

Майер В.В.

**Капли. Струи.
Звук. Учебные
исследования**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 535
ББК 22.34
М 14

Майер В.В. **Капли. Струи. Звук. Учебные исследования.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 376 с. — ISBN 978-5-9221-0910-9.

В книге представлены учебные исследования физических свойств капель и струй жидкости, в той или иной степени относящиеся ко всем разделам школьного курса физики: механике, молекулярной физике, электродинамике, оптике и квантовой физике. Описаны учебные эксперименты по воздействию звука на струи жидкости и газа, а также по гидродинамической и термодинамической генерации звука. Приведены краткие исторические сведения, дана элементарная теория, обсуждены возможности практического применения рассмотренных явлений. Подробно изложены конструкции физических приборов и экспериментальных установок. Даны рекомендации по постановке опытов, обсуждены различные варианты экспериментов. Все опыты доступны и могут быть поставлены учащимися в школьном физическом кабинете или в домашних условиях.

Для учащихся и преподавателей физики средней и высшей школы, руководителей физических и технических кружков, а также для самообразования.

ISBN 978-5-9221-0910-9

© ФИЗМАТЛИТ, 2008

© В. В. Майер, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Глава 1. Капли и поверхностное натяжение	9
1.1. Простейшая модель отрыва капель от капилляра	9
1.2. Капля, наползающая на капилляр	13
1.3. Зависимость поверхностного натяжения от температуры	16
1.4. Неустойчивость равновесия капли	17
1.5. Капля, падающая из капилляра	19
1.6. Плоская капля на несмачиваемой поверхности	23
1.7. Коэффициент поверхностного натяжения расплавленного металла	26
1.8. Капля между двумя пластинками стекла	28
1.9. Почему не бывает крупных капель дождя?	30
1.10. Капля на поверхности жидкости	34
1.11. Опыты с ложкой бульона	37
Глава 2. Лежащие, колеблющиеся и прыгающие капли	43
2.1. Опыты с моделью капли из детского воздушного шарика	43
2.2. Водяной шарик в стеклянной банке	50
2.3. Капля на пластинке, покрытой копотью	52
2.4. Колебания капли	54
2.5. Капля на паровой подушке	57
2.6. Пленочное кипение жидкости	60
2.7. Поверхностная энергия капли	65
2.8. Капля, прыгнувшая в невесомость	67
2.9. Скорость подпрыгнувшей капли	69
2.10. Измерение скорости подпрыгнувшей капли	71
2.11. Демонстрация внезапного перехода капли в невесомость	73
Глава 3. Капли и электрическое поле	77
3.1. Заряд капли и поверхностное натяжение	77
3.2. Электромеханические автоколебания капли	80
3.3. Фонтан в электрическом поле	83
3.4. Движение заряженных капель	87
3.5. Капли, растущие на ионах	89
3.6. Непрерывная электризация через влияние	91

3.7. Электростатический генератор Кельвина	95
3.8. Несколько опытов с генератором Кельвина	97
Глава 4. Игра отраженного каплями света.	104
4.1. Отражение света от капли.	104
4.2. Экспериментальное исследование отражения света от капли	107
4.3. Компьютерное моделирование отражения света от капли	111
4.4. Ковер из одинаковых капель	115
4.5. Искусственная радуга	117
4.6. Модель грозового дождя	119
4.7. Колебания падающей капли.	123
Глава 5. Световые волны и капли.	128
5.1. Преломление света сферической каплей.	128
5.2. Линза из капли стекла	130
5.3. Микроскоп Левенгука	132
5.4. Микроскоп из стеклянного шарика	134
5.5. Цвета капли скипидара на поверхности воды.	136
5.6. Интерференция на растекающейся капле	137
5.7. Форма сечения растекающейся капли	141
5.8. Рассеяние белого света на каплях тумана	143
5.9. Дифракционные венцы	145
5.10. Демонстрация дифракции света на каплях тумана	149
Глава 6. Струи жидкости	155
6.1. Автоматический сифон	155
6.2. Автоколебательный сифон.	158
6.3. Автоколебания стеклянной трубки.	160
6.4. Реакция вытекающей и втекающей струй	163
6.5. Ракета на парах спирта	166
6.6. «Послушный» фонтан из стеклянной трубки	169
6.7. Уравнение Бернулли	172
6.8. Когда не выполняется уравнение Бернулли	175
6.9. Пересекающиеся струи	177
6.10. Взаимодействие струй, направленных навстречу	178
6.11. Липкая струя, или эффект Коанда.	181
6.12. Струйный усилитель сигнала.	183
6.13. Струйный генератор колебаний	185
6.14. Струи, стянутые жидкой пленкой	187
Глава 7. Гидродинамический излучатель звука	191
7.1. Жидкостный свисток.	191
7.2. Клиновидный тон	194

7.3. Автоколебания в потоке воздуха	195
7.4. Модель жидкостного свистка	198
7.5. Применение жидкостного свистка для получения эмульсии	200
7.6. Конденсаторный частотомер	202
7.7. Измерение частоты звука	204
7.8. Еще один конденсаторный частотомер	207
7.9. Измерение скорости звука	210
Глава 8. Струя жидкости и звук	214
8.1. Струя воды в воздухе	214
8.2. Струйный автогенератор звука	216
8.3. Электронный генератор звука	218
8.4. Рекомендации относительно электронных схем	221
8.5. Еще один электронный генератор звука	224
8.6. Как звук влияет на струю воды	226
8.7. Струйный усилитель звука	230
Глава 9. Стробоскопические наблюдения струй и капль	234
9.1. Наблюдение струи с помощью электромеханического стробоскопа	234
9.2. Импульсная лампа и импульсный трансформатор	236
9.3. Релаксационный генератор	240
9.4. Электронный стробоскоп на импульсной лампе	244
9.5. Еще один электронный стробоскоп на импульсной лампе	247
9.6. Электронные стробоскопы на светодиодах	249
9.7. Первые опыты с электронным стробоскопом	251
9.8. Измерение частоты вспышек электронного стробоскопа	252
9.9. Порошковые фигуры	254
9.10. Измерение частоты методом порошковых фигур	256
9.11. Наблюдение распада струи с помощью электронного стробоскопа	258
9.12. Как сделать распадающуюся струю видимой многим	264
Глава 10. Волны на поверхности жидкости	267
10.1. Гармоническая волна на поверхности жидкости	267
10.2. Гравитационно-капиллярная волна	270
10.3. Скорость распространения волны на поверхности жидкости	272
10.4. Глубина, на которую проникает волна	275
10.5. Отрицательное ускорение свободного падения	277
10.6. Вытекание жидкости из сосудов без дна	280
10.7. Неустойчивость Рэлея–Тейлора	283

Глава 11. Капиллярные волны на струе	287
11.1. Капиллярные волны на струе.	287
11.2. Дисперсия капиллярной волны	289
11.3. Возмущение, задаваемое отверстием сопла	293
11.4. Неустойчивость жидкого цилиндра	295
11.5. Почему жидкий цилиндр распадается на капли?	297
11.6. Распад цилиндрического пузыря	299
11.7. Водяные пузыри в керосине.	300
11.8. Простейшая теория распада жидкого цилиндра на капли	303
11.9. Еще один опыт с распадающейся струей	307
Глава 12. Чувствительное пламя	312
12.1. Наблюдение Леконта	312
12.2. Бесчувственное пламя	314
12.3. Строение газовой струи.	315
12.4. Установка для моделирования струи газа	316
12.5. Исчезающая окраска	319
12.6. Строение жидкой струи.	321
12.7. Установка для получения чувствительного пламени	323
12.8. Чувствительное пламя.	324
12.9. Чувствительная жидкость	326
12.10. Несколько опытов с ламинарными и турбулентными струями жидкости	329
Глава 13. Тепловой автогенератор звука	337
13.1. Конструкция теплового автогенератора	338
13.2. Почему звучит труба Рийке?	342
13.3. Труба Рийке как автоколебательная система	344
13.4. Экспериментальная проверка следствий теории	346
13.5. Обратная связь в тепловом автогенераторе.	350
13.6. Возбуждение трубы Рийке на второй гармонике.	351
13.7. Тепловые колебания спирали	353
13.8. Мощный тепловой автогенератор.	356
13.9. Еще раз о механизме тепловых автоколебаний.	359
13.10. Радиоприемник прямого усиления	361
13.11. Труба Рийке и регенеративный радиоприемник	364
Заключение.	369
Список литературы	370

«Школьник понимает физический опыт только тогда хорошо, когда он его делает сам. Но еще лучше он понимает его, если сам делает прибор для эксперимента.»

П. Л. Капица

Предисловие

Основная задача книги — побудить вас к постановке простых физических опытов, раскрывающих сущность явлений, с которыми вы многократно встречаетесь в жизни, но зачастую не обращаете на них особого внимания. В самом деле, знаете ли вы, что распад на капли струи воды, вытекающей из плохо прикрытого водопроводного крана, был исследован такими выдающимися физиками, как Джон Рэлей и Нильс Бор? Известно ли вам, что пламя бытовой газовой горелки, на котором вы каждое утро кипятите воду, длительное время являлось одним из самых совершенных индикаторов звуковых волн и сыграло заметную роль в экспериментальной акустике? Задумывались ли вы над тем, что изучение свиста ветра в проводах позволило создать целую серию физических приборов и среди них, например, жидкостный ультразвуковой свисток? Отдаете ли вы себе отчет в том, что гудение пламени в печи относится к явлениям вибрационного горения топлива и термической генерации звука? Наконец, сознаете ли вы, что все эти обыденные явления интенсивно исследуются на новом уровне современной физикой и находят широкое применение на практике?

Риторические вопросы тем и хороши, что не требуют ответов. Но если говорить всерьез, то школьник начала XXI века, конечно, должен иметь хотя бы самые общие представления об окружающих его физических явлениях: мир выглядит совсем иначе в глазах тех, кто смотрит на него с должным пониманием. О перечисленных выше явлениях можно занимательно рассказать, как это умеют делать популяризаторы науки. Однако есть и другой путь: нацелить читателя на более или менее самостоятельные учебные исследования, позволяющие ему достаточно

глубоко вникнуть в физическую сущность отобранных для изучения явлений. Этот второй путь и выбран в книге.

Книга состоит из тринадцати глав, сильно отличающихся друг от друга способом изложения и объемом. Разумеется, эти отличия ни в коей мере не характеризуют научную и практическую значимость рассматриваемых в главах явлений: они определяются только возможностью постановки простых, доступных и достаточно впечатляющих опытов, составляющих основу учебных экспериментальных исследований.

Содержание глав сгруппировано в параграфы, подавляющее большинство которых разбито на две части. В первой, как правило, сообщается некоторая информация и в явном или неявном виде формулируется задание. Во второй части параграфа приводится изложение результата выполнения задания. Сделано это с той целью, чтобы вы имели возможность приостановиться, обдумать ситуацию, попытаться решить проблему самостоятельно и затем сравнить полученный вами результат с тем, который приведен в параграфе. Такой метод работы с книгой, при котором вы вступаете с ней в активный диалог, наверное, близок к оптимальному. Конечно, сказанное не исключает возможности обычного чтения, которое тоже способно дать эффект, если вы будете не просто читать, а поставите хотя бы некоторые из описанных опытов. Список использованной и рекомендованной для изучения литературы приведен в конце книги. Ссылки на нее даются, как это общепринято, в квадратных скобках.

Фактический материал книги получен семинаром «Учебный эксперимент по физике», который был организован в Глазовском государственном педагогическом институте им. В. Г. Короленко в 1970 году и, непрерывно трансформируясь, функционирует до сих пор. Школьники, студенты, лаборанты и преподаватели делали физические приборы, собирали экспериментальные установки, ставили опыты и обсуждали их результаты. Многие из описанных ниже опытов в различных вариантах воспроизводились за эти годы десятки раз. Нам приятно здесь вспомнить и поблагодарить Р. В. Акатова, Е. И. Вараксину, Л. В. Вафина, О. Э. Вернера, Ю. В. Иванова, Л. С. Кропачеву, С. Н. Кычкина, Р. В. Майера, Е. С. Мамаеву, А. С. Рудина, В. А. Саранина, Р. Е. Шафиро и других членов семинара, чей труд способствовал созданию книги. Автор весьма признателен также редактору книги Д. А. Миртовой за многолетнее и плодотворное сотрудничество.

Глава 1

КАПЛИ И ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Из школьного курса физики вы хорошо знаете, что поверхность жидкости по своим физическим свойствам сильно отличается от жидкости, находящейся в глубине. Дело в том, что в глубине каждая молекула со всех сторон окружена другими, и силы, действующие на нее со стороны соседних молекул, взаимно скомпенсированы. Молекула, находящаяся на поверхности, взаимодействует с молекулами газа и пара, находящимися по одну сторону от поверхности, и с молекулами жидкости, расположенными по другую. Поэтому на молекулу поверхности действует результирующая сила, направленная внутрь жидкости. Если поверхность растянуть, то из глубины жидкости должны выйти молекулы, обеспечивающие это растяжение. Поэтому увеличение площади поверхности жидкости требует совершения работы. Отсюда следует, что поверхность жидкости обладает потенциальной энергией. При уменьшении площади поверхности эта энергия выделяется. В определенном смысле поверхность жидкости подобна растянутой резиновой пленке, поэтому описанные свойства поверхности называют *поверхностным натяжением*. Отношение поверхностной энергии к площади поверхности для данной жидкости есть величина постоянная и называется *коэффициентом поверхностного натяжения*. Поверхность жидкости, обладающая кривизной, оказывает на жидкость дополнительное давление, которое называется *капиллярным* или *лапласовым*. Благодаря поверхностному натяжению, например, медленно вытекающая из трубки жидкость приобретает форму капли. Жидкие капли — удивительный объект природы, с которым связано множество интересных явлений. Для этой главы отобраны те из них, которые позволяют определить коэффициент поверхностного натяжения разными методами и исследовать влияние поверхностного натяжения на явления образования и распада различных капель.

1.1. Простейшая модель отрыва капель от капилляра

- В основу одного из методов измерения коэффициента поверхностного натяжения жидкости положено явление отрыва капли от капилляра. Этот метод настолько прост и доступен,

что используется даже в школьном физическом практикуме [101, с. 87–90]. Суть его *теоретической модели* заключается в следующем.

Пусть на нижнем конце расположенной вертикально тонкой трубки (*капилляра*) постепенно вырастает капля жидкости (рис. 1.1). На каплю массой m действуют сила тяжести $F_t = mg$ и сила поверхностного натяжения $F_n = \sigma \pi D$, где σ — коэффициент поверхностного натяжения, D — диаметр контура, к которому приложена сила поверхностного натяжения. Капля отрывается от капилляра в тот момент, когда эти силы по модулю равны $F_t = F_n$, или $mg = \sigma \pi D$. Следовательно, коэффициент поверхностного натяжения

$$\sigma = \frac{mg}{\pi D}. \quad (1.1)$$

Зная массу капли m и диаметр контура D , можно по формуле (1.1) вычислить коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Наша задача заключается в том, чтобы определить границы применимости этой модели.

Понятно, что явление отрыва капли от капилляра существенно зависит от степени смачивания капилляра жидкостью.

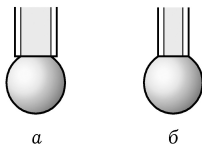


Рис. 1.1. Модель отрыва капли в случае несмачиваемого (а) и смачиваемого (б) капилляра

Поэтому, если жидкость не смачивает капилляр (рис. 1.1 а), то за диаметр контура отрыва D казалось бы можно принять внутренний диаметр капилляра, а если жидкость смачивает капилляр, — то внешний (рис. 1.1 б).

Исследуйте рассмотренный метод определения коэффициента поверхностного натяжения. В качестве жидкости естественно использовать воду. Смачиваемыми капиллярами могут быть стеклянные и стальные трубки разных диаметров. Весьма удобны стальные иглы от медицинских шприцев, концы которых в таком случае нужно аккуратно сточить тонким надфилем под прямым углом к оси иглы. Слабо смачиваются водой полиэтиленовые капилляры, которые нетрудно изготовить, например, из отработанных стержней шариковых ручек. Напомним, что коэффициент поверхностного натяжения сильно зависит от примесей, поэтому в опытах следует использовать чистую водопроводную воду и хорошо вымытые чистые трубки. Выполнив исследование, сделайте заключение о границах применимости простейшей модели явления отрыва капли от капилляра.

● Измерения в экспериментах со *смачиваемыми* капиллярами и расчеты по формуле (1.1), где D — *внешний* диаметр капилляра, приведут к неожиданному результату: ни в одном случае не удастся получить верное значение коэффициента поверхностного натяжения воды! Если вы внимательны, то догадались, что причина этого заключается в своеобразном поведении капли: она формируется не под, а над нижним концом смачиваемого капилляра и, только достигнув определенного размера, стекает вниз и отрывается (рис. 1.2).

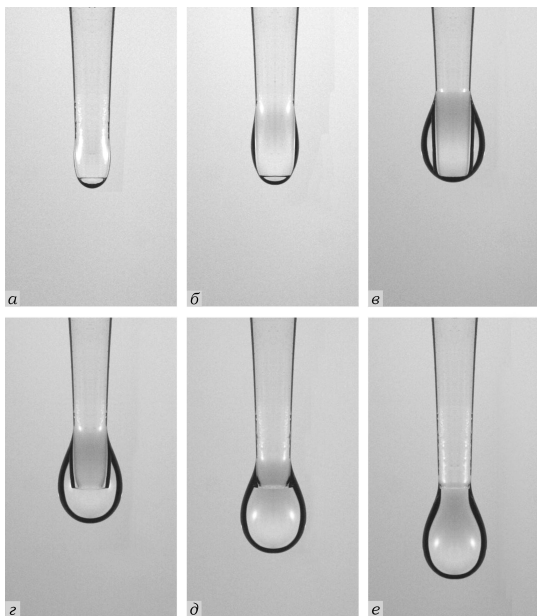


Рис. 1.2. Последовательные стадии образования и отрыва капли воды на оттянутом, как у пипетки, конце тонкой стеклянной трубки: *а-в* — сначала капля наползает на внешнюю стенку трубки; *г-е* — капля стекает с трубки и отрывается

Для *несмачиваемых* капилляров из полиэтилена в качестве D нужно брать *внутренний* диаметр трубки. Выполните измерения с разными по диаметру отверстия полиэтиленовыми капиллярами в одних и тех же условиях и по формуле (1.1) вычислите коэффициент поверхностного натяжения воды. Вместо ожидаемого постоянного значения, которое на графике (рис. 1.3) обозначено штриховой линией, вы получите серию значений (сплошная линия), которая показывает, что коэффициент поверхностного натяжения воды с ростом диаметра капилляра будто бы уменьшается!

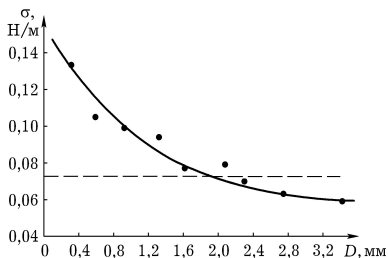


Рис. 1.3. Значения коэффициента поверхностного натяжения, получающиеся для полиэтиленовых капилляров различных диаметров

Это свидетельствует о том, что простейшая модель отрыва капле от несмачиваемого капилляра, вообще говоря, не соответствует действительности. Вода частично смачивает полиэтилен, поэтому при небольших диаметрах капилляра диаметр контура отрыва D больше, чем диаметр отверстия капилляра, и расчет по формуле (1.1) дает завышенные значения коэффициента поверхностного натяжения. При больших диаметрах капилляра, напротив, D несколько меньше диаметра отверстия капилляра (см. ниже § 1.4), поэтому, согласно формуле (1.1), получаются заниженные значения коэффициента поверхностного натяжения воды. Лишь при диаметре отверстия несмачиваемого капилляра в пределах примерно 1,5–2,5 мм расчетный коэффициент поверхностного натяжения воды наиболее близок к истинному значению.

Таким образом, простейшая физическая модель отрыва капли воды от капилляра применима в случае несмачиваемого капилляра внутренним диаметром 1,5–2,5 мм. При меньших диаметрах частичное смачивание капилляра, которое неизбежно имеет

место, ведет к увеличению эффективного диаметра контура отрыва капли, который не учитывается и поэтому приводит к завышенным значениям коэффициента поверхностного натяжения. При больших диаметрах капилляра простейшая модель неприменима вообще.

Отсюда следует, что в школьном эксперименте целесообразно использовать несмачиваемые полиэтиленовые трубки внутренним диаметром около 2 мм, например, от стержней шариковых ручек. При этом коэффициент поверхностного натяжения воды получается с погрешностью, не превышающей 1–2 %. Использование чистых стальных и стеклянных капилляров любых диаметров в принципе не позволяет получить верный результат, оставаясь в рамках простейшей модели явления. Разумеется, если в опытах применяется загрязненная стеклянная трубка, плохо смачиваемая водой, то для нее справедливо все то, что сказано о полиэтиленовых трубках.

1.2. Капля, наползающая на капилляр

● Привычно думать, что если капля вытекает из какой-нибудь трубки, то она обязательно стекает вниз. Однако это происходит не всегда так. В определенных условиях капля не опускается вниз по трубке, а поднимается по ней. Порой возникает впечатление, что она вначале как бы «запрыгивает» на трубку, а затем сползает вниз и отрывается.

Это явление нетрудно воспроизвести даже у себя дома. Для опыта не требуется сложного оборудования, достаточно простой стеклянной пипетки с узким концом, которая наверняка у каждого имеется в домашней аптечке.

Наблюдение описанного эффекта возможно только с чистой пипеткой. Снимите со стеклянного наконечника пипетки резиновый колпачок и промойте обе части пипетки теплой водой со стиральным порошком или мылом, затем прополощите их в проточной воде под вытекающей из крана струей. Так же тщательно надо промыть блюдце или другой невысокий сосуд. В чистое блюдце налейте чистую воду, соберите пипетку и положите ее в блюдце так, чтобы стеклянный наконечник оказался в воде, а резиновый колпачок выступал за край блюдца.

В пипетку наберите воду, поднимите пипетку над блюдцем и расположите вертикально так, чтобы отверстие стеклянного наконечника было обращено вниз. Медленно выдавливайте из пипетки воду и наблюдайте за поведением вытекающей жидкости. Вы обнаружите, что капля растет не вниз, а вверх по пипетке (см. рис. 1.2)! Увеличьте скорость вытекания воды — образующаяся капля подскочит вверх и окажется пронзенной

стеклянной трубкой! Типичные стадии образования и отрыва капли представлены на рис. 1.4.

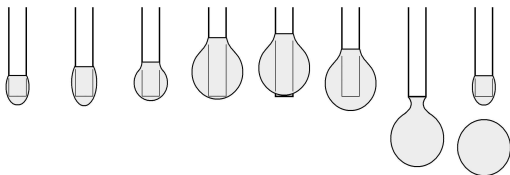


Рис. 1.4. Схематическое изображение процесса образования и отрыва капли на конце стеклянной трубки

Попробуйте видоизменить опыт: вместо стеклянной пипетки возьмите стальную иглу от одноразовых шприцев и мелким напильником сточите ее конец под прямым углом. Промойте ее так же, как это было сделано со стеклянной пипеткой. Наберите в шприц воду, наденьте иглу на шприц и начинайте медленно давить на поршень шприца. Вы вновь увидите подпрыгивающую каплю. В этот момент прекратите давить на поршень и внимательно присмотритесь к капле. Вы опять заметите, что она оказалась как бы пронзенной концом иглы (рис. 1.5).

● Чем же объяснить подобное поведение капель? Как известно, чистые стекло и сталь хорошо смачиваются водой. Поэтому при попадании воды на конец стеклянной или стальной трубки на ее внешней поверхности образуется тонкая водяная пленка. Поступающая к отверстию трубки вода, благодаря силам поверхностного натяжения, натекает на ее внешнюю поверхность, образуя на трубке жидкий цилиндр, высота которого ограничена силой тяжести. Однако цилиндр жидкости неустойчив (см. ниже гл. 11) и стремится приобрести форму, при которой жидкость имеет наименьшую площадь поверхности, то есть близкую к сферической. Этот процесс протекает настолько быстро, что наблюдателю кажется, будто формирующаяся на конце трубки капля прыгает вверх по трубке и пронзается ее концом. Достигнув максимального размера, капля стекает вниз и отрывается от трубки. В момент, когда капля начинает двигаться вниз, сила тяжести, действующая на жидкость, уравновешивается только силами поверхностного натяжения, действующими по круговой линии соприкосновения поверхности жидкости с трубкой.

В опытах вы обнаружите, что наиболее близка к сферической форма капель воды, отрывающихся от трубок с внешним диаметром меньше двух миллиметров. Именно такие трубки принято считать капиллярами.

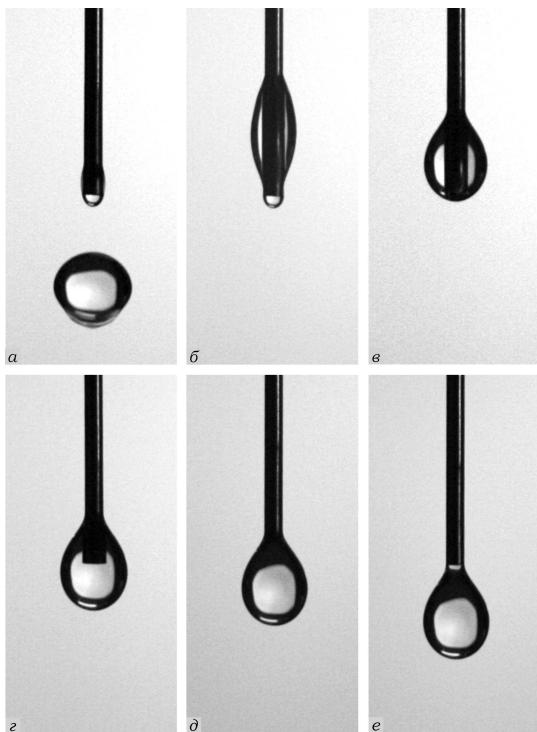


Рис. 1.5. Образование и отрыв капли на конце стального капилляра: *а* — после отрыва капли на капилляр сразу же наползает следующая; *б* — капля оказывается пронзенной капилляром; *в-е* — капля постепенно стекает вниз и затем отрывается

1.3. Зависимость поверхностного натяжения от температуры

● Не надо думать, что метод определения коэффициента поверхностного натяжения с помощью модели отрыва капле совершенно никуда не годен. Это далеко не так. В физике любое явление представляет интерес и любому явлению всегда найдется достойное применение. В полиэтиленовый медицинский шприц, отверстие которого имеет диаметр около 2 мм, наберите воду. Расположив шприц вертикально, медленно давите на его поршень так, чтобы из отверстия шприца капала вода со скоростью, позволяющей сосчитать число капель (рис. 1.6). Взяв за основу описанный опыт, исследуйте зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры.



Рис. 1.6. Еще один опыт по определению коэффициента поверхностного натяжения жидкости

● Поскольку в эксперименте используется несмачиваемый водой полиэтиленовый капилляр оптимального диаметра, допустимо применение простейшей модели отрыва капле (см. § 1.1). Диаметр капилляра можно измерить штангенциркулем, по глубине погружения в отверстие капилляра узкой клиновидной полоски. Массу одной капли нетрудно определить, сосчитав число оторвавшихся от капилляра капле и зная суммарный их объем по величине перемещения поршня шприца. Тогда искомый коэффициент поверхностного натяжения согласно формуле (1.1):

$$\sigma = \frac{mg}{\pi D} = \frac{\rho V g}{\pi D N}, \quad (1.2)$$

где ρ — плотность воды, V — объем вытекшей жидкости, g — ускорение свободного падения, D — диаметр капилляра, N — число капле, суммарный объем которых равен V .

Чтобы найти зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры, достаточно в стакане вскипятить воду, погрузить в нее термометр и, пока вода остывает, выполнить измерения для различных температур. У вас получится график, подобный представленному на рис. 1.7. Из него видно, что

с ростом температуры коэффициент поверхностного натяжения воды уменьшается.

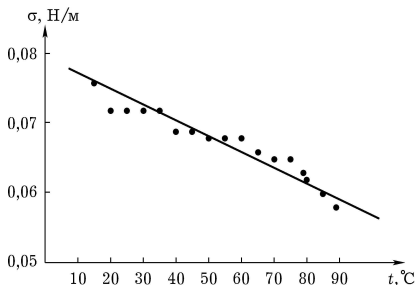


Рис. 1.7. График зависимости коэффициента поверхностного натяжения воды от температуры

1.4. Неустойчивость равновесия капли

● Стекланную трубку с внутренним и внешним диаметром примерно 3 и 5 мм соответственно тщательно обезжирьте, вымыв в теплой воде с подходящим моющим средством, и ополоскивайте проточной водой до тех пор, пока не исчезнут следы этого средства. Трубку резиновым шлангом с зажимом соедините с сосудом, заполненным водой и поднятым на высоту около полуметра от конца трубки. Отрегулируйте зажим так, чтобы на конце трубки медленно росли и периодически отрывались от него капли воды. Внимательно наблюдайте за процессом.

Вы заметите, что начиная с некоторого момента, растущая капля не может остаться на конце трубки и обязательно срывается с него (рис. 1.8). Если подачу воды прекратить до этого момента, то капля остается висеть на трубке. Но капля, выросшая до размера, превышающего критический, обязательно оторвется от трубки, даже если вода в нее больше не поступает.

Очевидно, состояние капли перед ее отрывом является *неустойчивым*. При этом капля фактически не отрывается от трубки, а разрывается водяной перешеек, соединяющий выросшую каплю с трубкой. В результате капля падает вниз, на конце трубки остается выпуклый мениск, из которого вырастает новая капля, а между ним и падающей каплей образуется маленькая капелька.

Ясно, что для определения коэффициента поверхностного натяжения уже нельзя использовать формулу (1.1), поскольку совершенно непонятно, какое значение диаметра D следует использовать.

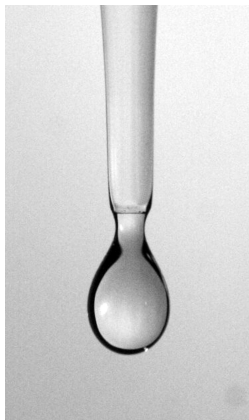


Рис. 1.8. Капля, висятая на конце тонкой стеклянной трубки, перед моментом отрыва

Но можно ли вообще в этом случае пользоваться простейшей моделью явления отрыва капель от капилляра? Предложите способ, который позволяет это сделать.

● Метод отрыва капель с успехом можно использовать не в абсолютных, а в *относительных измерениях* коэффициента поверхностного натяжения жидкостей. Например, вам нужно экспериментально установить зависимость коэффициента поверхностного натяжения σ воды от температуры (§ 1.3). Вы берете табличное значение σ_0 для определенной температуры t_0 и по формуле (1.1) вычислите эффективное значение диаметра капилляра

$$D^* = \frac{m_0 g}{\pi \sigma_0}.$$

Теперь для измерения коэффициента поверхностного натяжения при другом значении температуры нужно использовать формулу (1.1), в которой вместо диаметра капилляра D взято вычисленное эффективное его значение D^* :

$$\sigma = \frac{m g}{\pi D^*} = \frac{m}{m_0} \sigma_0. \quad (1.3)$$

Подобными приемами любят пользоваться медики [136, с. 67–74]. Они применяют специальный прибор, называемый *сталагмометром* (от греческого *stálagma* — капля). Основным элементом сталагмометра является стеклянная трубка с расширением в середине и двумя рисками, обозначающими определенный объем жидкости (рис. 1.9). На верхний конец трубки надета резиновая груша. Нижний конец трубки представляет собой тонкий капилляр, перпендикулярно которому расположена хорошо отшлифованная площадка.

Работают с этим прибором следующим образом. Вначале стагмометр тщательно промывают исследуемой жидкостью, несколько раз набирая и выпуская ее из прибора так, чтобы жидкость не попала в грушу. Затем исследуемую жидкость набирают в таком количестве, чтобы ее мениск оказался выше верхней метки и дают возможность жидкости свободно вытекать из отверстия капилляра. Когда мениск совпадет с верхней меткой, начинают счет капель. Счет капель прекращают, когда мениск совпадет с нижней меткой.

Далее стагмометр тщательно промывают эталонной жидкостью, в качестве которой обычно используют дистиллированную воду, и вновь считают количество капель, которое дает такой же объем эталонной жидкости, как исследуемой. Коэффициент поверхностного натяжения исследуемой жидкости определяют по формуле

$$\sigma = \frac{\rho N_0}{\rho_0 N} \sigma_0, \quad (1.4)$$

где индексом 0 обозначены плотность, коэффициент поверхностного натяжения и число капель эталонной жидкости, а без индекса указаны те же величины исследуемой жидкости.

Выведите формулу (1.4) самостоятельно. Изготовьте простейший стагмометр из медицинского шприца и сравните между собой коэффициенты поверхностного натяжения различных жидкостей.

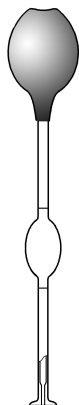


Рис. 1.9. Конструкция стагмометра

1.5. Капля, падающая из капилляра

● Исследование образования капель при вытекании воды из тонких несмачиваемых капилляров позволит вам пронаблюдать удивительное по красоте явление: капля на конце такого капилляра растет не постепенно, а скачкообразно, внезапно падает из капилляра!

Можно выделить несколько основных этапов формирования капли. На первом этапе под действием гидростатического давления поверхность воды на нижнем конце капилляра искривляется, возникает еле заметный бугорок, со временем увеличивающийся в размерах (рис. 1.10 а). При этом радиус его кривизны посте-

ленно уменьшается, что приводит к увеличению *лапласовского давления*. Рост «бугорка» происходит до тех пор, пока образующая его жидкость не достигнет неустойчивого состояния.

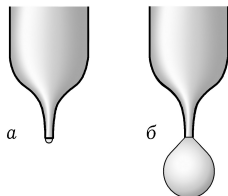


Рис. 1.10. Схематическое изображение процесса образования капли воды на конце несмачиваемого капилляра

С этого момента можно выделить второй этап формирования капли, при котором капля из неустойчивой переходит в устойчивую форму. Он протекает достаточно быстро, поэтому проследить отдельные его моменты невооруженным глазом невозможно. По окончании второго этапа капля приобретает привычную ей форму (рис. 1.10 б). Последний этап формирования капли — это ее рост на нижнем конце капилляра, после чего происходит отрыв капли. Таким образом, формирование капли проходит этапы устойчивого, неустойчивого, и вновь устойчивого роста.

Разработайте и соберите экспериментальную установку для исследования описанного явления.

- Для опытов потребуются слабо смачиваемые водой полиэтиленовые капилляры с отверстиями диаметром порядка 0,1–0,2 мм. Такие капилляры с малым внутренним диаметром без особого труда вы сможете изготовить из полиэтиленовых стержней от шариковых ручек. Лучше всего использовать тонкостенные стержни. Чистый стержень, вращая вокруг оси, нагревают над пламенем свечи на расстоянии 2–3 см от пламени. Для получения более качественных капилляров желательно, чтобы размер нагретой части стержня не превышал 5 мм. В момент, когда нагретая часть стержня становится прозрачной и начинает утолщаться, стержень убирают от пламени и начинают растягивать его до тех пор, пока не достигнут нужной толщины капилляра. Капилляр образуется в виде тонкого перешейка. После полного затвердевания полиэтилена получившийся тонкий перешеек разрезают острым лезвием.

Наблюдения и демонстрации лучше проводить в проекции явления на экран (рис. 1.11). С этой целью используют любой диапроектор, объектив которого заменяют $8\times$ собирающей линзой. В специальном держателе закрепляют стеклянную пипетку, на оттянутый конец которой насаживают полиэтиленовый капилляр. Держатель жестко крепят на диапроекторе, что обеспечивает компактность и мобильность всей установки. Стеклянную пипетку соединяют резиновым шлангом с сосудом, наполненным водой. Скорость вытекания воды регулируют краном.

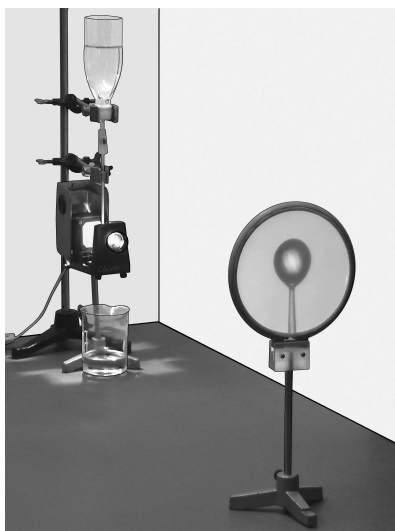


Рис. 1.11. Экспериментальная установка для демонстрации капли, падающей из капилляра

Демонстрацию проводят следующим образом. Поворачивая кран, добиваются чтобы скорость вытекания капель была равна примерно одной капле в секунду. Затем плавно уменьшают скорость вытекания капель. При малой скорости вытекания жидкости опыт выглядит наиболее эффектно. Проекционный аппарат

включают после того, как будет полностью настроена экспериментальная установка. На рис. 1.12 приведена серия фотографий, показывающая последовательные стадии роста и отрыва капли воды от тонкого капилляра.

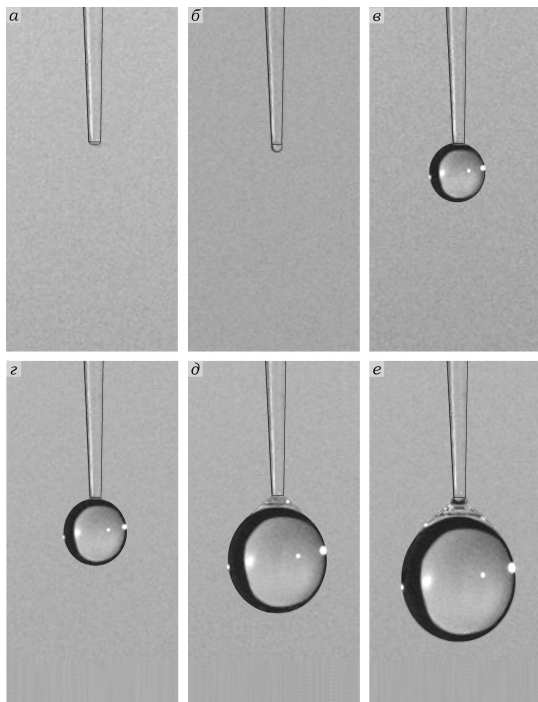


Рис. 1.12. Последовательные стадии образования и отрыва капли воды на конце тонкой трубки, несмачиваемой водой. Время между моментами, соответствующими фотографиям *a*–*г*, значительно меньше, чем между моментами, соответствующими снимкам *г*–*е*: сначала капля растет очень быстро, а затем медленно

1.6. Плоская капля на несмачиваемой поверхности

• Для определения коэффициента поверхностного натяжения воды достаточно измерить диаметр крупной плоской капли известного объема, находящейся на несмачиваемой поверхности. Требуемую каплю нетрудно получить, выдавливая из отградуированного баллона медицинского шприца воду на слегка вогнутую поверхность, покрытую копотью.

Для опыта необходимо самое доступное оборудование. В первую очередь подберите металлическую банку (например, из-под кофе) диаметром не менее 75 мм с плоским слегка вогнутым дном. Удобна также металлическая крышка, применяемая для консервирования. Далее приготовьте свечу, спички, стакан с водой и медицинский шприц объемом 20 мл с делениями.

Внешнюю поверхность дна металлической банки над пламенем свечи покройте слоем копоти. Банку поставьте на горизонтальную поверхность. Наберите в шприц воду, направив его вверх, удалите воздушный пузырек и установите поршень шприца так, чтобы он находился против определенного деления шкалы. Слегка надавливая на поршень, выдавите на закопченную поверхность небольшую каплю воды. Подкладывая под стенки кусочки бумаги, отрегулируйте положение банки так, чтобы капля оказалась в центре дна. Выдавите из шприца такую порцию воды, чтобы на слое копоти получилась крупная круглая капля объемом не менее 5 мл с плоской верхней поверхностью. На рис. 1.13 показано, как можно получить большую плоскую каплю воды на покрытой копотью металлической крышке. Объем капли определите, отметив начальное и конечное положения поршня шприца. Линейкой измерьте диаметр получившейся капли (рис. 1.14). По полученным в опыте данным вычислите коэффициент поверхностного натяжения воды.

• Мы уже говорили, что искривленная поверхность за счет сил поверхностного натяжения создает в жидкости дополнительное давление. Нетрудно показать, что величина этого дополнительного *капиллярного* или *лапласова* давления определяется формулой [109, с. 441–444]:

$$p_{\text{л}} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1.5)$$

где R_1 и R_2 — радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных *нормальных сечений* поверхности жидкости (нормальными называются такие сечения, которые проходят через нормаль или перпендикуляр к поверхности).

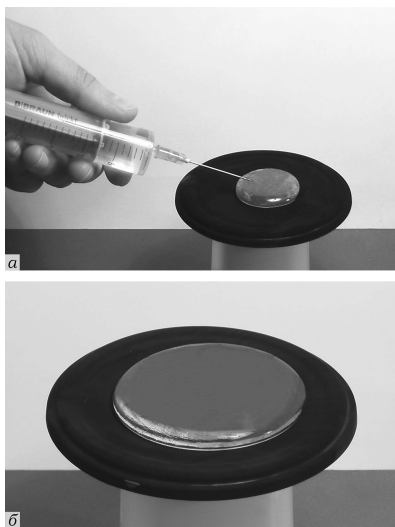


Рис. 1.13. Получение большой плоской капли воды на несмачиваемой поверхности, покрытой копотью: *а* — нанесение капли воды посредством медицинского шприца; *б* — получившаяся плоская капля

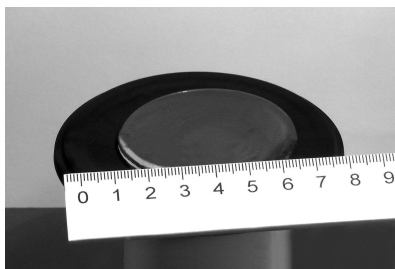


Рис. 1.14. Определение коэффициента поверхностного натяжения воды методом плоской капли

Если капля достаточно велика и находится на несмачиваемой плоскости, то в первом приближении можно считать ее плоской. Обозначим высоту капли буквой h (рис. 1.15). Нормаль в крайней точке капли к ее боковой поверхности совпадает с радиусом, идущим из центра капли. Мысленно проведем через эту нормаль в качестве взаимно перпендикулярных сечений горизонтальную и вертикальную плоскости. Обозначив радиусы кривизны боковой поверхности капли в этих сечениях буквами R и r соответственно, перепишем формулу (1.5) в виде

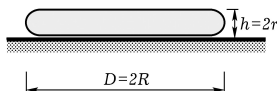


Рис. 1.15. К выводу формулы для вычисления коэффициента поверхностного натяжения

$$p_{\text{л}} = \sigma \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right).$$

Для тонкой капли приближенно можно считать, что ее толщина $h = 2r$. Учитывая, что в условиях опыта R значительно превышает r , лапласово давление посередине боковой поверхности капли будет определяться величиной $p_{\text{л}} = \sigma/r = 2\sigma/h$. Оно уравнивается гидростатическим давлением на глубине, равной половине толщины капли, $p_r = \rho gh/2$. Отсюда

$$\frac{2\sigma}{h} = \rho g \frac{h}{2}$$

и коэффициент поверхностного натяжения

$$\sigma = \frac{\rho gh^2}{4}. \quad (1.6)$$

Высоту капли h лучше не измерять, а вычислить ее по объему. Так как объем капли приближенно равен $V = \pi D^2 h/4$, то расчетная формула принимает вид

$$\sigma = \frac{\rho gh^2}{4} = \frac{4\rho gV^2}{\pi^2 D^4}. \quad (1.7)$$

В одном из наших опытов диаметр плоской капли объемом $V = 10 \text{ см}^3$ оказался равным $D = 48 \text{ мм}$. Подставляя эти данные в формулу (1.7), получаем, что с учетом погрешности коэффициент поверхностного натяжения воды $\sigma = (7,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$. Напомним, что его табличное значение $\sigma_{\text{табл}} = 7,3 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$.

В заключение рекомендуем самостоятельно оценить погрешность определения коэффициента поверхностного натяжения воды рассмотренным здесь методом.

1.7. Коэффициент поверхностного натяжения расплавленного металла

● Для определения коэффициента поверхностного натяжения расплавленного металла, очевидно, можно использовать рассмотренный в предыдущем параграфе метод капли, лежащей на несмачиваемой плоской поверхности.

В подходящей металлической баночке расплавьте, например, свинец и тонкой струйкой вылейте металл на ровную поверхность дюралевой пластинки. У вас должна получиться круглая капля расплавленного свинца. Можно дюралевую пластинку поместить на электроплитку, хорошо разогреть и затем положить на пластинку кусок свинца, добившись его расплавления. Аккуратно снимите пластинку с каплей расплавленного свинца и дайте ей затвердеть. Наконец, можно хорошо разогретым паяльником расплавить кусок свинца на ровной деревянной пластинке.

Полученную тем или иным способом затвердевшую каплю свинца внимательно рассмотрите, сравнивая ее с каплями воды на несмачиваемой поверхности. Штангенциркулем (рис. 1.16)



Рис. 1.16. К опыту по определению коэффициента поверхностного натяжения расплавленного металла

измерьте толщину h застывшей капли свинца и по формуле (1.6) вычислите коэффициент поверхностного натяжения свинца. Табличное значение плотности свинца $\rho = 11 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, а в одном из наших опытов получилось $h = 3,2 \text{ мм}$. Подстановка этих значений в формулу (1.6) дает $\sigma = 0,276 \text{ Н/м}$, в то время как табличное значение этой величины почти в два раза больше $\sigma = 0,44 \text{ Н/м}$.

Выясните причину столь значительного расхождения. Найдите способ более точного определения коэффициента поверхностного натяжения расплавленного металла.

● Дело в том, что капля свинца, как это следует из наблюдений, несимметрична относительно горизонтальной плоскости, проходящей через середину ее высоты, а формула (1.6) выведена для симметричного случая. Поэтому нужна другая теоретическая модель явления.

На рис. 1.17 изображен разрез капли плоскостью, проходящей через ее ось симметрии, и введена декартова система координат xOy . Будем по-прежнему считать, что радиус капли в горизонтальном сечении значительно больше ее толщины, поэтому сила поверхностного натяжения определяется только радиусом

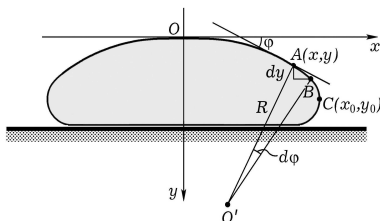


Рис. 1.17. К выводу формулы для определения коэффициента поверхностного натяжения методом лежащей на несмачиваемой поверхности капли

кривизны поверхности капли в плоскости рисунка. Так как капля находится в равновесии, то гидростатическое давление в произвольной точке $A(x, y)$ поверхности капли равно лапласову

$$\rho g y = \frac{\sigma}{R}, \quad (1.8)$$

где R — радиус кривизны в точке A поверхности.

Через точку A проведем касательную к поверхности и обозначим буквой φ угол между касательной и осью Ox . Перейдем из точки A в близко расположенную к ней точку B поверхности. При этом касательная и радиус кривизны повернутся на небольшой угол $d\varphi$, а координата y точки A получит приращение $dy = R d\varphi \cdot \sin \varphi$. Подставляя в эту формулу выражение для R из формулы (1.8), после небольших преобразований получаем дифференциальное уравнение

$$y dy = \frac{\sigma}{\rho g} \sin \varphi d\varphi.$$

Интегрируя это уравнение, имеем

$$\int_0^y y dy = \frac{\sigma}{\rho g} \int_0^\varphi \sin \varphi d\varphi.$$

Отсюда

$$\frac{y^2}{2} = \frac{\sigma}{\rho g} (1 - \cos \varphi).$$

В точке $C(x_0, y_0)$ на краю капли угол $\varphi = \pi/2$, поэтому $\cos \varphi = 0$ и коэффициент поверхностного натяжения

$$\sigma = \frac{\rho g y_0^2}{2}. \quad (1.9)$$

Теперь нужно научиться измерять величину y_0 . Если не стремиться к слишком большой точности, то сделать это можно с помощью штангенциркуля на глаз. У нас получилось, что $y_0 \approx 2,8$ мм. Подстановка этого значения в формулу (1.9) для коэффициента поверхностного натяжения свинца дает значение $\sigma = 0,42$ Н/м, достаточно близкое к табличному.

1.8. Капля между двумя пластинками стекла

- На пластинку оргстекла нанесите каплю воды и придавите ее сверху второй пластинкой оргстекла. Раздавленная капля образует круговой слой воды между пластинками (рис. 1.18). Разработайте метод, позволяющий использовать это явление для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкостей.

- Прежде всего ясно, что оргстекло в описанном опыте использовано потому, что оно плохо смачивается водой. Если бы пластинки хорошо смачивались, то капля воды растеклась бы по всему воздушному промежутку между пластинками. Раз пластинки не смачиваются, то капля воды между ними имеет такую же форму, что и большая капля, лежащая на несмачиваемой поверхности (см. § 1.6). Тогда, рассуждая по аналогии, имеем, что лапласовское давление на уровне половины толщины слоя компенсируется давлением, оказываемым верхней пластинкой:

$$\frac{\sigma}{r} = \frac{2\sigma}{h} = \frac{mg}{S}, \quad (1.10)$$

где m — масса верхней пластинки, S — площадь раздавленной капли (рис. 1.19). Так как толщина h раздавленной капли через ее объем V выражается соотношением $h = V/S$, а площадь

$S = \pi D^2/4$, где D — диаметр раздавленной капли, то коэффициент поверхностного натяжения

$$\sigma = \frac{mgh}{2S} = \frac{mgV}{2S^2} = 8 \frac{mgV}{\pi^2 D^4}. \quad (1.11)$$

Опыт можно провести в такой последовательности. Взвесив верхнюю пластинку на весах, определите ее массу m . Наберите

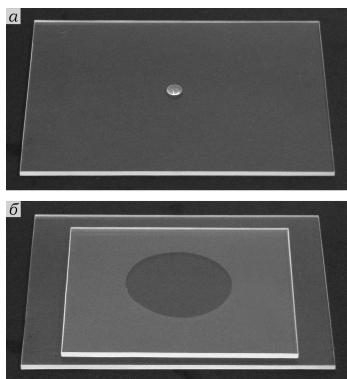


Рис. 1.18. Опыт по определению коэффициента поверхностного натяжения методом «раздавленной» капли: *a* — исходное состояние капли жидкости; *б* — капля, между двумя пластинками оргстекла

в шприц воду и, надавливая на поршень, считайте количество капель воды, которое заключено в определенном ее объеме. По полученным данным определите объем V одной капли. Нанесите каплю на нижнюю пластинку и аккуратно, не оказывая давления на нее, положите верхнюю пластину на каплю. Подождите несколько секунд, пока капля не перестанет растекаться. Измерьте диаметр D раздавленной капли. Подставив полученные значения в формулу (1.11), вычислите коэффициент поверхностного натяжения. Вы увидите, что он весьма далек от ожидаемого! В чем дело?

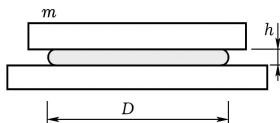


Рис. 1.19. К выводу формулы для определения коэффициента поверхностного натяжения методом раздавленной капли

В наших опытах масса верхней пластинки составила $m = 42,60$ г. При выдавливании из шприца воды объемом 2 мл получилось 40 капель. Значит, объем одной капли равен 50 мм^3 . Диаметр раздавленной капли получился равным 75 мм. Подстановка этих данных в формулу (1.11) дала $\sigma = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ Н/м}$, что более чем на два порядка ниже табличного значения $\sigma_{\text{табл}} = 7,3 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$!

Такой результат свидетельствует о том, что где-то допущена ошибка. Скорее всего неверно предположение, будто оргстекло не смачивается водой. Если допустить, что оргстекло частично смачивается водой, тогда радиус кривизны вертикального сечения раздавленной капли должен быть больше предполагаемого в данном методе. Так как $r > h/2$, то согласно формуле (1.10) возрастает площадь S раздавленной капли, а вычисленное значение коэффициента поверхностного натяжения σ уменьшается.

Для понижения смачивания мы покрыли пластинки оргстекла тонким слоем машинного масла. В проведенных после этого измерениях диаметр раздавленной капли воды оказался равным $D = 25$ мм и $\sigma = 0,043 \text{ Н/м}$. Полученный результат гораздо ближе к табличному значению. Поэтому предположение, что ошибка определения коэффициента поверхностного натяжения вызвана частичным смачиванием оргстекла водой, соответствует действительности. Если вы покроете пластинки стекла или оргстекла тонким слоем парафина, то методом раздавленной капли получите более точное значение коэффициента поверхностного натяжения.

1.9. Почему не бывает крупных капель дождя?

● Капли дождя никогда не бывают чрезмерно крупными. Ни на кого из вас не падали капли дождя диаметром, например, 10 мм. Но может быть такие большие капли не образуются в облаках? Тогда как объяснить, что во время грозы град иногда бывает гораздо крупнее, чем сопровождающий его дождь? Разве не могут градины, летя в жаркий день вниз, растаять и превратиться в большие капли? Но их не бывает! Остается допустить, что падающие в воздухе крупные капли воды долго не живут и в полете распадаются на более мелкие.

Чтобы пронаблюдать за падением больших капель воды, нужно сначала научиться получать такие капли. Самый простой способ состоит в следующем. Возьмите стакан с водой в руку и совершите рукой плавное движение по дуге окружности вверх, заканчивающееся небольшим резким опусканием стакана вниз. При этом через передний край стакана перельется вода

в виде своеобразной «колбаски», которая спустя мгновение приобретет форму почти сферической капли (рис. 1.20). Нужно потренироваться, чтобы научиться уверенно получать капли диаметром 20–40 мм. Лучше использовать слабо смачиваемый водой сосуд. Попробуйте, например, стеклянный стакан изнутри покрыть тонким слоем парафина.

По другому, несколько более сложному способу, для получения крупных капель возьмите кусок тонкой резины от детского надувного шарика, перекройте им отверстие водопроводного крана и, открыв кран, «выдуйте водой» шарик нужного диаметра. Скрутите резину возле отверстия крана и снимите получившийся шарик воды.

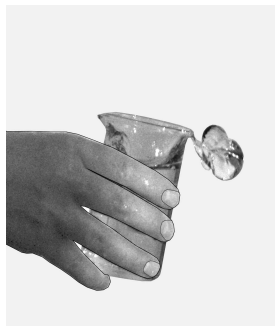


Рис. 1.20. Получение большой капли из стакана с водой

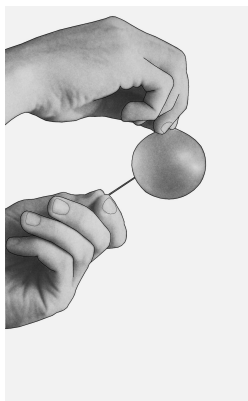


Рис. 1.21. Получение большой капли с помощью резинового шарика

Подняв шарик за резиновую скрутку, острой иглой резко проколите натянутую резиновую пленку (рис. 1.21). При этом нередко образуется хорошая крупная капля воды.

Тем или иным способом получите каплю воды диаметром 20–40 мм на высоте 5–6 м от поверхности Земли. Удобно это делать, сбрасывая крупные капли из окна второго этажа. Вы будете наблюдать, что капля падает как единое целое несколько метров и затем внезапно разрывается на мелкие капельки, образующие как бы горизонтальное кольцо вокруг траектории падения крупной капли! Опыт очень красив и получается в любом случае, если удалось изготовить каплю нужного размера на достаточной высоте от Земли.

На рис. 1.22 схематически показано, как распадается крупная капля на более мелкие. Несколько раз повторив опыт, вы убедитесь, что явление очень напоминает процесс образования вихревого кольца [120, 138]. Можно даже допустить, что из падающей крупной капли должно было бы образоваться вихревое кольцо (см. § 12.5), если бы кольцо воды в воздухе было устойчивым. То что такое кольцо должно быть неустойчивым, очевидно: даже струя воды в воздухе неустойчива и в конце концов распадается на капли.

● Теория описанного явления не может быть простой. Даже сам процесс обтекания сферического твердого тела воздухом имеет весьма сложный характер, который иллюстрируют фотографии, приведенные на рис. 1.23. Кроме того, в полете капля непрерывно изменяет свою форму, которая при установившемся движе-

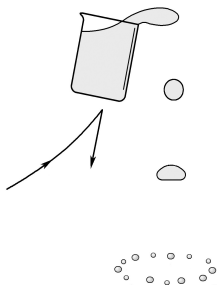


Рис. 1.22. Схематическое изображение получения большой капли и ее распад на мелкие

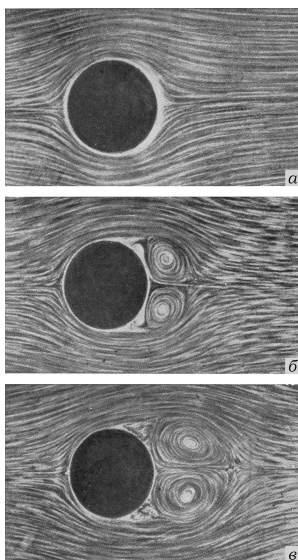


Рис. 1.23. Обтекание воздухом сферического твердого тела [70, с. 644–645]

нии даже сравнительно мелких капель далека от сферической (рис. 1.24). Заметим, что капли, падающие в воздухе с постоянной скоростью, очень напоминают капли, лежащие на несмачиваемой поверхности (см. § 2.3). Наконец, обтекающий каплю воз-

дух увлекает за собой поверхностный слой жидкости, что вызывает появление внутри капли вихревых течений, также вносящих свой вклад в разрыв капли.

Попробуем все же хотя бы грубо оценить расстояние, проходимое каплей воды в воздухе от места ее образования до распада. Допустим, что сферическая капля разрывается в тот момент, когда давление, обусловленное лобовым сопротивлением летящей капли, становится равным давлению, создаваемому силами поверхностного натяжения. В статье И. Ш. Слободецкого «О форме дождевой капли» [111] получены выражения для обоих давлений.

Давление, созданное силой лобового сопротивления, пропорционально кинетической энергии единицы объема воздуха, в котором падает капля, $p = C\rho v^2$. Коэффициент лобового сопротивления C зависит от формы движущегося тела и так называемого числа Рейнольдса $Re = lv\rho/\mu$, где l — характерный размер тела, v — скорость потока, ρ — плотность, μ — коэффициент вязкости газа [119, с. 282–283]. В условиях наших опытов коэффициент лобового сопротивления шара можно принять равным $C = 0,2$. Лапласовское давление в сферической капле $p_\lambda = 2\sigma/R$. Приравнявая его к давлению, вызванному лобовым сопротивлением, имеем

$$\frac{2\sigma}{R} = 0,2\rho v^2, \quad (1.12)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения воды, R — радиус капли, ρ — плотность воздуха, v — скорость движения капли. Отсюда максимальное расстояние, проходимое падающей

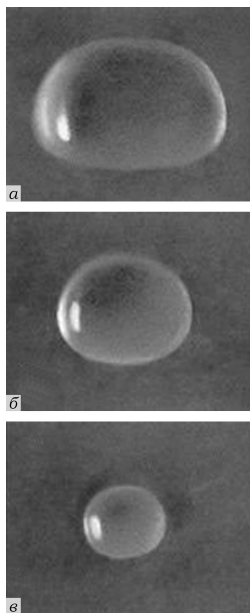


Рис. 1.24. Мгновенные фотографии падающих дождевых капель: а — диаметр капли $d = 6$ мм, скорость $v = 8,8$ м/с; б — $d = 4,8$ мм, $v = 8,3$ м/с; в — $d = 2,8$ мм, $v = 6,8$ м/с [111]

капель до момента разрыва

$$h = \frac{v^2}{2g} = 5 \frac{\sigma}{g\rho R}. \quad (1.13)$$

Подставляя в эту формулу числовые значения $\sigma = 7,28 \times 10^{-2}$ Н/м, $g = 9,8$ м/с², $\rho = 1,29$ кг/м³, $R = 10^{-2}$ м, получаем, что капля воды диаметром 20 мм распадается на более мелкие капли, пройдя в воздухе расстояние около 2,9 м.

Мы получили разумную величину, хотя «вывод» формулы (1.13) вряд ли можно назвать строгим. Стоило ли тогда вообще записывать эту формулу? Известно, что многие начинающие испытывают чувство неудовлетворенности, когда узнают, что казалось бы строгая физическая теория не точно описывает явления. Поэтому имеет смысл вдуматься в слова, сказанные академиком М. А. Лаврентьевым по поводу сходных с рассмотренным в статье явлений и, быть может, скорректировать свою точку зрения на физические теории.

«...Большинство интересных физических процессов столь сложно, что при современном состоянии науки очень редко удается создавать их универсальную теорию, действующую во все время и на всех участках рассматриваемого процесса. Вместо этого нужно посредством экспериментов и наблюдений постараться понять ведущие факторы, которые в тот или иной отрезок времени управляют процессом на том или ином участке. Выделив эти факторы, следует абстрагироваться от других, менее существенных, и для данного участка и данного отрезка времени построить возможно более простую математическую схему (модель процесса), которая учитывает лишь выделенные факторы» [75, с. 7].

Недостатком описанного выше опыта по распаду падающей капли воды является то, что от момента образования до распада капля должна пролететь около 3 м. С такой каплей эффектный опыт по распаду в классе показать не удастся. Как быть?

Из формулы (1.13) следует, что наиболее эффективный способ уменьшения высоты падения h капли до ее распада заключается в уменьшении коэффициента поверхностного натяжения жидкости. Попробуйте с этой целью размешать в воде немного моющего средства. Может быть, вам больше понравится использовать 40%-й водный раствор спирта, в котором растворено хозяйственное мыло. Подобными способами мы уменьшали высоту падения, достаточную для распада крупной капли, до 1,5–2 метров. При этом появилась возможность демонстрации явления в школьной лаборатории.

1.10. Капля на поверхности жидкости

● Пожалуй, самые интересные явления в жидкости происходят на ее поверхности, там, где она граничит со своим паром, с другой какой-нибудь жидкостью или с твердым телом.

Поверхностный слой жидкости находится в особых условиях по сравнению с остальной массой жидкости и потому отличается особыми свойствами. Прежде всего, это — поверхностное натяжение. С ним связаны многочисленные явления, из которых нас интересует сейчас растекание одной жидкости по поверхности другой.

Пусть на поверхности одной жидкости плавает капля другой. Понятно, что это может быть только в том случае, когда плотность первой жидкости больше, чем второй, и жидкости несмешивающиеся, то есть не растворяющиеся одна в другой. Такой парой жидкостей являются, например, вода и масло, поэтому для краткости дальше будем говорить о каплях масла, плавающих на поверхности воды.

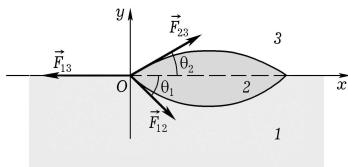


Рис. 1.25. Равновесие капли масла на поверхности воды

Прежде всего выясним, при каких условиях капля масла может находиться на поверхности воды, не растекаясь [62, с. 329–331]. В равновесии потенциальная энергия системы должна быть минимальной. В нашем случае минимум должна иметь поверхностная энергия капли масла. Поэтому естественно допущение, что обе поверхности плавающей на воде капли масла сферические. Иными словами, мы предполагаем, что форма капли напоминает чечевицу.

Итак, пусть на поверхности жидкости 1 (воды) лежит капля жидкости 2 (масла), причем сверху находится среда 3 — смесь воздуха с парами жидкостей 1 и 2 (рис. 1.25). Три среды 1, 2 и 3 соприкасаются по окружности, ограничивающей каплю.

Вблизи начала координат O выделим малый элемент этой окружности Δl . На него действуют три силы поверхностного натяжения. На границе раздела жидкостей 1 и 2 действует сила $\vec{F}_{12}$, направленная по касательной к границе раздела и равная по модулю

$$|\vec{F}_{12}| = \sigma_{12}\Delta l,$$

где σ_{12} — коэффициент поверхностного натяжения на границе сред 1 и 2. Аналогичные силы $\vec{F}_{13}$ и $\vec{F}_{23}$ действуют на границах

раздела сред 1, 3 и 2, 3:

$$|\vec{F}_{13}| = \sigma_{13}\Delta l \quad \text{и} \quad |\vec{F}_{23}| = \sigma_{23}\Delta l.$$

Здесь σ_{13} и σ_{23} — соответствующие коэффициенты поверхностного натяжения. Очевидно, что капля будет находиться в равновесии, если сумма всех трех сил равна нулю:

$$\vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23} = 0, \quad (1.14)$$

или в проекциях на оси координат x и y :

$$F_{13} = F_{12} \cos \theta_1 + F_{23} \cos \theta_2, \quad 0 = F_{23} \sin \theta_2 - F_{12} \sin \theta_1.$$

После подстановки значений модулей сил и сокращения на Δl получаем соотношения между коэффициентами поверхностного натяжения

$$\sigma_{13} = \sigma_{12} \cos \theta_1 + \sigma_{23} \cos \theta_2, \quad 0 = \sigma_{23} \sin \theta_2 - \sigma_{12} \sin \theta_1. \quad (1.15)$$

Здесь θ_1 и θ_2 — углы между касательными к поверхности капли жидкости 2 и поверхностью жидкости 1, их называют *краевыми углами*.

Прежде, чем читать дальше, попробуйте вначале самостоятельно найти выражение для угла $\theta = \theta_1 + \theta_2$ между касательными к поверхностям капли в точке O , лежащей на ее круглой границе. Проанализируйте условия равновесия капли на поверхности несмешивающейся с ней жидкости.

● Из тригонометрии известно, что $\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \sin \beta$, поэтому для решения поставленной задачи можно равенства (1.15) возвести в квадрат и затем сложить. Тогда после небольших преобразований получается *условие равновесия*:

$$\sigma_{13}^2 = \sigma_{23}^2 + \sigma_{12}^2 + 2\sigma_{23}\sigma_{12} \cos \theta. \quad (1.16)$$

Из равенства (1.16) видно, что равновесие капли возможно в том случае, если коэффициенты поверхностного натяжения связаны следующим неравенством:

$$\sigma_{13} \leq \sigma_{12} + \sigma_{23}. \quad (1.17)$$

Поскольку поверхностные явления в жидкости мало зависят от присутствия над жидкостью газообразной среды, практически можно считать, что коэффициенты поверхностного натяжения жидкостей 1 и 2 соответственно равны $\sigma_1 = \sigma_{13}$ и $\sigma_2 = \sigma_{23}$.

Таким образом, капля масла будет плавать на поверхности воды, не растекаясь, если коэффициент поверхностного натя-

жения воды не больше суммы коэффициентов поверхностного натяжения масла и границы раздела вода–масло:

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 + \sigma_{12}. \quad (1.18)$$

В частном случае, когда капля очень тонкая (почти плоская), углы θ_1 , и θ_2 малы ($\theta_1 = \theta_2 = 0$, следовательно, $\theta = \theta_1 + \theta_2 = 0$), и условие равновесия капли (1.16) имеет вид

$$\sigma_1 = \sigma_2 + \sigma_{12}.$$

При

$$\sigma_1 > \sigma_2 + \sigma_{12}$$

не существует значений углов θ_1 и θ_2 , для которых выполнялось бы равенство (1.14). Это означает, что в таком случае жидкость 2 не собирается в каплю на поверхности жидкости 1, а растекается по ней тонким слоем.

Способность жидкости 2 растекаться по поверхности жидкости 1 можно характеризовать *коэффициентом растекания*

$$s = \sigma_{13} - (\sigma_{23} + \sigma_{12}) = \sigma_1 - (\sigma_2 + \sigma_{12}), \quad (1.19)$$

который показывает, насколько уменьшается поверхностная энергия единицы площади поверхности одной жидкости при растекании по ней другой жидкости. Если коэффициент растекания для второй жидкости на поверхности первой отрицателен, то эта вторая жидкость не растекается, а плавает на поверхности первой в виде устойчивых капель [139, с. 797–798].

1.11. Опыты с ложкой бульона

- Набрав ложку крепкого мясного бульона посмотрите на него внимательно — на его поверхности плавают крупные капельки жира. Заметьте размер этих капелек. Отлейте немного бульона из ложки обратно в тарелку и опять посмотрите на его поверхность — капельки жира расплзлись, став больше в диаметре и меньше по толщине. Чем объясняется это интересное явление? Капли жира плавают на поверхности бульона, значит, выполняется соотношение (1.17). Почему же при уменьшении бульона в ложке капли расплываются по его поверхности, увеличиваясь в размерах? Что при этом изменяется? В серии экспериментов выясните, что происходит с тонкими каплями жира или масла на поверхности воды.

- Для ответа на поставленные вопросы используем результаты предыдущего параграфа. В опыте коэффициенты поверхностного натяжения жира σ_2 и границы раздела бульон–жир σ_{12}