



Санкт-Петербургский  
государственный  
университет

Научный парк



*Образовательный ресурсный центр по направлению физика  
Первая физическая лаборатория*

**Е.Л. Лебедева**

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ**

**Учебно-методическое пособие  
(описание лабораторной работы)**

**№ 15**

Санкт-Петербург

2014

УДК 532.61.08

*Рецензенты:* д. ф.-м. н., профессор С.В. Карпов, д. ф.-м. н., профессор И.Ч. Машек, к. ф.-м. н. Ю.С. Манучаров

Рекомендовано к печати Ученым советом физического факультета СПбГУ (выписка из протокола № 11 заседания Ученого совета физического факультета СПбГУ от 15.10.2013 г.).

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов СПбГУ младших курсов естественно-научных направлений обучения, а также может быть полезно учащимся и преподавателям средних и средне-специальных учебных заведений.

Лабораторная работа выполняется на оборудовании Образовательного ресурсного центра по направлению физика Научного парка СПбГУ (<http://researchpark.spbu.ru>).

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1. Некоторые вопросы теории поверхностного натяжения и явления, с ним связанные.....	5
1.1. Поверхностное натяжение .....	5
1.2. Поверхностное натяжение с энергетической точки зрения .....	7
1.3. Силы поверхностного натяжения.....	8
1.4. Давление под изогнутой поверхностью жидкости.....	11
1.5. Явления на границе жидкости и твердого тела. Смачивание .....	12
1.6. Капиллярные явления .....	13
1.7. Зависимость поверхностного натяжения от температуры .....	13
2. Методика проведения эксперимента .....	15
2.1. Описание экспериментальной установки .....	15
2.2. Постановка эксперимента. Методика и техника измерений.....	17
4. Порядок выполнения лабораторной работы.....	20
5. Обработка результатов эксперимента, требования к оформлению отчета .....	23
6. Контрольные вопросы.....	24
Список рекомендованной литературы и справочные данные .....	25
Приложение 1. Табличные данные .....	26
Приложение 2. Описание рефрактометра.....	28

## Введение

В процессе выполнения данной работы мы знакомимся с явлением поверхностного натяжения жидкости. Поверхностное натяжение (ПН) обусловлено различием в свойствах объема жидкости и ее границы. С поверхностным натяжением связаны такие явления как образование капель, капиллярные явления, смачивание, давление под изогнутой поверхностью жидкости. Мы сталкиваемся с этим явлением при надувании мыльных пузырей, наблюдая рябь на поверхности воды, плавание на поверхности воды иголки или бритвы и т.д. — маленькие объекты с плотностью, большей плотности жидкости, способны «плавать» на поверхности жидкости, так как сила тяготения меньше силы, препятствующей увеличению площади жидкости.

В соответствии с многочисленными проявлениями ПН в природе существуют различные методы его измерения, например:

1. метод поднятия жидкости в капилляре;
  2. метод отрыва кольца;
  3. метод счета капель;
  4. метод максимального давления пузырька;
  5. метод осциллирующей струи;
  6. метод стоячих волн
- и другие.

В данной работе ставится задача измерить коэффициент поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца, а также исследовать его зависимость от концентрации растворенных веществ и температуры. В качестве объектов исследования выбираются вода и растворы спирта в ней.

# 1. Некоторые вопросы теории поверхностного натяжения и явления, с ним связанные

## 1.1. Поверхностное натяжение

Поверхностное натяжение является важнейшей характеристикой поверхности раздела двух фаз (жидкость — твердое тело, жидкость — газ). Оно возникает на границе двух фаз и обусловлено различием межмолекулярного взаимодействия в этих фазах.

Жидкое состояние вещества характеризуется значительно меньшим расстоянием между молекулами, чем в газе, действием сил притяжения между молекулами, обеспечивающим конденсированное состояние, и силами отталкивания, проявляющимися при объемном сжатии. Молекулярное движение частиц жидкости — это, в основном, колебательное движение частиц около среднего положения равновесия. Поступательное движение ограничивается перестановкой соседних частиц местами. Сила взаимодействия между молекулами  $F$  (рис. 2) складывается из сил отталкивания  $F_1$  и притяжения  $F_2$ . Эти силы на некотором расстоянии  $d$  становятся равными и при дальнейшем увеличении расстояния между молекулами убывают как  $r^{-12}$  и  $r^{-6}$

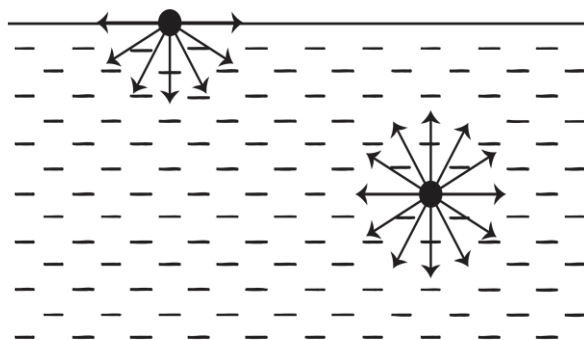


Рис. 1. Силы взаимодействия между молекулами на поверхности и внутри жидкости.

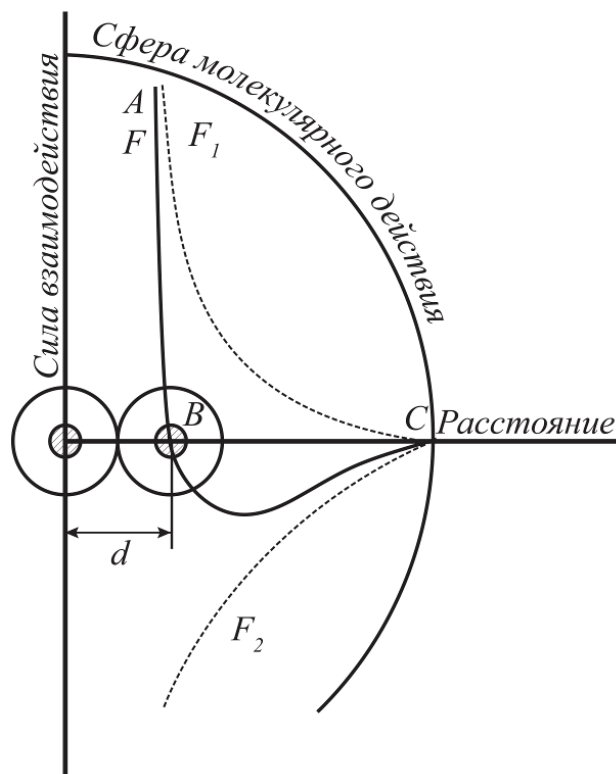


Рис. 2. Зависимость силы взаимодействия между молекулами от расстояния.

( $F_1$  и  $F_2$  соответственно). Поэтому можно считать, что каждая молекула взаимодействует только с теми частицами, которые лежат внутри сферы определенного радиуса — сферы молекулярного действия с центром в данной молекуле.

Наиболее интересной особенностью жидкостей является наличие свободной поверхности. Жидкость, в отличие от газов, не заполняет весь объем сосуда, в который она налита. Между жидкостью и газом образуется граница раздела, которая находится в особых условиях по сравнению с остальной массой жидкости. Если некоторая молекула находится внутри жидкости и удалена от ее поверхности на расстояние больше, чем сфера молекулярного действия, то силы притяжения, действующие на нее со сторон других молекул, взаимно компенсируются. Молекулы, расположенные вблизи поверхности, находятся в условиях, отличных от условий внутри объема: они имеют одинаковых с ними соседей лишь с трех сторон. Поэтому силы притяжения со стороны соседей не скомпенсированы, а значит, на нее действует результирующая сила, направленная внутрь жидкости перпендикулярно поверхности. Из-за этого молекула стремится перейти вглубь. Таким образом, поверхностный слой оказывает на всю жидкость давление, называемое молекулярным давлением (для воды, например, около  $1 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>). Под влиянием этого давления молекулы сближаются до появления уравновешивающих сил отталкивания.

Под действием молекулярного давления поверхность жидкости стремится уменьшиться, следовательно, при отсутствии внешних сил она принимает наименьшее возможное значение при данном объеме. Из всех тел заданного объема наименьшей площадью поверхности обладает шар — поэтому жидкость под действием только внутренних сил принимает форму шара. Также мы знаем, что в невесомости жидкость принимает форму шара. Наличие внешних сил, например, силы тяжести, приводит к изменению формы жидкости. В этом случае жидкость принимает форму, соответствующую минимуму *суммарной энергии* — энергии в поле сил тяготения и поверхностной энергии.

## 1.2. Поверхностное натяжение с энергетической точки зрения

Молекулы поверхностного слоя жидкости обладают избытком энергии по сравнению с молекулами, находящимися внутри жидкости. Разность между энергией всех молекул вблизи поверхности раздела и той энергией, которую эти молекулы имели бы, если бы они находились внутри тела, называется *поверхностной энергией*. Для увеличения поверхности жидкости надо перевести некоторое количество молекул из глубины на поверхность, т.е. совершить работу. Эта работа пропорциональна числу молекул, выходящих на поверхность, и, следовательно, пропорциональна увеличению площади поверхности. Пусть  $dA$  — работа, которую надо совершить, чтобы увеличить площадь поверхности жидкости на  $dS$  при постоянной температуре. Тогда

$$dA = \sigma dS. \quad (1)$$

Коэффициент  $\sigma$  называется *поверхностным натяжением*. Из (1) следует, что *поверхностное натяжение* равно работе, которую нужно совершить, чтобы увеличить поверхность жидкости на единицу при обратимом изотермическом процессе. Из термодинамики известно, что работа при обратимом изотермическом процессе равна изменению свободной энергии системы, т.е.

$$dA = d\Psi \quad (2)$$

(*свободная энергия* — та часть внутренней энергии системы, которая может быть превращена в работу, совершаемую системой против внешних сил при обратимом изотермическом процессе). При увеличении поверхности жидкости работа, совершаемая внешними силами, идет на увеличение свободной энергии поверхностного слоя. Из (1) и (2) следует, что увеличение свободной энергии поверхностного слоя равно

$$d\Psi = \sigma dS, \quad (3)$$

откуда свободная энергия  $\Psi = \sigma S$ , где  $S$  — площадь поверхности жидкости.

Таким образом, *поверхностное натяжение* можно также определить как свободную энергию единицы поверхности жидкости. При постоянной температуре система стремится к состоянию с минимальной свободной энергией.

Этот минимум свободной энергии достигается, как это следует из (3), при минимальной поверхности жидкости. *Поверхностное натяжение* жидкости можно определить как энергию, необходимую для разрыва единицы поверхности. С увеличением температуры величина поверхностного натяжения уменьшается и становится нулевой при критической температуре, подробнее этот вопрос обсуждается в пп. 1.7.

Следует обратить внимание и на другой физический смысл понятия поверхностного натяжения. Поверхностное натяжение можно характеризовать силой, направленной тангенциально (параллельно) к поверхности и приходящейся на единицу длины периметра, ограничивающего эту поверхность. Физическая сущность поверхностного натяжения в этом случае проявляется в том, что поверхностные молекулы, обладая избыточной (некомпенсированной) энергией, стремятся уйти вглубь конденсированной фазы и тем самым сжимают поверхность.

### 1.3. Силы поверхностного натяжения

Итак, на основании энергетических соображений мы приходим к выводу, что жидкость стремится к такому состоянию, при котором ее поверхность минимальна. Это, в свою очередь, означает, что должны существовать силы, стремящиеся сократить поверхность жидкости. Они называются *силами поверхностного натяжения*. Эти силы приложены к точкам линии, ограничивающей поверхность жидкости. Они направлены перпендикулярно к этой границе и по касательной к поверхности жидкости.

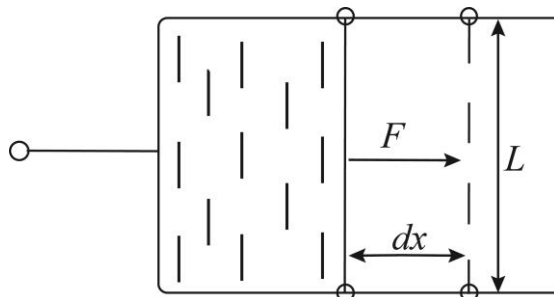


Рис. 3. Мыльная пленка, натянутая на рамку с подвижной перекладиной.

Определим величину силы поверхностного натяжения. Для этого затащим мыльной пленкой проволочную рамку (рис. 3), одна из сторон которой подвижна  $L$ . Силы поверхностного натяжения принуждают пленку сокращаться, и подвижная перекладина перемещается вслед за пленкой. Переместим пере-



кладину  $L$  на  $dx$ , прикладывая к ней внешнюю силу, которая направлена противоположно поверхностному натяжению, действующему на  $L$ , и превышает его на бесконечно малую величину. При этом над пленкой будет совершена работа против сил поверхностного натяжения, равная  $dA = -2F dx$ , где  $2F$  — сила поверхностного натяжения, действующая на две поверхности пленки. Площадь пленки увеличится на  $2dS = 2L dx$ , где  $L$  — длина перекладины,  $dS$  — увеличение одной поверхности пленки. Согласно (1), работа  $dA$  может быть представлена в виде

$$dA = -2\sigma dS = -2\sigma L dx. \quad (4)$$

Приравнивая оба выражения для работы, получим

$$\sigma = F / L. \quad (5)$$

Таким образом, коэффициент поверхностного натяжения численно равен силе, действующей на единицу длины контура, являющегося границей поверхности жидкости.

Размерность  $\sigma$  вытекает из его определения и может быть представлена в различных видах: энергия на единицу площади (Дж/м<sup>2</sup>) или сила на единицу длины (Н/м). Анализ размерностей показывает равнозначность этих единиц: Дж/м<sup>2</sup> = Н·м/м<sup>2</sup> = Н/м.

В отличие от упругих сил, силы поверхностного натяжения никак не изменяются по мере сокращения площади поверхности пленки, так как плотность жидкости, а, следовательно, и среднее расстояние между молекулами на поверхности, не меняется.

Поверхностное натяжение зависит от свойств самой жидкости, ее температуры, свойств среды, с которой граничит жидкость, а также от примесей. Вещества, снижающие поверхностное натяжение жидкости, называются *поверхностно-активными веществами* (ПАВ). Изменение поверхностного натяжения происходит благодаря адсорбции молекул ПАВ, то есть повышению их концентрации в поверхностном слое по сравнению с его концентрацией в объеме раствора. ПАВ характеризуется меньшим поверхностным натяжением, чем поверхностное натяжение растворителя (иначе накопление вещества в поверх-

ностном слое было бы термодинамически невыгодно) и малой растворимостью, так как при высокой растворимости молекулы ПАВ стремились бы уйти с поверхности вглубь раствора. Взаимодействие между молекулами ПАВ и молекулами растворителя всегда меньше взаимодействия между молекулами чистого растворителя, что приводит к выталкиванию молекул ПАВ из объема раствора на поверхность.

По отношению к воде поверхностно-активными являются многие органические соединения, например, жирные кислоты и их соли, спирты, амины. Характерной особенностью молекул большинства ПАВ является их дефиальность, т.е. молекула состоит из двух частей: полярной группы и неполярного углеводородного радикала. Будучи вытолкнутой на поверхность, такая молекула ориентируется в пространстве полярной частью к воде, неполярной — к неполярному воздуху. Чем больше поверхностных молекул воды заменится на молекулы ПАВ, тем больше снизится величина поверхностного натяжения раствора.

Общее количество вещества, которое вообще может закрепиться (адсорбироваться) на поверхности жидкости, очень мало, но даже ничтожные примеси ПАВ, скапливаясь на поверхности жидкости, могут существенно изменить ее поверхностное натяжение. Так, небольшие добавки мыла могут уменьшить поверхностное натяжение воды более чем в 3 раза.

Минимальное поверхностное натяжение имеет жидкий гелий на границе со своим паром — 3,5 мН/м (вблизи абсолютного нуля). У большинства веществ поверхностное натяжение колеблется от 10 до 2000 мН/м.

Значения коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  (в мН/м) для некоторых жидкостей при температуре 20°C (второй фазой является воздух) приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Жидкость	Вода	Желчь	Молоко	Спирт	Эфир	Ртуть	Золото (1130°C)
$\sigma \times 10^{-3}$ , Н/м	72,8	50,0	48,0	22,3	17,0	465,0	1100,0

## 1.4. Давление под изогнутой поверхностью жидкости

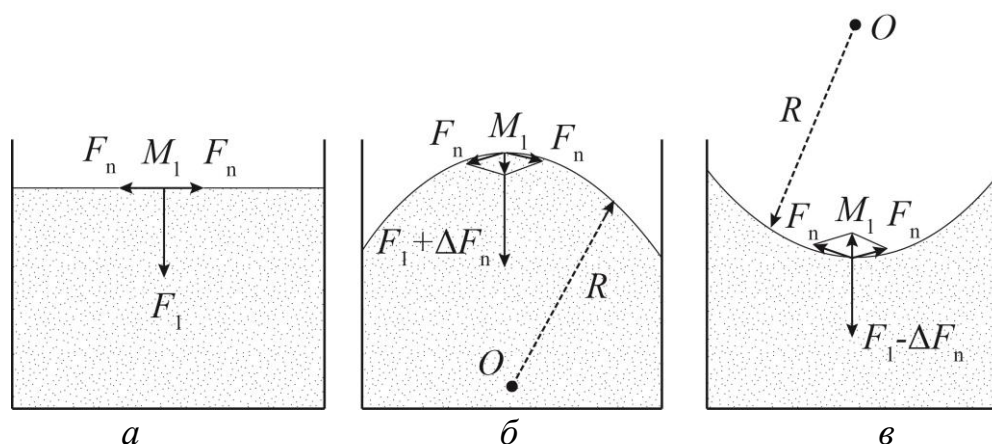


Рис. 4. Силы, создающие молекулярное давление под плоской (а), выпуклой (б) и вогнутой (в) поверхностями.

Если поверхность раздела фаз не плоская, то по обе стороны искривленной поверхности существует разность давлений, вызванная поверхностным натяжением. Это добавочное давление называется *поверхностным* или *капиллярным давлением*  $\Delta p$ .

Величина этого избыточного давления зависит от кривизны поверхности и определяется формулой Лапласа:

$$\Delta p = \sigma [1/R_1 + 1/R_2], \quad (6)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — главные радиусы кривизны поверхности.

Для разных поверхностей имеем следующие значения:

если  $R_1 = R_2 = \infty$  (плоская поверхность), то  $\Delta p = 0$ ,

если  $R_1 = R$ ,  $R_2 = R$  (сферическая), то  $\Delta p = 2\sigma/R$ ,

если  $R_1 = R$ ,  $R_2 = \infty$  (цилиндрическая), то  $\Delta p = \sigma/R$ .

Для плоской поверхности жидкости силы поверхностного натяжения не создают дополнительного давления: давление внутри жидкости равно внешнему давлению (рис. 4а). Для выпуклой поверхности (например, капля жидкости в воздухе): её стремление к уменьшению приводит к сжатию капли, и давление внутри жидкости оказывается больше давления окружающего воздуха (рис. 4б).

В случае вогнутой поверхности жидкости (пузырек газа в жидкости) давление внутри жидкости оказывается меньше, чем внутри газового пузырька (рис. 4в). Большим давлением под сферой меньшего радиуса объясняется кажущийся парадоксальный следующий эффект. При соединении двух мыльных пузырей разного радиуса больший пузырь начинает увеличиваться за счет меньшего (рис. 5).

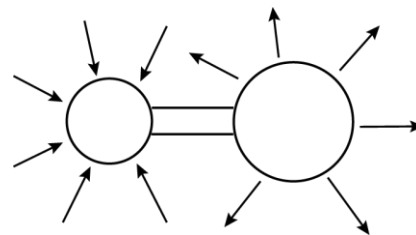


Рис. 5. Соединении мыльных пузырей разного радиуса.

## 1.5. Явления на границе жидкости и твердого тела. Смачивание

При рассмотрении явлений на границе раздела различных сред следует иметь в виду, что поверхностная энергия жидкости или твердого тела зависит не только от свойств данной жидкости или твердого тела, но и от свойств того вещества, с которым они граничат. Строго говоря, нужно рассматривать суммарную поверхностную энергию двух граничащих друг с другом веществ. Только если одно вещество газообразное, химически не реагирует с другим веществом и мало в нем растворяется, можно говорить просто о поверхностной энергии (или коэффициенте поверхностного натяжения) второго тела. Если граничат друг с другом вещества в трех различных агрегатных состояниях — твердое, жидкое и газообразное, то вся система принимает конфигурацию, соответствующую минимуму энергии (поверхностной, в поле сил тяжести и т.п.). Капля жидкости на поверхности твердого тела может принимать различную форму. Отсчитываемый внутри жидкости угол между касательными: к поверхности твердого тела и к поверхности жидкости, — называется *краевым углом*. Если угол острый, то говорят, что жидкость *смачивает* вещество твердого тела, если тупой — *не смачивает*. Если угол равен нулю, имеет место *полное смачивание*. В этом случае жидкость неограниченно растекается по поверхности твердого тела. Если краевой угол равен  $\pi$ , имеет место *полное несмачивание*. В этом случае поверхность, по которой жидкость граничит с твердым телом, стягивается в точку, жидкость отделяется от твердой поверхности.

В остальных случаях наблюдается *частичное смачивание* (или *частичное не-смачивание*). Чистая поверхность стекла полностью смачивается водой.

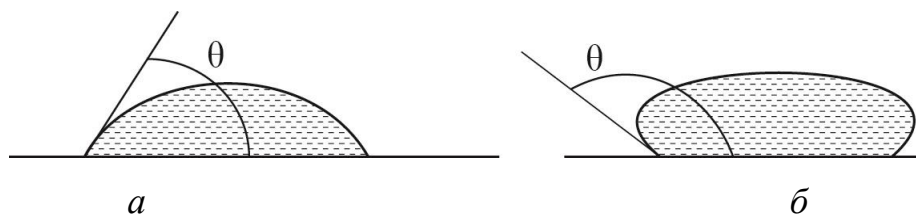


Рис. 6. Явления смачивания (а) и несмачивания (б) жидкостью поверхности твердого тела,  $\theta$  — краевой угол.

## 1.6. Капиллярные явления

Поверхностное (капиллярное) давление обуславливает такие капиллярные явления, как поднятие (опускание) жидкости в тонкой трубке (капилляре). Если стенки трубки смачиваются жидкостью (вогнутый мениск), то жидкость в ней поднимается, если не смачивается (выпуклый мениск), то опускается.

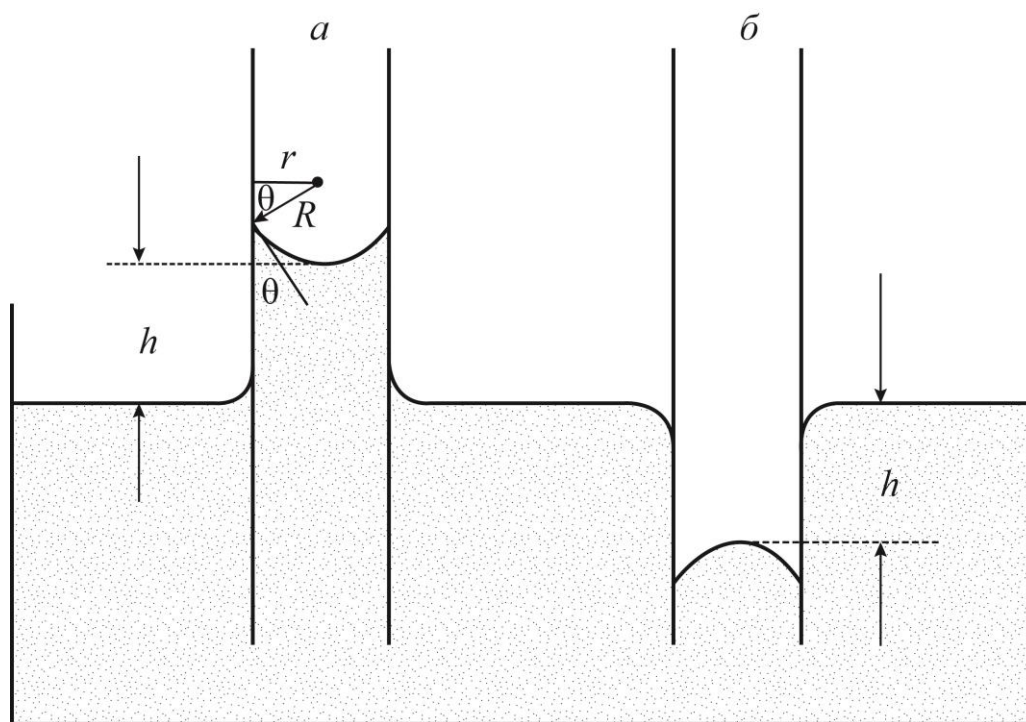


Рис. 7. Капиллярные явления: подъем уровня жидкости в капилляре при смачивании (а) и опускание уровня жидкости при несмачивании (б).

## 1.7. Зависимость поверхностного натяжения от температуры

Экспериментальные исследования различных авторов, посвященные исследованию коэффициента поверхностного натяжения, выявили, что последний очень чувствителен к изменению температуры жидкости: вдоль линии равнове-

сия жидкость–пар коэффициент поверхностного натяжения монотонно уменьшается с увеличением температуры, обращаясь в ноль в критической точке. В критической точке жидкая и газообразная фазы становятся тождественными, поверхность раздела между ними перестает существовать и коэффициент поверхностного натяжения должен обратиться в нуль.

Для определения коэффициента поверхностного натяжения как функции температуры может использоваться эмпирическое уравнение Лоранда Этвёша (1886). Согласно этому уравнению коэффициент поверхностного натяжения различных жидкостей убывает с возрастанием температуры по закону:

$$\sigma = \frac{K_0}{V_0^{2/3}}(T_c - T), \quad (7)$$

где  $V_0$  — мольный объем жидкости,  $K_0$  — постоянная Этвёша,  $T_c$  — температура жидкости в критической точке.

В 1893 Уильям Рэмзи (лауреат Нобелевский премии по химии 1904 года) показал, что лучшее совпадение расчетных данных с опытными можно получить, если вместо критической температуры  $T_c$  в формулу (7) ввести величину  $T_c - 6$ :

$$\sigma = \frac{K_0}{V_0^{2/3}}(T_c - 6 - T). \quad (8)$$

Значения постоянной  $K_0$  для некоторых жидкостей представлены в таблице 2

Таблица 2.

Жидкость	Вода	Азот	Ацетон	Гексан
$K_0$ , Дж/(моль <sup>2/3</sup> ·К)	0,89	2,00	1,82	2,11

## 2. Методика проведения эксперимента

Измерение энергии и силы разрыва межмолекулярных связей лежит в основе многих методов определения поверхностного натяжения. К группе методов, предназначенных для определения поверхностного натяжения жидкостей, относятся методы взвешивания (отрыва) капель, отрыва кольца, отрыва пластинки Вильгельми.

Эти методы предполагают разрыв жидкости по определенному сечению. Методы отрыва капли и кольца представляют собой простые и наглядные методики изучения поверхностного натяжения и измерения его коэффициента. Метод отрыва капли позволяет очень просто оценить  $\sigma$  даже с помощью пипетки. Метод счета капель считается самым простым способом измерения поверхностного натяжения с технической точки зрения. В основе расчетов лежит закон, согласно которому вес капли, отрывающейся от пипетки, пропорционален поверхностному натяжению жидкости  $\sigma$  и радиусу пипетки  $R$ , т.е.

$$m = 2\pi R\sigma / g. \quad (9)$$

Строго говоря, отрыв происходит по перетяжке, возникающей между каплей и пипеткой. Радиус перетяжки меньше радиуса отверстия. Измерить радиус перетяжки капли можно только при фотографировании капли в момент отрыва. Таким образом, метод отрыва капли при своей простоте не дает высокой точности измерения поверхностного натяжения.

### 2.1. Описание экспериментальной установки

Работа выполняется на многофункциональном лабораторном комплексе CASSY® Lab, используемом для выполнения различных экспериментов.

Установка для определения величины коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  изображена на рис. 8а. К прибору для измерения  $\sigma$  на нитях подвешивается тонкостенное кольцо (2, рис. 8а), изготовленное из материала, хорошо смачиваемого исследуемой жидкостью. На столике (5, рис. 8а) устанавливается стеклянный стакан (1, рис. 8а) с исследуемой жидкостью.



Рис. 8а. Фотография установки для определения величины коэффициента поверхностного натяжения: 1 — кювета, 300 мл; 2 — металлическое кольцо; 3 — датчик силы  $S$ , ( $\pm 1\text{H}$ ); 4 — блок сбора данных CASSY Lab 2; 5 — столик.

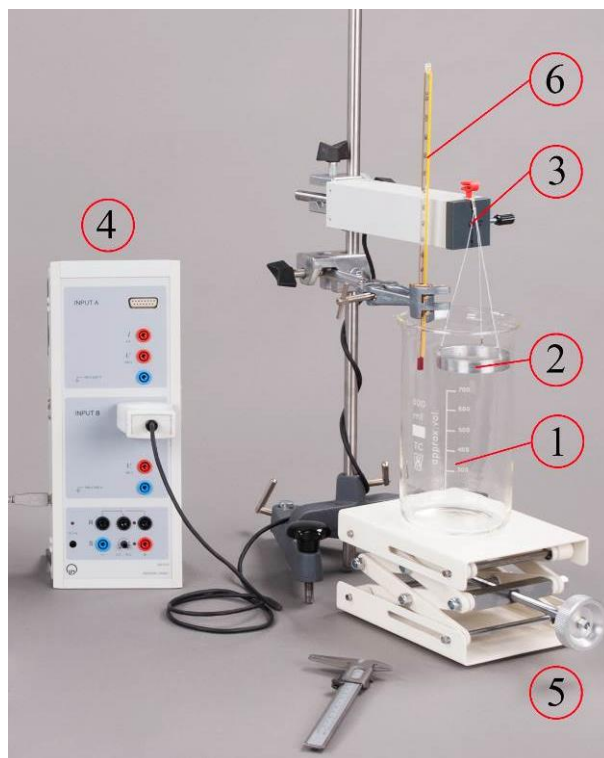


Рис. 8б. Фотография установки для определения величины коэффициента поверхностного натяжения при различных температурах раствора: 1 — стакан, 600 мл; 2 — металлическое кольцо; 3 — датчик силы  $S$ ,  $\pm 1\text{H}$ ; 4 — блок сбора данных CASSY Lab 2; 5 — столик; 6 — спиртовой термометр.

Для измерения коэффициента поверхностного натяжения при различных температурах используется установка, изображенная на рис. 8б. В дополнение к конфигурации, изображенной на рис. 8а, на штатив крепится спиртовой термометр с помощью держателя с пробковым зажимом (6, рис. 8б). А вместо стакана емкостью 300 мл следует использовать стакан с широким горлом объемом 600 мл (1, рис. 8б).

Для уточнения концентрации спирта в исследуемых в работе растворах определяется показатель преломления раствора, используя рефрактометр, изображенный на рис. 9 в раскрытом виде. Исследуемая жидкость помещается на поверхность осветительной призмы (1), затем полусферы соединяются. Наблюдая через окуляр (3), с помощью ручек регулировки (2) и (4) настраивают необходимым образом изображение (подробнее см. п.4 задание 2) и снимают показания прибора.



## 2.2. Постановка эксперимента. Методика и техника измерений

Когда кольцо не опущено в жидкость, сила тяжести кольца и всей системы, подвешенной к пружине, уравнивается силой упругости пружины. Растяжение пружины в этом случае примем за начальное и далее не будем учитывать вес системы и равную ему силу упругости.

Опустим висящее на пружине кольцо в кювету с жидкостью так, чтобы кольцо слегка коснулось поверхности воды. Начнем медленно поднимать кольцо (направление движения кольца обозначено стрелкой на рис. 10). При этом на него со стороны жидкости действуют силы поверхностного натяжения, приложенные к границе по-

верхности жидкости и кольца. На рисунке 10 показано вертикальное сечение кольца, касающегося воды. Поверхность жидкости возле стенок кольца искривляется, так как жидкость смачивает кольцо. На рисунке показан случай, когда имеется полное смачивание, и поэтому силы поверхностного натяжения направлены вдоль стенок кольца вертикально вниз.



Рис. 9. Общий вид рефрактометра: 1 — поверхность осветительной призмы; 2 — ручка, изменяющая наклон призмы (находится с левой стороны рефрактометра, на рисунке не видна); 3 — окуляр, 4 — ручка компенсатора

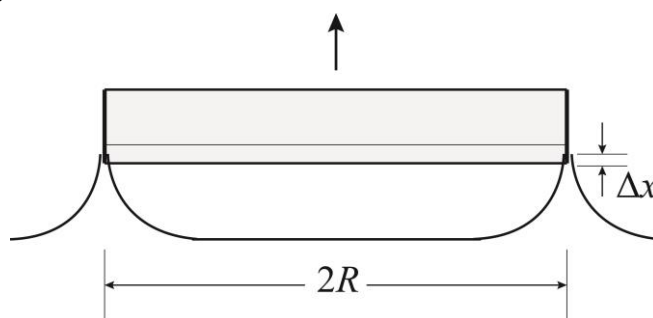


Рис. 10. Кольцо касается воды (вертикальное сечение).

По мере поднятия кольца пружина будет постепенно растягиваться, а сила упругости ( $F_{\text{упр}}$ ) пружины увеличиваться. В момент, когда  $F_{\text{упр}}$  станет равной силе поверхностного натяжения  $F$  (суммарная сила по всей границе жидкости с кольцом), кольцо оторвется от поверхности жидкости.

Для нахождения коэффициента поверхностного натяжения используется формула (5):  $\sigma = F / L$ .

Граница поверхности жидкости и кольца проходит по внешней и внутренней окружностям кольца. Поскольку кольцо настолько тонкое что его толщину можно не учитывать, длина границы равна:  $L = 2\pi D$ , где  $D$  — диаметр. Тогда окончательно получаем рабочую формулу:

$$\sigma = F / (2\pi D). \quad (10)$$

Заметим, что сила отрыва зависит не только от формы предмета, но и от объема жидкости, оставшейся на нем после отрыва, поверхностного натяжения, плотности жидкости и окружающего газа (пара). Поэтому при точных измерениях вводят поправочные коэффициенты.

В этой работе Вам необходимо измерить коэффициенты поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца, а также исследовать их зависимость от концентрации растворенных веществ и температуры. Для этого Вам нужно выполнить следующие задания:

- измерить коэффициент поверхностного натяжения дистиллированной воды;
- измерить показатель преломления и коэффициент поверхностного натяжения водных растворов спирта (для уточнения концентрации спирта в исследуемых растворах необходимо определить показатель преломления раствора при помощи рефрактометра, а затем по калибровочному графику (приложение 1) определить величину концентрации спирта в растворе);
- изучить зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры для остывающей жидкости (дистиллированная вода). Так как процесс остывания жидкости до  $T \cong 80^\circ\text{C}$  происходит довольно быстро, измерения  $\sigma$  целесообразно начинать при температуре  $T \leq 75^\circ\text{C}$  с интервалом в  $5^\circ\text{C}$ .

### 3. Техника безопасности

В ходе лабораторной работы необходимо аккуратно и бережно обращаться со стеклянными деталями. Следует соблюдать стандартные требования к технике безопасности при работе с электроприборами, горячими жидкостями, спиртовыми растворами.

В ходе выполнения работы используется горячая вода, нагретая до температуры  $\sim 100^{\circ}\text{C}$ , налитая в стеклянный стакан. Любые перемещения этого стакана рекомендуется выполнять с использованием специальной рукавицы.

Постарайтесь не совершать резких движений вблизи установки, так как в случае опрокидывания емкостей с горячей водой Вы можете получить ожоги.

Также требуется с большой осторожностью обращаться с полированной поверхностью измерительной призмы рефрактометра, чтобы не поцарапать ее. После эксперимента следует очень аккуратно промокнуть (НЕ протирать) поверхность призм специальной бумагой, имеющейся в лаборатории.

## 4. Порядок выполнения лабораторной работы

### Задание 1. Измерение коэффициента поверхностного натяжения дистиллированной воды

1. Поставьте стакан (1, рис. 8а) на столик (5) и наполните его дистиллированной водой.
2. Измерьте с помощью штангенциркуля диаметр металлического кольца  $D$  (2).
3. Подвесьте металлическое кольцо на цифровой динамометр (3), подключенный к блоку сбора данных **CASSY Lab 2** (4).
4. Запустите **CASSY Lab 2**.
5. Справа в окошке настроек зайдите в **Input  $A_1$  — Force  $FA_1$** . Обнулите показания динамометра нажатием на кнопку  $[\rightarrow 0 \leftarrow]$ .
6. Запустите эксперимент в **CASSY Lab** нажатием клавиши **F9**.
7. Медленно поднимите винтом столик, чтобы кольцо погрузилось в воду. Потом медленно опускайте столик до тех пор, пока кольцо полностью не оторвется от поверхности воды.
8. Остановите эксперимент в **CASSY Lab** нажатием клавиши **F9**. Из полученного графика определите коэффициент поверхностного натяжения.
9. Нажмите правой кнопкой мыши по диаграмме, выберите пункт меню **Other evaluation-Max-min**, удерживая левую кнопку мыши, выделите график.
10. Нажмите **Alt+T** и определите значения минимума и максимума силы натяжения на диаграмме. Начало отсчета определятся минимумом силы натяжения.
11. Измерение повторите не менее 5 раз, вычислите среднее значение  $F$  в момент отрыва кольца и занесите результаты в таблицу.
12. По формуле (8) определите коэффициент поверхностного натяжения воды.
13. Проанализируйте зависимость силы натяжения от времени при погружении кольца в воду и при извлечении его из воды.
14. Сравните полученные значения  $\sigma$  с табличными данными из приложения 1.

## Задание 2. Определение коэффициентов поверхностного натяжения спиртовых растворов

Прежде чем приступать к экспериментам по определению коэффициента поверхностного натяжения спиртовых растворов следует для каждого из них определить точную концентрацию спирта. Для этого необходимо измерить показатель преломления исследуемого раствора при помощи рефрактометра.

1. Приступая к измерениям, следует прежде всего убедиться в правильной работе прибора. Такую проверку проще всего выполнить, измерив показатель преломления вещества с известным показателем преломления. В данной работе Вам предлагается измерить показатель преломления дистиллированной воды.
2. Откройте верхнюю часть сферы поворотом вокруг горизонтальной оси (рис. 9), уберите бумагу, которая была оставлена между призмами, чтобы не поцарапать их поверхности.
3. На поверхность осветительной призмы (1, рис. 9) пипеткой с закругленным концом нанесите несколько капель исследуемой жидкости и плотно прижмите призмы одну к другой.
4. Убедитесь, что исследуемая жидкость хорошо заполнила зазор между измерительной и осветительной призмами. Для этого посмотрите в окошко рефрактометра, расположенное в верхней части сферы.
5. Осветительное зеркало установите так, чтобы свет от источника (дневной свет или лампа накаливания) через окошко в осветительной призме равномерно освещал ее поверхность.
6. С помощью зеркала, расположенного возле ручки (2, рис. 9) направьте свет от источника на шкалу показателей преломления, находящуюся за матовым стеклом в корпусе прибора. Яркость освещения шкалы подбирают, наблюдая ее изображение через окуляр (3, рис. 9).
7. Вращая блок призм с помощью ручки (2, рис. 9), приведите границу света и темноты (или света и полутени) в поле зрения окуляра. Вращая ручку компенсатора (4, рис. 9), добейтесь того, чтобы эта граница была резкой. После этого по шкале определяют величину показателя преломления.

8. Для дистиллированной воды Вы должны получить значение  $n = 1,3329$ . Если измерение дает другой результат, следует определить поправку к шкале.
9. Далее повторите пункты 2–7 для определения показателя преломления исследуемого спиртового раствора.
10. Окончив работу с одной жидкостью, необходимо аккуратно промокнуть (НЕ протирать) поверхность призм специальной бумагой, имеющейся на столе, чтобы удалить остатки жидкости. И приступить к измерению поверхностного натяжения данного раствора.

По окончании всех измерений следует промокнуть поверхности призм специальной бумагой и положить между призмами СУХУЮ бумагу.

После того как Вы получили точную величину концентрации раствора спирта, для измерения коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  Вам необходимо повторить действия, описанные в пп. 1–11 задания 1. Полученные результаты занесите в таблицу.

Задание 3. Изучение температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения дистиллированной воды.

1. Установите на кронштейн спиртовой термометр (6, рис 8б) так, как показано на рис. 8б.
2. Налейте в стакан (1, рис. 8б) 600 мл горячую воду (Воду следует наливать постепенно, чтобы избежать повреждения стенок стакана из-за резкого перепада температуры. Предлагается сначала налить 100 мл горячей воды, подождать 30 секунд пока стенки стакана прогреются, затем заполнить оставшийся объем жидкостью).
3. Используя рукавицу, установите стакан на лабораторный кронштейн. Убедитесь в том, что кольцо не касается стенок стакана и термометра.
4. Измерьте температуру дистиллированной воды. Запишите полученное значение в таблицу.
5. Повторите пп. 5–11 задания 1 для определения величины  $\sigma$  для конкретной температуры.

Проведите измерения  $\sigma$  для остывающей дистиллированной воды при нескольких температурах (минимум 6 значений).

## 5. Обработка результатов эксперимента, требования к оформлению отчета

1. Используя расчетную формулу (10), вычислите значения коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma_i$  для отдельных измерений.
2. Вычислите средние значения  $\bar{\sigma}$ . Оцените абсолютные погрешности  $\Delta\sigma$ . Результаты всех расчетов занесите в таблицу.
3. Сопоставьте измеренные значения  $\sigma$  со справочными данными (см. приложение 1, табл. 3)<sup>1</sup>.
4. Постройте график зависимости коэффициента поверхностного натяжения от концентрации раствора. На график необходимо нанести экспериментальные значения вместе с погрешностями, а также значения коэффициента поверхностного натяжения из табл. 3 Приложения 1.
5. Постройте график зависимости  $\sigma$ , полученного экспериментально, от температуры воды. На этот же график нанесите табличные значения (табл. 4). Сравните полученные зависимости и объясните их различия. По графику определите коэффициент угла наклона прямой. Получите значение постоянной Этвёша  $K_0$  из формулы (7), сравните это значение с табличным (табл. 2).

### Примерная структура отчета:

1. Цель работы, конкретная постановка задачи, априорные ожидания.
2. Расчетные формулы с указанием единиц измерения и введение всех (!) используемых обозначений. Схема установки.
3. Процедура проведения эксперимента, таблицы и графики первичных результатов измерений.
4. Процедура обработки экспериментальных данных, таблицы и графики результатов эксперимента.
5. Обсуждение результатов. Выводы по работе.

---

<sup>1</sup> Если значений  $\sigma$  для Вашей концентрации раствора нет в таблице, постройте по табличным данным градуировочный график и по нему найдите нужное значение.

## 6. Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление поверхностного натяжения? Как оно объясняется с молекулярной точки зрения?
2. Приведите силовое и энергетическое определения коэффициента поверхностного натяжения.
3. Единицы измерения коэффициента поверхностного натяжения
4. От чего зависит поверхностное натяжение?
5. Что такое свободная энергия, поверхностная энергия? Как изменяется свободная поверхностная энергия при увеличении поверхности жидкости? Почему жидкость стремится уменьшить свою поверхность?
6. Что собой представляют силы поверхностного натяжения? Как они направлены и к чему приложены? Вывести формулу, связывающую силу поверхностного натяжения с коэффициентом поверхностного натяжения.
7. Метод отрыва кольца. Нарисуйте векторы сил, действующих на кольцо. При каком условии происходит отрыв кольца? Получите формулу для расчета.
8. Чем обусловлено существование сил поверхностного натяжения?
9. Как направлены силы поверхностного натяжения по отношению к поверхности жидкости и по отношению к линии, ограничивающей поверхность жидкости?
10. Каким методом в настоящей работе определяется коэффициент поверхностного натяжения?
11. Как влияет температура на поверхностное натяжение? При каких условиях коэффициент поверхностного натяжения равен нулю?
12. Что такое поверхностно-активные вещества (ПАВ)?
13. Как влияет мыло на поверхностное натяжение воды?
14. При соединении двух мыльных пузырей разного радиуса как они будут меняться и почему?
15. Получите формулу, по которой вычисляется коэффициент поверхностного натяжения в данной работе.
16. Нарисуйте график зависимости сил межмолекулярного взаимодействия от расстояния между молекулами.



## **Список рекомендованной литературы и справочные данные**

1. Сивухин Д.В. *Курс общей физики, Термодинамика и молекулярная физика. том 2.* ФИЗМАТЛИТ, 2003.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Статистическая физика.* Москва. Наука, 1986.
3. Бретшнайдер С. *Свойства газов и жидкостей.* М.: Химия, 1966. 628 с.

# Приложение 1. Табличные данные

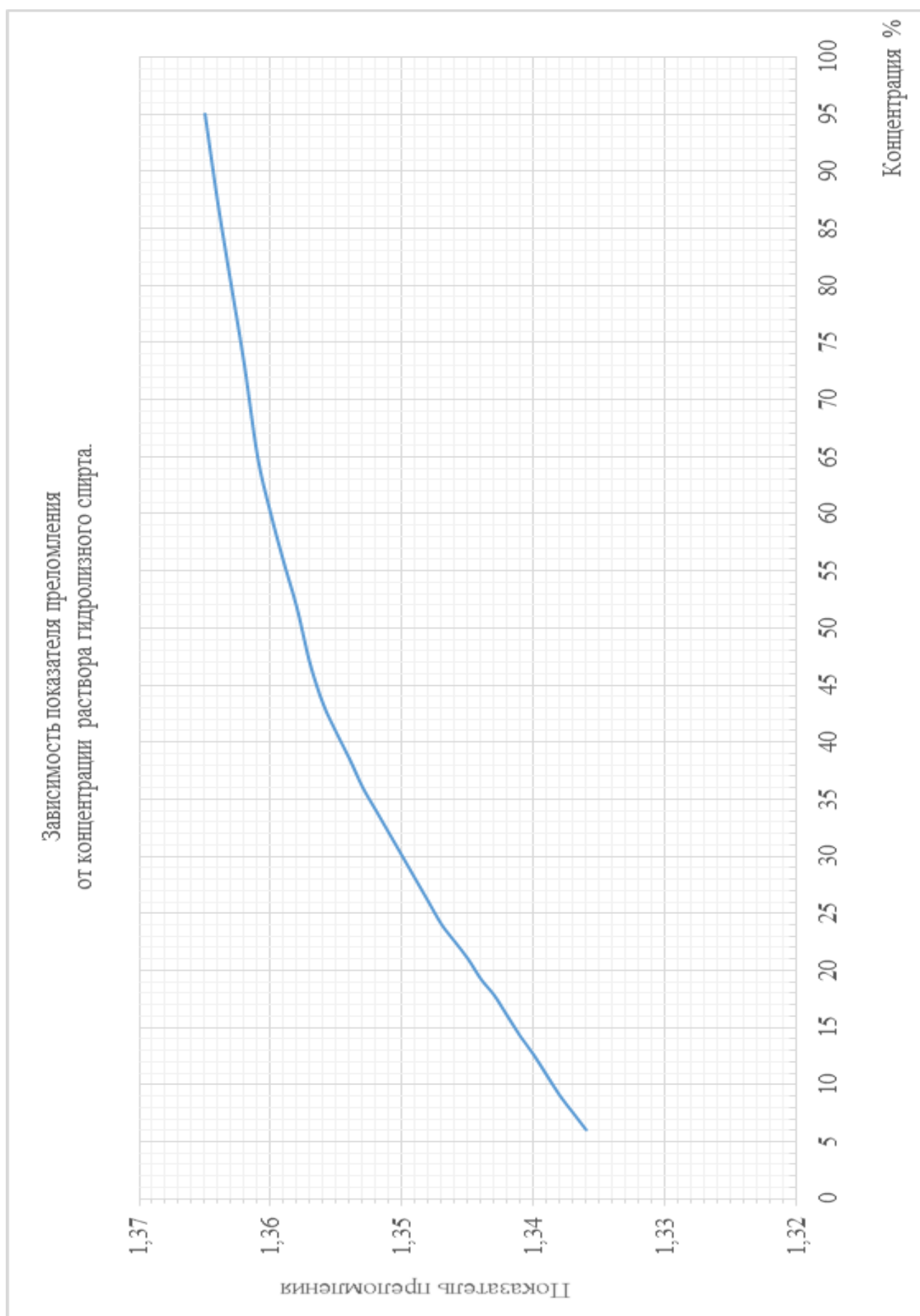
Поверхностное натяжение веществ и водных растворов в зависимости  
от температуры  $\sigma \times 10^{-3}$  Н/м.

Таблица 3.

Вещество	Температура							
	– 20°C	0°C	20°C	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C
Вода		75,6	72,8	69,6	66,2	62,6	58,9	54,9
Натрий хлористый, 20% раствор		82,6	79,8	76,6	73,2	69,6	65,9	61,9
Этиловый спирт, 100%	25,7	24	22,3	20,6	19	17,3	15,5	13,4
Этиловый спирт, 80%		26	25	23	21	20	18	16
Этиловый спирт, 60%		28	27	25	23	22	20	18
Этиловый спирт, 40%		32	30	28	26	24	22	19
Этиловый спирт, 20%		40	38	36	33	31	29	27

Таблица 4.

Температура, [°C]	Поверхностное натяжение $\sigma$ , [10 <sup>-3</sup> Н/м]
0	75,60
5	74,90
10	74,22
15	73,49
18	73,05
20	72,75
25	71,97
30	71,18
40	69,56
50	67,91
60	66,18
70	64,40
80	62,60
100	58,90



## Приложение 2. Описание рефрактометра

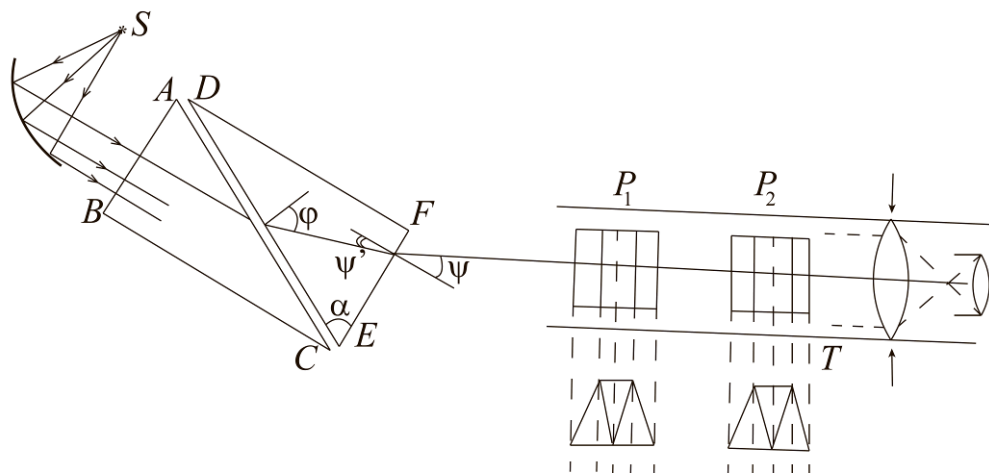


Рис. П-1. Оптическая схема рефрактометра.

Большинство методов определения показателя преломления жидкостей основаны на измерении угла полного внутреннего отражения или предельного угла преломления лучей света при падении на границу раздела исследуемой жидкости и стекла с известным показателем преломления.

В данной лаборатории применяется рефрактометр РЛУ (рефрактометр лабораторный универсальный) типа Аббе. Оптическая схема прибора показана на рис. П-1.

Основной его частью являются две стеклянные призмы  $ABC$  и  $DFE$ . Призмы вращаются вокруг оси, перпендикулярной плоскости рисунка, и угол поворота отсчитывается по лимбу. Призма  $ABC$  называется осветительной; свет от источника  $S$  направляется зеркалом на эту призму и через ее матовую грань  $AC$  выходит в исследуемую жидкость, которая в количестве нескольких капель заполняет узкий зазор между гранями  $AC$  и  $DE$ . На матовой поверхности  $AC$  свет рассеивается, так что в жидкости распространяется свет всевозможных направлений. Из жидкости лучи света проходят через полированную грань  $DE$  во вторую, измерительную призму  $DFE$ , сделанную из стекла с большим показателем преломления (он должен быть больше, чем показатель преломления исследуемой жидкости). В призме  $DFE$  уже не будет лучей, составляющих с нормалью к грани  $DE$  угол, больше предельного, т.е. больше угла преломления для лучей, падающих из жидкости на грань  $DE$  под углом  $90^\circ$  (скользящий луч). Предельный угол  $\phi$  находится из условия:

$$\sin \phi = n / N ,$$

где  $n$  и  $N$  — показатели преломления жидкости и стекла. На рис. П-1 показан один из лучей, распространяющихся под предельным углом. Падая на грань  $FE$  под углом

$$\psi' = \phi - \alpha ,$$

где  $\alpha$  — преломляющий угол призмы, этот луч выходит из измерительной призмы под углом  $\psi$ , определяемым из уравнения  $\sin \psi = \sin \psi' \cdot N$ .

Измеряя угол выхода предельного луча из призмы  $DFE$ , нетрудно вычислить показатель преломления жидкости (постарайтесь вывести эту формулу самостоятельно):

$$n = \sin \alpha \sqrt{N^2 - \sin^2 \psi} \pm \sin \psi \cos \alpha.$$

Для измерения угла  $\psi$ , под которым предельный луч выходит из измерительной призмы, служит труба  $T$ , оптическая ось которой перпендикулярна оси вращения призмы. Труба фокусируется на бесконечности. В каждой точке фокальной плоскости ее объектива собираются лучи, выходящие из измерительной призмы по какому-либо определенному направлению. Легко видеть, что направления предельных лучей образуют в фокальной плоскости границу между освещенной и неосвещенной частями поля зрения. Поворачивая призмы так, чтобы эта граничная линия совпала с расположенным в фокальной плоскости объектива крестом нитей, можно отсчитать по лимбу угол  $\psi$ , а затем вычислить показатель преломления жидкости.

В рефрактометре РЛУ на лимбе нанесены не значения углов  $\psi$ , а непосредственно значения показателей преломления.

Для исправления небольших случайных изменений направления оси трубы ее объектив можно смещать в направлении стрелок (рис. П-1) с помощью специального ключа. Перед измерениями правильность положения объектива проверяется по какой-либо жидкости с известным показателем преломления (обычно по дистиллированной воде).

Описанный метод применяется при измерении показателя преломления прозрачных жидкостей. Для исследования непрозрачных веществ измерительная призма освещается через матовую грань  $DF$ , для чего в оправе этой призмы имеется специальное окошко, обычно закрытое крышкой. Граница света и тени соответствует в этом случае полному внутреннему отражению на грани  $DE$ .

Все сказанное выше относилось к случаю, когда призмы рефрактометра освещаются монохроматическим светом. Рефрактометр РЛУ имеет приспособление, позволяющее измерять показатель преломления для желтой линии натрия (линия D,  $\lambda=589,0$  нм), пользуясь белым светом. Для этой цели служит компенсатор дисперсии, состоящий из двух призм прямого зрения Амичи  $P_1$  и  $P_2$ . Каждая из этих призм склеена из трех призмочек; средняя из них имеет большой показатель преломления и большую дисперсию, а крайние — меньший показатель преломления и совсем малую дисперсию. Показатели преломления подобраны так, чтобы луч с длиной волны  $\lambda=589,0$  нм (D-линия натрия), падающий на призму параллельно ее основанию, выходил из призмы по тому же направлению, не отклоняясь. Лучи других

длин волн будут отклоняться так, что белый свет разложится в спектр. Вторая призма при такой установке, как показано на рис. П-1, вновь соберет лучи разных длин волн в один параллельный пучок. Если же повернуть призмы вокруг оси трубы в противоположных направлениях, то вся система из двух призм будет иметь дисперсию, величина которой зависит от поворота призм. При этом луч длиной волны  $\lambda = 589,0$  нм, идущий вдоль оси трубы, не отклоняется.

При освещении рефрактометра белым светом граница света и тени в фокальной плоскости трубы будет окрашена из-за дисперсии в исследуемой жидкости и в измерительной призме: углы выхода предельного луча (углы  $\psi$ ) будут разными для разных длин волн. Но поворотом призмы компенсатора можно добиться того, что окраска практически исчезнет. Поскольку призма прямого зрения отклоняет лучи всех длин волн, кроме луча D-линии, граница света и тени в лучах D-линии не будет смещаться при повороте призмы компенсатора. Таким образом, положение границы света и тени в момент исчезновения окраски определяет величину  $n$ .