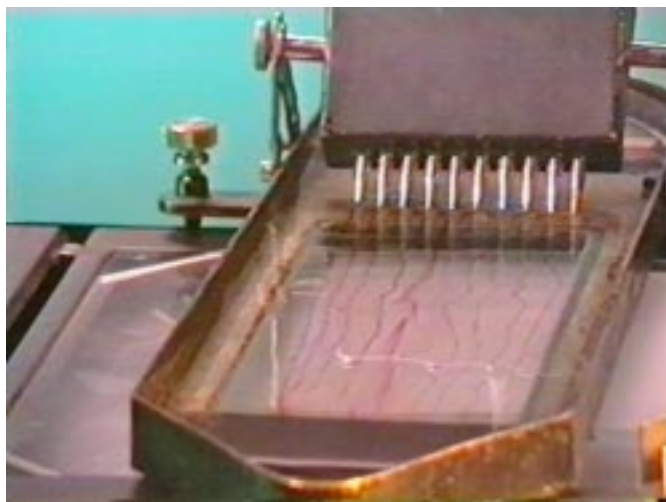


Рис.3.1б.

плоская кювета с прозрачным дном, по которой стекает поток воды, скорость которого можно регулировать. Над верхним концом кюветы установлена емкость с подкрашенной жидкостью, снабженная рядом трубочек с отверстиями малого диаметра, через которые эта жидкость поступает в поток воды в кювете (рис. 3.1б). Характер движения подкрашенных струек в потоке наблюдается в проекции на большом экране.

Если скорость потока мала, то наблюдается ламинарное течение жидкости, при котором все подкрашенные струйки параллельны друг другу, и жидкость, текущая вдоль них, не перемешивается (рис. 3.1в). При увеличении скорости потока ламинарность течения нарушается: вначале появляются колебания подкрашенных струек, затем появляются завихрения, струйки начинают хаотически двигаться и перемешиваться, т.е. поток жидкости



Рис.3.1в.



Рис.3.1г.

турбулизируется (рис. 3.1г). Таким образом, для данных условий опыта существует критическая скорость потока v , при которой ламинарное течение пре-

вращается в турбулентное, т.е. критическое число Рейнольдса $Re = \frac{\rho v \ell}{\eta}$, где ρ –

плотность, η – динамическая вязкость жидкости, а ℓ – характерный размер, в данном случае – толщина слоя жидкости в потоке (2–4 мм). Критическое значение $Re \approx 1000$, откуда для воды получаем $v \approx 30$ см/с, что согласуется с условиями нашего опыта.

3.2. Обратимость ламинарного течения (“фазовая память”)

При ламинарном течении жидкости ее слои не перемешиваются, поэтому, если провести все перемещения частиц жидкости в обратном направлении, то картина их взаимного расположения должна восстановиться, т.е. ламинарное течение является обратимым.

Для демонстрации этого явления используется следующая установка (рис. 3.2). Внутри приклеенного к подставке полого прозрачного цилиндра из оргстекла высотой около 20 см установлен соосно второй – сплошной цилиндр, который можно вращать вокруг оси за ручку, выведенную вверх через крышку первого цилиндра. Между цилиндрами имеется радиальный зазор толщиной около 1 см, в который залита вязкая жидкость – глицерин. При помощи шприца с длинной насадкой из трубочки через отверстие в крышке в середину слоя глицерина между ци-



Рис.3.2.

линдрами вводится вертикальный столбик подкрашенного глицерина диаметром около 1 мм. После этого внутренний цилиндр начинают вращать за ручку, считая число проделанных оборотов. Полоска подкрашенного глицерина при этом размазывается, и после 5–10 оборотов становится совершенно незаметной при наблюдении сбоку. Затем вращают ручку на то же количество оборотов в обратном направлении и наблюдают практически полное восстановление столбика подкрашенного глицерина после возвращения системы к исходному положению, т.е. к исходной фазе вращения. Потом повторяют опыт, вращая ручку в другом направлении.

Следует заметить, что глицерин весьма гигроскопичен, и его надо хранить в плотно закрытом сосуде. Лучше всего использовать только что открытые банки с заводским уплотнением, а если это невозможно, то перед использованием глицерин надо хорошо перемешать, чтобы устранить возможные градиенты плотности, возникающие при поглощении его поверхностными слоями паров воды. Подкрашенный глицерин также должен быть свежим и иметь плотность, близкую к плотности глицерина, используемого для проведения опыта. После окончания эксперимента глицерин надо слить, а установку тщательно промыть водой и высушить.

3.3. Уравнение Бернулли:

1) трубка с сужением.



Рис.3.3.1б.

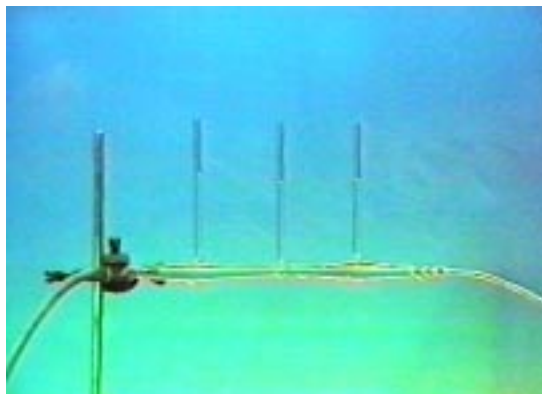


Рис.3.3.1а.

Если поток газа или жидкости пропустить через трубку переменного сечения, то согласно уравнению Бернулли в суженных ее частях давление будет ниже, чем в широких, а скорость потока — выше. Для демонстрации этого явления используется стеклянная трубка с сужением в средней части. Перпендикулярно к ней припаяны три манометрические трубочки — две в широких частях трубки и одна в суженной.

Вначале трубку закрепляют в штативе в горизонтальном положении, а манометрические трубочки направляют вниз и погружают в кювету с водой. При пропускании через трубку потока газа из манометрических трубочек выходят пузырьки — обильно из крайних и в меньшем количестве из средней (рис. 3.3.1а), что свидетельствует о меньшем давлении в суженной части трубки.

Затем манометрические трубочки направляют вверх, а по трубке пускают поток воды. На-

блюдают более высокие уровни воды в крайних трубочках по сравнению со средней (рис. 3.3.1б). При увеличении расхода воды давление в трубке повышается, и из манометрических трубочек начинают вытекать фонтанчики воды — более низкий из средней и более высокие из крайних.

2) *сирена Клемана—Дезорма.*

Под круглой горизонтальной пластиной с отверстием в центре для подвода газа подвешена на небольшом расстоянии вторая пластина (рис. 3.3.2). Если через отверстие пропускается газ, растекающийся между пластинами и выходящий наружу, то за счет падения давления в потоке нижняя пластина прижимается атмосферным давлением к верхней и перекрывает отверстие, из-за этого поток газа прекращается, давление между пластинами возрастает, и нижняя пластина возвращается в исходное состояние; далее процесс повторяется. Таким образом, возникают автоколебания нижней пластины, и она издает громкий звук. Для визуализации потока газа можно подавать в установку углекислоту из баллона и использовать подсветку от вольтовой дуги.



Рис.3.3.2.

3) *парение шарика в струе газа или жидкости.*

Согласно уравнению Бернулли давление в струе газа или жидкости ниже, чем в окружающем воздухе. Для демонстрации этого факта струя сжатого газа или воды из сопла направляется вверх, и в нее помещается шарик для настольного тенниса (рис. 3.3.3а и 3.3.3б). За счет гидродинамического напора струи снизу и пониженного давления в струе шарик устойчиво “парит” в воздухе даже при некотором отклонении струи от вертикали. Для наблюдения за поведением шарика на него полезно нанести черные точки.

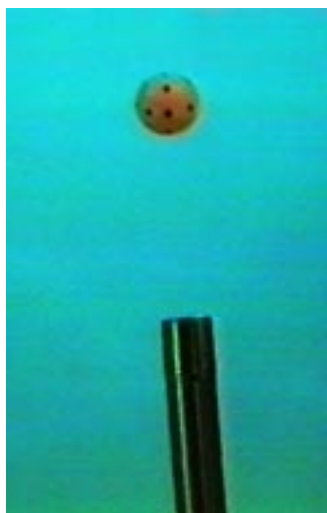


Рис.3.3.3а.



Рис.3.3.3б.

4) парение шарика в трубке переменного сечения.

Демонстрируется засасывание шарика для настольного тенниса в стеклянную трубку переменного сечения при продувании через нее потока газа. Первая половина трубки имеет диаметр около 10 мм, а вторая – около 40 мм. В трубку, держа ее расширенным концом вверх, кладут шарик и пускают струю газа. Шарик при этом притягивается к месту сужения трубки. Затем ее можно перевернуть даже отверстием вниз, и шарик будет парить в трубке у места сужения, не вываливаясь из нее (рис. 3.3.4).

5) втягивающее действие струи (шарик на подвесе).

Подвесив шарик для настольного тенниса к штативу на нитке, можно продемонстрировать втягивание его в струю газа. Для этого струю газа из сопла, идущую вверх под углом к горизонту, аккуратно приближают к шарика сбоку. Шарик втягивается в струю, и нитка отклоняется от вертикали (рис. 3.3.5).



Рис.3.3.4.



Рис.3.3.5.

б) пульверизатор и водоструйный насос.

Втягивающее действие струи используется при работе пульверизаторов и водоструйных насосов.

Пульверизатор (рис. 3.3.6а) состоит из сопла, в которое подается воздух под давлением, и трубки, верхний конец которой расположен около сопла, а нижний погружен в сосуд с распыляемой жидкостью. Жидкость через трубку засасывается в струю и распыляется на мелкие капли. Количество распыляемой жидкости регулируется путем изменения давления газа, подаваемого в сопло.

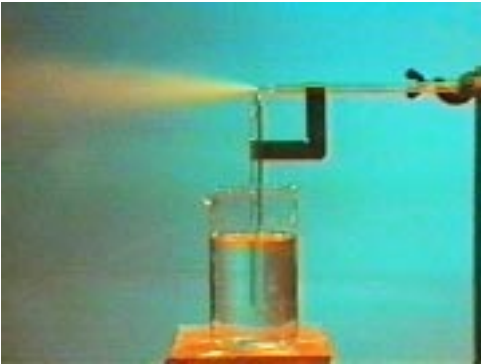


Рис.3.3.6а.



Рис.3.3.6б.

В водоструйном насосе струя жидкости, выходящая с большой скоростью из сопла, втягивает воздух из окружающего сопла сосуда и вместе с пузырьками воздуха выходит из него через воронку с отводящей трубкой (рис. 3.3.6б). При этом в сосуде создается разрежение, которое можно измерить при помощи подсоединенного к насосу вакуумметра. Для используемого в демонстрации насоса это разрежение при максимальном расходе воды достигает 0,5 атм. Водоструйные насосы просты по устройству, имеют большую производительность, не содержат движущихся деталей и часто используются в лабораториях, когда не требуется создание больших разрежений.

3.4. Статическое и динамическое давление в потоке жидкости и газа:

1) трубки Пито и Прандтля.

В широкую стеклянную трубку, по которой можно пропускать поток воды, впаяны две манометрические трубки. У одной из них конец отогнут и направлен в сторону набегающего потока – это трубка Пито, – а у другой плоскость среза на конце параллельна потоку. При пропускании потока воды через широкую трубку вода в манометрических трубках устанавливается на разных уровнях, которые зависят от скорости v потока (рис. 3.4.1). В трубке Пито давление на входе и, соответственно, высота подъема столбика воды определяется, согласно уравнению Бернулли, суммой давления внутри жидкости p и “скоростного напора”,

равного $\frac{\rho v^2}{2}$, где ρ – плот-

ность жидкости, а во второй трубке – только давлением p , так что динамическое давление больше статического. Поэтому комбинация двух таких манометрических трубок, называемая трубкой Прандтля, позволяет по разности давлений в них определять скорость потока жидкости или газа, обтекающего трубки. Разность высот подъема жидкости в трубках за-

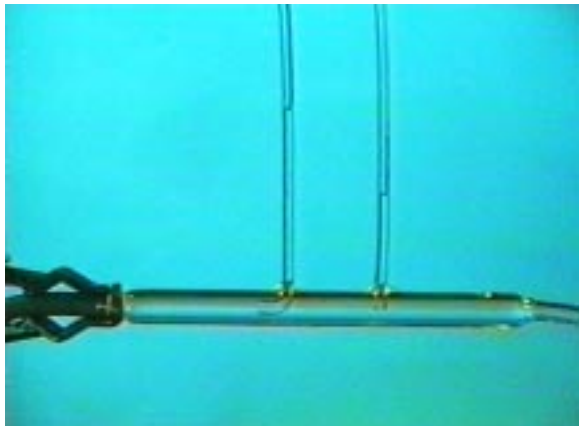


Рис.3.4.1.

висит от скорости потока квадратичным образом, так что данный датчик скорости набегающего на трубки потока является нелинейным; при проведении эксперимента хорошо заметно, что с ростом скорости потока эта разность начинает расти все быстрее.

2) *гидравлический удар.*

Гидравлический удар при движении жидкости возникает из-за ее малой сжимаемости, когда движущаяся жидкость резко останавливается. Это явление легко продемонстрировать при помощи пластиковой бутылки из-под газированной воды, полностью заполнив ее водой и бросив с небольшой высоты на твердое основание. При этом вся масса воды в бутылке останавливается, возникает резкое увеличение давления, и вода из горлышка бутылки выбрасывается вверх на высоту, значительно превышающую ту, с которой была брошена бутылка (рис. 3.4.2а). На этом же эффекте основан известный способ вышибания пробки из бутылки при резком ударе по ее дну.

Явление гидравлического удара можно продемонстрировать и другим способом. Небольшая стеклянная воронка закрепляется в штативе на высоте около метра над столом и соединяется куском резинового шланга с наконечником, имеющим на конце сужение диаметром 1–2 мм. Наконечник помещается на 30–50 см ниже воронки, его конец затыкается пальцем и направляется вертикально вверх, а в воронку наливается вода. При этом между заткнутым наконечником и водой в шланге образуется воздушная пробка. После открывания отверстия в наконечнике вода начинает вытекать из воронки, встречает на своем пути сужение, и в результате резкого торможения возникает гидравлический удар. При этом из наконечника вверх бьет тонкий фонтан, поднимающийся на высоту, значительно превышающую уровень воды в воронке (рис. 3.4.2б). Поскольку



Рис.3.4.2а.



Рис.3.4.2б.

такой фонтан возникает лишь на очень короткое время, после чего его высота уменьшается так, что он немного не достигает уровня воды в воронке, опыт следует повторить несколько раз. Для этого надо слить воду из шланга обратно в воронку, подняв его конец выше воронки, чтобы образовалась воздушная пробка, и заткнув отверстие в наконечнике, снова опустить его вниз и затем

открыть. Эту демонстрацию следует показывать при ярком электрическом освещении, чтобы мелкие капли, на которые разбивается вылетевшая из узкого отверстия струя воды, блестели и были хорошо видны из аудитории.

3) сифон, не требующий засасывания.

Явление гидравлического удара можно использовать для создания сифона, не требующего засасывания для начала переливания жидкости из одного сосуда в другой, установленный на более низком уровне. На входе трубки такого сифона имеется расширенная часть, которую погружают в верхний сосуд, заполненный жидкостью, предварительно заткнув нижнее отверстие сифона пальцем (рис. 3.4.3). После открывания трубки жидкость устремляется в ее широкую часть, и при достижении сужения за счет резкого торможения возникает гидравлический удар, т.е. увеличение давления, выбрасывающее жидкость по узкой части трубки выше уровня в верхнем сосуде и далее через изгиб сифонной трубки, после чего сифон начинает работать, т.е. переливать жидкость в нижний сосуд. Если опустить широкую часть сифона в верхний сосуд, не закрывая нижнего отверстия сифона, то переливания жидкости не происходит — сифон не работает.

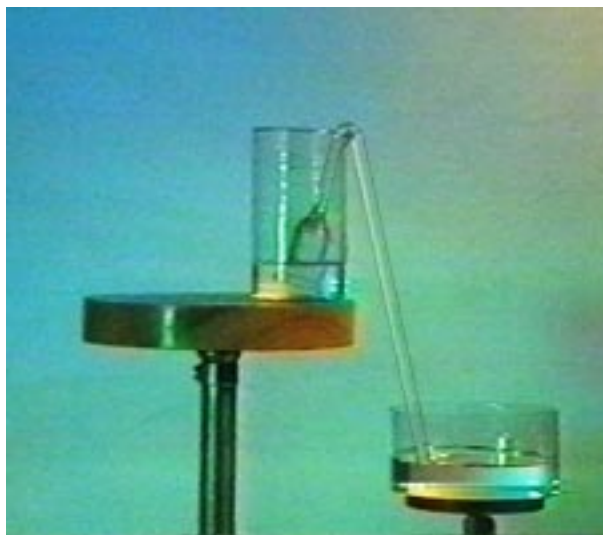


Рис.3.4.3.

3.5. Реакция струи:

1) сосуд с водой на тележке.

На тележку, которая может легко перемещаться по горизонтальным рельсам, уложенным на лабораторном столе, ставят высокий сосуд с водой, у которого имеется отверстие в нижней части боковой стенки, заткнутое пробкой. Если отверстие направлено вдоль рельсов, то после вынимания пробки тележка под действием силы реакции вытекающей струи движется в направлении, противоположном направлению истечения воды (рис. 3.5.1). Сила реакции струи (реактивная



Рис.3.5.1.

сила) возникает из-за нескомпенсированности сил давления жидкости на переднюю и заднюю (по отношению к направлению вытекания) стенки сосуда.

2) полет ракеты.

Демонстрируется полет модели ракеты под действием силы реакции вытекающей из нее струи воды. В полый корпус ракеты заливается на $1/3$ объема вода, после чего через специальное пусковое устройство в ракету при помощи велосипедного насоса накачивается воздух до давления 2–3 атм. Установив ракету вертикально, нажимают спуск и наблюдают ее полет вверх, т.е. в сторону, противоположную направлению истечения воды. Более безопасным и удобным для демонстрации в аудитории является запуск ракеты вдоль направляющей проволоки, натянутой наклонно от лабораторного стола к потолку аудитории (у балкона). При этом на ракете вблизи ее головной и хвостовой частей закрепляются два проволочных кольца, сквозь которые продевается направляющая проволока (рис. 3.5.2).

3) отклонение изогнутой трубки при истечении из нее воды.

К водопроводному крану длинным резиновым шлангом присоединяют кусок стеклянной или металлической трубки, изогнутой под прямым углом. Шланг перекидывают через горизонтальную штангу, укрепленную на штативе над лабораторным столом так, чтобы свешивающийся конец шланга со вставленной в него изогнутой трубкой находился над сливной раковиной или кюветой, установленной на столе для приема воды. При вытекании воды трубка, висящая на гибком шланге, отклоняется в сторону, противоположную направлению истечения воды (рис. 3.5.3).

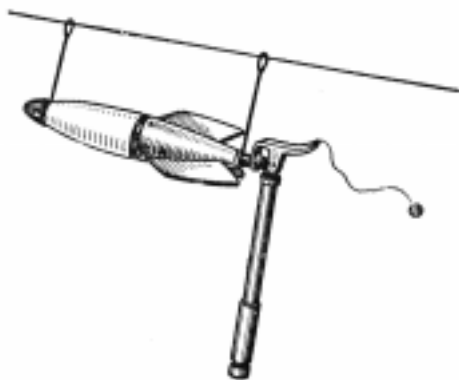


Рис.3.5.2.



Рис.3.5.3.

4) сегнерова колесо.

Реакцию вытекающей струи можно продемонстрировать при помощи широко известного прибора – сегнерова колеса (рис. 3.5.4а). Однако, более интересным для демонстрации является проведение опыта в обратном порядке: оказывается, что если создать такие условия, при которых вода будет не вытекать из изогнутых трубок колеса, а засасываться в них, то колесо не будет вращаться.



Рис.3.5.4а.



Рис.3.5.4б.

Прибор для проведения этого опыта по конструкции близок к сегнерову колесу: надо лишь создать возможность откачки сосуда, из которого вытекает вода. Для этого верхнее отверстие сосуда закрывают большой пробкой, через которую пропущена трубка с краном (рис. 3.5.4б). Весь прибор ставят в центр плоской кюветы, заполненной водой до такого уровня, чтобы изогнутые трубки сегнерова колеса были полностью погружены в воду. Закрыв эти трубки пробками и откачав сосуд до низкого давления (около 0,1 атм), закрывают кран, отсоединяют шланг для откачки, вынимают пробки и наблюдают втекание воды из кюветы в сосуд под действием атмосферного давления. Никакого вращения при этом не возникает. Затем открывают кран наверху сосуда, сообщающий его с атмосферой, вода начинает вытекать из трубок сегнерова колеса обратно в кювету, и оно начинает вращаться. Надо заметить, что для большей убедительности опыта вытекание воды из трубок должно происходить так же, как и засасывание — при их полном погружении в воду, налитую в кювету.

3.6. Эффект Магнуса:

1) тележка с вращающимся цилиндром (модель судна Флетнера).

Если в поток газа поместить вращающийся цилиндр, ось которого перпендикулярна направлению потока, то за счет вязкого трения цилиндр увлекает пограничный слой газа, и скорость обтекания цилиндра потоком в направлении вращения становится больше, чем в отсутствие вращения, а давление — меньше. С другой стороны цилиндра, где скорость вра-



Рис.3.6.1.

щения направлена в сторону, противоположную направлению скорости потока, скорость обтекания становится меньше, а давление — больше. Появляется разность давлений и сила, действующая на цилиндр в направлении, перпендикулярном потоку. Описанное явление называется эффектом Магнуса.

Один из вариантов использования этого эффекта для приведения в движение морских судов предлагался в 1924 году Флетнером. Модель роторного судна Флетнера работает следующим образом. На легкой тележке установлен в вертикальном положении цилиндрический ротор, приводимый во вращение электромотором. Сбоку от тележки установлены вентиляторы, создающие “ветер”, дующий перпендикулярно направлению возможного движения тележки. Благодаря эффекту Магнуса на цилиндр действует сила, и тележка приходит в движение (рис. 3.6.1). При изменении направления вращения ротора сила также меняет свое направление, и тележка начинает двигаться в противоположную сторону.

2) скатывание легких цилиндров с наклонной плоскости.

Другой вариант демонстрации эффекта Магнуса состоит в скатывании легких тонкостенных бумажных или пенопластовых цилиндров с наклонной плоскости, поднятой на некоторую высоту над полом (рис. 3.6.2). Цилиндр при скатывании закручивается вокруг своей оси, и скорость его верхних точек направлена против набегающего потока воздуха. Поэтому во время падения на него действует сила, дополнительно искривляющая его траекторию вниз и назад. В результате падение происходит не по параболе, а по более искривлённой линии; горизонтальная составляющая скорости цилиндра в полете умень-

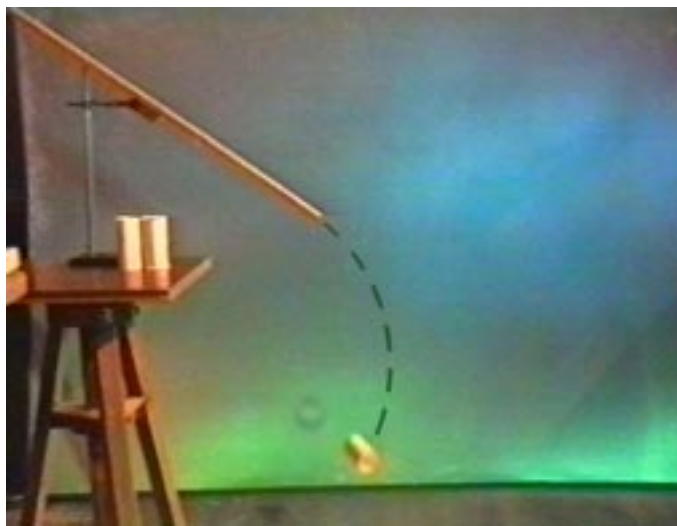


Рис.3.6.2.

шается и даже может изменить знак. Для сравнения скатываются также сплошные цилиндры гораздо большей массы, чем бумажные. На полет массивных цилиндров малые по сравнению с силой тяжести аэродинамические силы почти не оказывают влияния, и они летят по параболе. Для более устойчивого движения бумажных цилиндров к их торцам можно приклеить бумажные диски несколько большего диаметра, чем диаметр этих цилиндров.

3) полет вращающегося цилиндра (“мёртвая петля”).

На летящее в воздухе вращающееся тело действует в поперечном направлении сила, изменяющая направление его полета. Для демонстрации этого явления используется бумажный цилиндр-катушка, на который наматывается лента, привязанная к деревянной линейке. Цилиндр с намотанной лентой ставится горизонтально на аудиторный стол (рис. 3.6.3а), после чего с помощью



Рис.3.6.3а.



Рис.3.6.3б.

резкого рывка линейки вдоль стола ему сообщают вращение и некоторую начальную скорость, причем линейная скорость вращения снизу цилиндра должна быть направлена против набегающего потока воздуха. Тогда сила, возникающая из-за эффекта Магнуса, направлена вверх, и цилиндр “взмывает” над столом, описывает “мертвую петлю” (рис. 3.6.3б) и далее летит, плавно снижаясь. Опыт полезно также воспроизвести в видеозаписи в замедленном темпе.

4) “резаный” мяч.

Искривленная траектория полета “резаного”, т.е. подкрученного при ударе мяча также объясняется эффектом Магнуса. Для демонстрации полета закрученного мяча используется следующая установка (рис. 3.6.4). На вертикальную ось электродвигателя постоянного тока, укрепленного на массивном штативе, насажена резиновая трубка. На нее кладется шарик от настольного тенниса, который поджимается сверху к торцу трубки подпружиненным диском. На стойке прибора имеется стальная пружина со спусковым механизмом, которая может с определенной силой ударять по шарик. В начале опыта наносят удар по неподвижному шарик и наблюдают его полет в одном направлении. Затем включают электродвигатель, раскручивают шарик и наносят удар уже по вращающемуся шарик. При этом шарик летит уже в несколько ином направлении, а траектория его движения искривляется. Переключив направление вращения электродвигателя, повторяют опыт с подкруткой шарика в другую сторону.



Рис.3.6.4.

При этом шарик летит уже в несколько ином направлении, а траектория его движения искривляется. Переключив направление вращения электродвигателя, повторяют опыт с подкруткой шарика в другую сторону.

3.7. Течение вязкой жидкости:

1) падение давления вдоль трубы.

При течении вязкой жидкости по трубе постоянного сечения давление падает вдоль трубы по линейному закону. Для демонстрации этого явления к большому стеклянному сосуду с подкрашенной водой в нижней части присоединена горизонтальная труба с краном на конце, к которой припаян ряд вертикальных стеклянных манометрических трубок, открытых сверху. Пока кран закрыт, вода во всех трубках и в сосуде стоит на одном уровне; после открывания крана начинается вытекание воды, и вдоль трубы быстро устанавливается

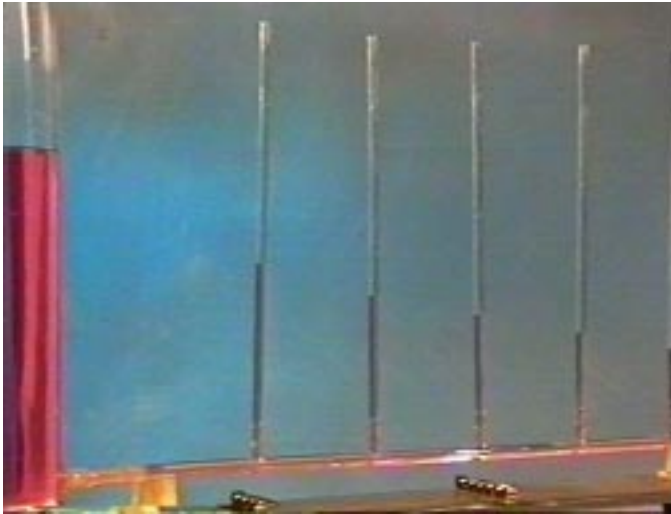


Рис.3.7.1.

линейное распределение давления, наблюдаемое на манометрических трубках (рис. 3.7.1). Для увеличения наглядности опыта можно после открывания крана подливать в сосуд воду через шланг, подобрав напор так, чтобы ее уровень оставался примерно на одной высоте. В этом случае уровни жидкости в манометрических трубках также не будут меняться с течением времени, давая устойчивую картину распределения давления вдоль трубы при вытекании жидкости.

2) распределение скоростей по сечению потока.

При ламинарном течении вязкой жидкости по трубе скорости отдельных слоев жидкости неодинаковы: скорость максимальна на оси трубы и минимальна у стенок. Распределение скоростей в цилиндрической трубе, как устано-



Рис.3.7.2.

вил в свое время Пуазейль, близко к параболическому. Для демонстрации этого в прозрачный вертикальный сосуд достаточной высоты наливают глицерин, а поверх него — слой того же глицерина, подкрашенного чернилами. После открытия крана внизу сосуда наблюдается изгибание границы между окрашенной и неокрашенными частями жидкости в соответствии с распределением скоростей по сечению потока в трубе (рис. 3.7.2). Наблюдение опыта ведется на просвет, в

проекции на экран, для чего сосуд должен иметь прямоугольное сечение, а внутреннее отверстие в нем – круглое; сосуд можно изготовить из полированного оргстекла.

3.8. Вихри:

1) “смерч” в воронке с водой.

Известно, что вытекание жидкости из сосуда с отверстием в дне, например, из ванны, неустойчиво по отношению к образованию вихрей. Это можно продемонстрировать на примере вытекания воды из большой воронки. Если заполнять заткнутую снизу воронку струей воды, придавая таким образом вращение всему объему воды в воронке, то после открытия воронки в ней быстро образуется красивый вихрь (рис. 3.8.1), внешне напоминающий смерч-торнадо, возникающие иногда во время гроз и ураганов. По мере вытекания воды вихрь растет, пронизывает всю толщу воды в воронке, а воздух с шумом засасывается в него.



Рис.3.8.1.

2) “смерч”, возбуждаемый магнитной мешалкой.

Для приготовления однородных смесей жидкостей часто используют магнитные мешалки. Модель такой мешалки устроена следующим образом (рис. 3.8.2). Внизу под дном цилиндрического стеклянного сосуда на оси электродвигателя постоянного тока помещен сильный постоянный магнит, а в сосуде – ферромагнитный стержень, который может быть заключен в химически стойкую оболочку. Если включить двигатель, то стержень будет вращаться, размешивая жидкость. Преимуществом такой мешалки является то, что вращение передается внутрь

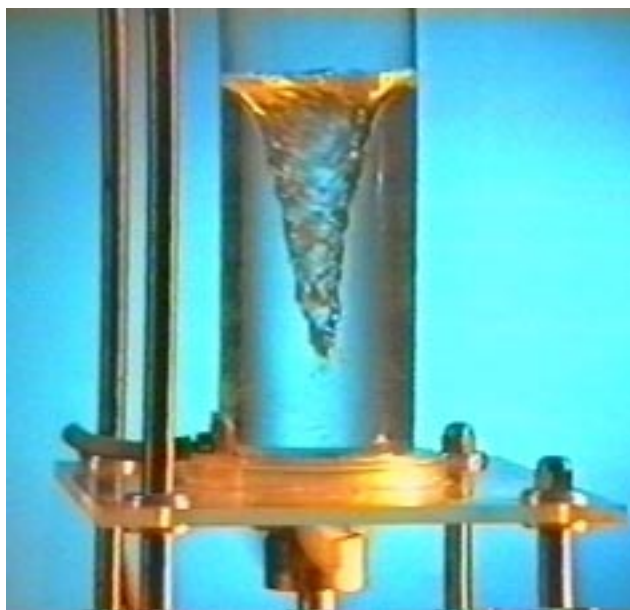


Рис.3.8.2.

жидкости без непосредственного контакта с ней деталей внешнего привода, а направление вращения можно менять, добиваясь закручивания жидкости в разные стороны и более тщательного ее перемешивания. Напустив в сосуд воду, демонстрируют возникновение в ней вихря при включении электродвигателя мешалки.

3) *кольцевые вихри в воздухе (дымовые кольца).*

“Пушка” для стрельбы дымовыми кольцами устроена следующим образом (рис. 3.8.3а). На одном конце металлического цилиндра имеется круглое отверстие, которое можно закрывать крышкой, а на другом натянута упругая резиновая мембрана. В крышке имеется небольшое отверстие для заполнения



Рис.3.8.3а.

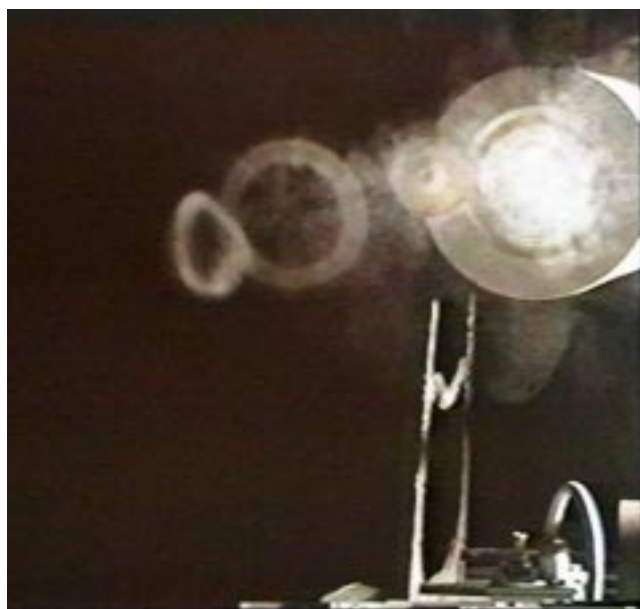


Рис.3.8.3б.

“пушки” дымом. Удобно использовать для этого зажженную сигарету, вставленную на специальную мундштуке в стеклянную трубку. На конец трубки надет резиновый шланг, через который подается от насоса воздух, а из конца мундштука, где находится фильтр сигареты, дым выходит внутрь “пушки”. После ее заполнения дымом крышку открывают, и при ударах по мембране получают устойчивые дымовые кольца (рис. 3.8.3б), скорость движения которых зависит от силы ударов по мембране. Для того, чтобы кольцевые вихри были хорошо видны, аудиторию затемняют, а сами кольца подсвечивают сбоку лампой. “Пушка” установлена на поворотном столе, что позволяет производить ее точное нацеливание. Можно, например, погасить дымовым кольцом горящую свечу или сбить легкий предмет с подставки. При некоторой сноровке удастся выпускать сначала медленно движущееся кольцо, а затем — быстрое, так, что второе проходит сквозь первое.

4) кольцевые вихри в жидкости.

Для демонстрации кольцевых вихрей в жидкости можно использовать большую прямоугольную кювету с чистой водой, в которую погружена изогнутая трубка с водой, подкрашенной марганцовокислым калием или цветными чернилами (рис. 3.8.4а). Подкрашенная вода поступает в трубку из воронки с краном, укрепленной на штативе над кюветой, через резиновую трубку. Заполнив систему, закрывают кран, после чего при резком сдавливании пальцами резиновой трубки из отверстия на конце изогнутой трубки выходят цветные кольцевые вихри, распространяющиеся в воде (рис. 3.8.4б). Опыт демонстриру-



Рис.3.8.4а.



Рис.3.8.4б.

ется в проекции на большом экране при помощи видеокамеры. Изгиб трубки следует направить таким образом, чтобы вихри проецировались на экран в форме эллипсов. Можно показать, как и в случае дымовых колец, прохождение одного кольца через другое, а также столкновение колец со стенкой сосуда и их разрушение.

5) полукольцевые вихри у поверхности жидкости (по Гельмгольцу, “весло”).

При гребле веслами на поверхности воды после гребка часто бывают видны воронкообразные углубления, движущиеся по воде и сохраняющиеся в течение некоторого времени. Вращение частиц воды в этих углублениях происходит в противоположные стороны. Углубления представляют собой окончания полукольцевых вихрей, образующихся около поверхности воды при гребле из-за больших градиентов скорости вблизи краев весел. Продемонстрировать это явление можно при помощи плоской прозрачной кюветы с водой, установленной на кодоско-



Рис.3.8.5а.

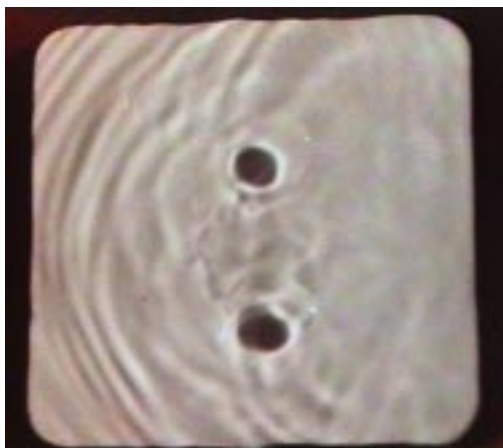


Рис.3.8.5б.

пе. Если сфокусировать на экране поверхность воды, а затем совершить не слишком сильный гребок чайной ложкой (рис. 3.8.5а), то по краям ложки будут четко видны бегущие в сторону ее движения углубления (рис. 3.8.5б). Заметим, что вихри образуются не каждый раз, и демонстратор перед показом опыта должен потренироваться в их получении.

3.9. Диск Рэля

Прибор представляет из себя легкий диск, который может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, укрепленной на штативе (рис. 3.9). Диск обдувается потоком воздуха от вентилятора.

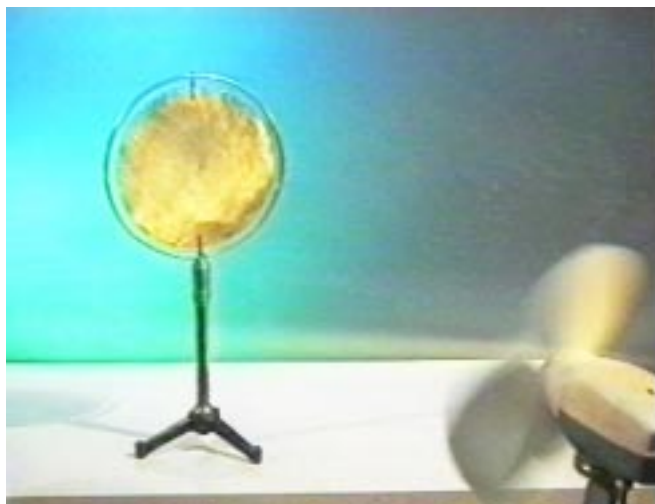


Рис.3.9.

При этом устойчивым является такое положение диска, когда его плоскость расположена перпендикулярно набегающему потоку. Положение диска вдоль потока воздуха неустойчиво. Это объясняется тем, что когда диск расположен поперек потока, его обтекание происходит симметричным и устойчивым образом, а при отклонении от этого положения симметричность обтекания нарушается, и возникает момент аэродинамических сил, стремящийся вернуть диск в исходное положение.

3.10. Явление “подсасывания”:

1) свеча за диском, обдуваемым воздухом.

Поток воздуха от вентилятора направляется на горящую свечу и сдувает ее пламя в сторону движения воздуха. Если поставить перед свечой перпендикулярно потоку диск, то пламя отклоняется в противоположную сторону — к диску (рис. 3.10.1). Это объясняется тем, что в потоке воздуха за диском образуются завихрения, в которых воздух вблизи оси диска движется в направлении, противоположном исходному, т.е. к диску. Заднюю сторону обдуваемого потоком тела называют “подсасывающей стороной”, поскольку вблизи нее наблю-

дается обратное движение части потока. То же самое происходит, когда мы несем свечу, прикрывая ее от набегающего потока воздуха ладонью: пламя отклоняется в сторону ладони. Этим же эффектом объясняется и загрязнение задних поверхностей грузовиков и автобусов прямоугольной формы при их движении по дорогам в мокрую погоду.



Рис.3.10.1.

2) реактивная тележка с отражательной заслонкой на воздушной дорожке — движение “назад”.

На дорожку с воздушной подушкой устанавливается специальная тележка, у которой часть воздуха из-под тележки отбирается и направляется через поворотное сопло в любую сторону. Если направить сопло вдоль дорожки, то под действием реактивной силы струи воздуха тележка едет в направлении, противоположном движению этой струи. Затем на тележке перпендикулярно соплу прикрепляется легкая пластинка, перекрывающая поток воздуха (рис. 3.10.2). После этого направление движения тележки меняется на противоположное, поскольку поток отражается от заслонки, а за ней образуется область разрежения, в которую подсасывается окружающий воздух.



Рис.3.10.2.

3.11. Физические основы авиации:

1) демонстрация обтекания тел на приборе Поля–Колбанова.

В приборе Поля–Колбанова (см. демонстрацию 3.1) в плоской кювете создается ламинарный поток воды, в который введены струйки окрашенной жидкости. Это позволяет наблюдать явления, возникающие при обтекании тел различной формы. В поток вводятся поочередно изогнутая пластинка, цилиндр, каплевидное тело (острым концом назад и вперед), модель крыла самолета. Наблюдается их обтекание потоком, отклонение потока крылом при разных углах атаки, срыв потока при критическом угле и образование вихрей (рис. 3.11.1а–д).

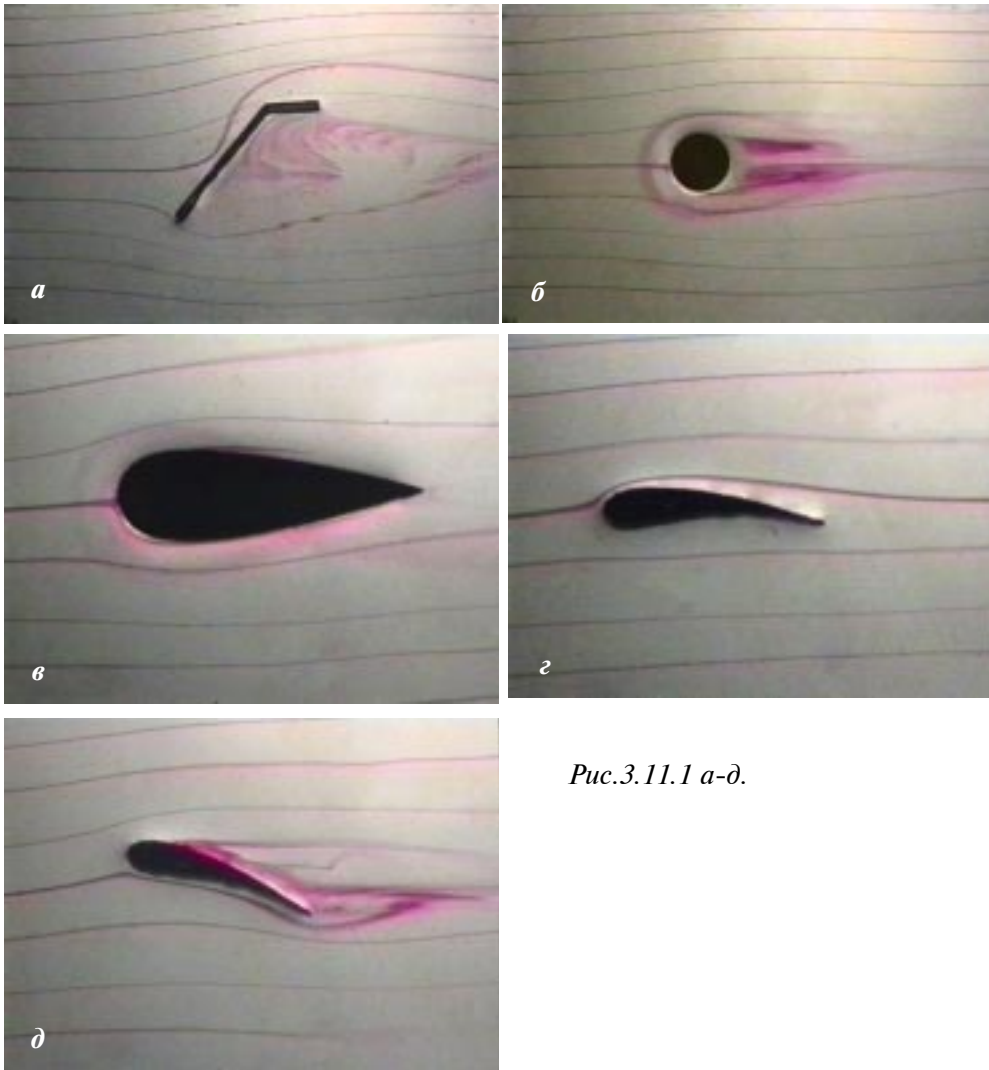


Рис.3.11.1 а-д.

2) возникновение подъемной силы крыла.



Рис.3.11.2.

Возникновение подъемной силы у крыла самолета демонстрируется при помощи диапанели (рис. 3.11.2). Поток воздуха от воздуходувки может направляться поворотным соплом под разными углами на модель крыла, изготовленную из прозрачной пластмассы. Внутри модели, установленной в вертикальном положении, имеется маленький U-образный манометр с подкрашенной жидкостью, который фиксирует разность давлений между выпуклой (“верхней”) и плоской (“нижней”) поверхностями

крыла. Если поток обтекает крыло под некоторым углом, меньшим критического угла атаки, то манометр показывает, что давление “под” крылом выше, чем “над” крылом. Таким образом, за счет этой разности давлений у крыла возникает подъемная сила. С ростом угла атаки она растет, достигает максимума, а после перехода через критический угол при срыве потока резко падает, что хорошо видно по показаниям манометра.

3) опыты с аэродинамической трубой.

Модель аэродинамической трубы устроена следующим образом (рис. 3.11.3а). Внутри закрытого со всех сторон деревянного стола установлен мощный вентилятор А с электродвигателем В. Поток воздуха выходит через конус С и специальный диффузор D наружу, в рабочее пространство трубы E, и затем втягивается через приемную трубу F обратно внутрь стола, к вентилятору. В поток воздуха между диффузором и приемной трубой можно помещать различные тела, закрепляя их на специальных аэродинамических весах, устанавливаемых на столе. Опыты с аэродинамическими весами проводятся в теневой проекции.

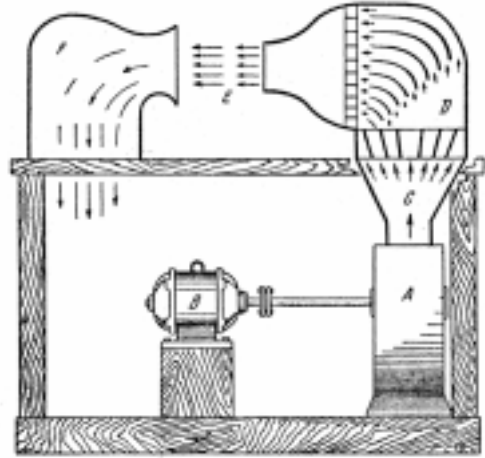


Рис.3.11.3а.

Для демонстрации лобового сопротивления тел различной формы используют весы, изображенные на рис. 3.11.3б. Исследуемые тела одинакового поперечного сечения (диск, полусферическая чашка и каплевидное тело) по очереди помещают в поток воздуха, закрепляя их на весах при помощи тонких алюминиевых стерженьков. Наблюдают уменьшение силы лобового сопротивления при переходе от обдувания чашки со стороны вогнутой поверхности к диску, выпуклой чашке, каплевидному телу острием вперед и острием назад. Весы предварительно регулируются таким образом, чтобы отклонение стрелки для всех тел не выходило за пределы шкалы прибора. Для одного из тел (например, диска) демонстрируют влияние скорости потока на величину лобового сопротивления. Для снижения скорости потока воздуха уменьшают напряжение, подаваемое на электромотор вентилятора.

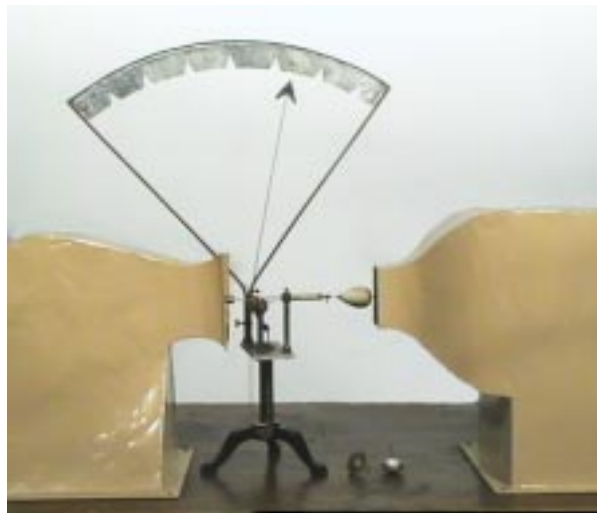


Рис.3.11.3б.



Рис. 3.11.3в.



Рис. 3.11.3г.

Различие лобового сопротивления у выпуклых и вогнутых в направлении потока чашек используется в анемометре – приборе, служащем для определения скорости ветра. Демонстрационный анемометр устроен следующим образом (рис. 3.11.3в). На вертикальной оси счетчика числа оборотов закреплены три легкие полу-сферические чашки, при помещении которых в поток воздуха начинается вращение оси, причем всегда в одну сторону, независимо от направления ветра. Это объясняется тем, что заметное аэродинамическое сопротивление оказывает только та чашка, которая обращена вогнутостью к потоку.

Подъемная сила крыла самолета демонстрируется при помощи аэродинамических весов, изображенных на рис. 3.11.3г. Модель крыла помещается в поток воздуха под разными углами, и подъемная сила оценивается по отклонению стрелки весов. Наблюдается рост этой силы по мере увеличения угла атаки до $\sim 30^\circ$, а затем ее уменьшение.

4) модель вертолета; авторотация.

Воздушный винт вертолета, вращающийся вокруг вертикальной оси, “ввинчивается” в воздух и, отбрасывая его вниз, создает силу тяги, направленную вверх. Это можно продемонстрировать при помощи модели, устроенной следующим образом (рис. 3.11.4а). На стальную ось с рукояткой надевают катушку, которая может свободно вращаться на оси. В верхний торец катушки вбивают два небольших стальных стерженька, которые вставляются в отверстия в пропеллере, изготовленном из металла или пластмассы. Удерживая ось в вертикальном положении и раскрутив пропеллер при помощи нитки, намотанной на катушку, наблюдают его взлет на высоту нескольких метров. Для безопасного проведения опыта пропеллер должен быть снабжен ограждающим кольцом, прикрепленным к концам его лопастей.

В случае отказа двигателя вертолетный винт используют, как парашют – для уменьшения скорости падения. Для этого его переводят в режим так называемой “авторотации”, устанавливая лопасти под строго определенным углом. Возникновение вращения винта при его падении из-за взаимодействия с набегающим потоком воздуха можно продемонстрировать следующим образом

*Рис.3.11.4а.**Рис.3.11.4б.*

(рис. 3.11.4б). Из тонкой алюминиевой полосы изготавливают большой пропеллер, прикрепляют к нему для стабилизации легкую ось с грузиком на конце и сбрасывают эту конструкцию с балкона аудитории. Во время падения пропеллер раскручивается и действует, как парашют.

Видеозаписи лекционных экспериментов

В Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова в последние годы были созданы видеокассеты с записями лекционных экспериментов. Собранные на них опыты являются классикой демонстрационного физического эксперимента и в течение многих лет показываются школьникам и студентам при чтении лекций на физическом факультете МГУ. За прошедшие 10 лет эти записи прочно вошли в практику преподавания физики во многих российских школах и вузах. В настоящее время имеются следующие видеокассеты.

“Механика”. *Продолжительность записи* – 2 часа 15 мин. Количество экспериментов – 59. *Тематика*: кинематика, динамика, динамика твердого тела, неинерциальные системы отсчета, законы сохранения, колебания.

“Механика сплошных сред”. *Продолжительность записи* – 2 часа 45 мин. Количество экспериментов – 63. На этой кассете собрано большинство опытов, описанных в данном пособии. Список демонстраций с указанием продолжительности каждой приведен ниже.

“Молекулярная физика”. *Продолжительность записи* – 2 часа 58 мин. Количество экспериментов – 71. *Тематика*: основы молекулярно-кинетической теории, явления переноса в газах (вязкость, теплопроводность, диффузия), реальные газы и жидкости, теплота и работа, тепловые двигатели, поверхностные и капиллярные явления, фазовые переходы, свойства твердых тел.

“Электричество и магнетизм”. *Продолжительность записи* – 2 часа 35 мин. Количество экспериментов – 100. *Тематика*: элементарная электростатика, электростатика проводников, емкость, проводники и диэлектрики во внешнем электрическом поле, основные механизмы создания ЭДС, зависимость сопротивления от температуры, электрический ток в различных средах, самостоятельный разряд в газах, электрический ток в жидкостях, основы магнитостатики, движение зарядов в магнитном поле, явление электромагнитной индукции, токи Фуко, магнитные свойства сред, трансформаторы, высокочастотные токи, магнитное поле Земли, электромагнитные волны.

“Подготовительный курс”. Сборная кассета, содержащая избранные эксперименты по курсу физики в рамках школьной программы. *Продолжительность записи* – 2 часа 58 мин. Количество экспериментов – 83. *Тематика*: кинематика и динамика материальной точки, законы сохранения в механике, механические колебания и волны, звук, основы термодинамики, явления переноса в газах, фазовые переходы, электростатика, постоянный электрический ток, основные механизмы создания ЭДС, магнитостатика, электромагнитная индукция, геометрическая оптика, волновая оптика (интерференция, дифракция, дисперсия, абберация, поляризация), лазеры.

Видеокассеты **“Механические колебания и волны”** и **“Оптика”** находятся в стадии подготовки.

Список лекционных экспериментов на видеокассете “МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД”

Название демонстрации	Время
Упругие свойства тел	
Закон Гука	0.01.00
Типы деформаций	0.02.30
Упругая и остаточная деформации	0.05.00
Стрела прогиба	0.06.40
Опыт Умова	0.17.00
Изменение поперечного сечения образца	0.18.40
Зависимость упругих свойств от температуры	0.20.00
Зависимость упругих свойств от времени воздействия	0.20.00
Среда Максвелла и среда Кельвина-Фохта	0.24.30
Гидро- и аэростатика	
<i>Закон Паскаля</i>	
Сосуд с манометрическими трубками	0.27.20
Давление внутри жидкости	0.28.45
Шар Паскаля	0.30.45
Гидравлический пресс	0.33.00
<i>Сжимаемость жидкости</i>	
Пьезометр Вайнгольда	0.37.45
Искра в жидкости	0.40.30
<i>Давление жидкости на стенки сосуда</i>	
Сосуд Мариотта	0.44.30
<i>Закон Архимеда</i>	
Ведро Архимеда	0.48.15
Гидростатическое взвешивание	0.50.25
Присасывание тела ко дну сосуда	0.53.10
Давление жидкости во вращающемся сосуде	0.55.00
<i>Плавание тел</i>	
Картезианский водолаз	0.59.30
Остойчивость. Метацентрическая высота	1.02.55
Непотопляемость корабля	1.05.45
<i>Атмосферное давление</i>	
Опыт Торричелли. Измерение атмосферного давления	1.08.00
Магдебургские полушария	1.15.20
Раздавливание банки атмосферным давлением	1.17.20
Переворачивание стакана с водой	1.18.50
Перекачка воды под колоколом насоса	1.20.00
Зависимость давления от высоты	1.21.30
Подъем пузырей с газом	1.23.20
Газовый сифон	1.24.00
Гидро- и аэродинамика	
<i>Ламинарное и турбулентное течения жидкости.</i>	
Прибор Поля-Колбанова	1.28.50
Ламинарное течение (“Фазовая память”)	1.32.00

<i>Уравнение Бернулли</i>	
Трубка с сужениями	1.35.00
Сирена Клемана-Дезорма	1.37.50
Парение шарика в струе газа	1.39.15
Втягивающее действие струи газа	1.40.30
Втягивающее действие струи жидкости	1.41.20
Пульверизатор и водоструйный насос	1.42.40
<i>Статическое и динамическое давление в потоке жидкости и газа</i>	
Трубка Пито и трубка Прандтля	1.45.40
Сифон, не требующий засасывания	1.48.30
Гидравлический удар (пластиковая бутылка)	1.50.00
Гидравлический удар (откупоривание бутылки)	1.51.20
<i>Эффект Магнуса</i>	
Модель судна Флетнера	1.52.30
Скатывание лёгких цилиндров с наклонной плоскости	1.54.25
Полёт вращающегося цилиндра (“мёртвая петля”)	1.56.35
Диск Рэлея	1.57.15
Явление подсосывания	1.58.35
<i>Течение вязкой жидкости</i>	
Падение давления вдоль трубы	2.00.10
Распределение скоростей по сечению потока	2.02.10
<i>Вихри</i>	
“Смерч” в воронке с водой	2.04.45
“Смерч”, возбуждаемый магнитной мешалкой	2.06.40
Дымовые кольца	2.09.55
<i>Физические основы авиации</i>	
Обтекание тел. Прибор Поля-Колбанова	2.13.00
Возникновение подъемной силы крыла	2.19.50
Опыты с аэродинамической трубой	2.21.40
Модель вертолета. Авторотация	2.33.15
Дополнительные опыты	
Деформация висящего тела	2.35.00
Фонтан из отверстия в дне сосуда, погруженного в воду	2.35.40
Простреливание сосуда	2.36.30
Опыт Торричелли	2.38.25
Гидравлический удар	2.42.00
Сегнерово колесо	2.43.25
Полукольцевые вихри у поверхности жидкости (по Гельмгольцу, “весло”)	2.44.05
<i>Конец записи</i>	2.45.30

Подробные списки демонстраций, содержащихся на других видеокассетах, а также другую информацию можно получить в Кабинете физических демонстраций физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

Адрес: 119899, Москва, Воробьевы горы, МГУ, физический факультет, КОФ, КФД.
Тел. 939-11-19, факс 939-14-89, e-mail video@genphys.phys.msu.su