

Следовательно,

$$6\pi\eta ru = \frac{4}{3}\pi r^3 g (\rho_0 - \rho),$$

откуда

$$\eta = \frac{2r^2 g (\rho_0 - \rho)}{9u}. \quad (14.5)$$

По этой формуле можно определить коэффициент внутреннего трения жидкости, если измерить на опыте скорость равномерного падения в ней небольших твердых шариков.

Другой метод измерения коэффициента внутреннего трения жидкостей, основанный на законе Пуазейля для течения вязкой жидкости через цилиндрический капилляр, мы рассмотрим в § 16.3.

§ 14.4. Поверхностное натяжение жидкостей

1. В жидкостях средние расстояния между молекулами значительно меньше, чем в газах. Поэтому силы взаимодействия между молекулами играют в жидкостях существенную роль. В поверхностном слое жидкости обнаруживается некомпенсированность межмолекулярных сил: частицы жидкости, находящиеся в этом слое, испытывают направленную внутрь силу притяжения остальной частью жидкости. Поэтому согласно модели Ван-дер-Ваальса поверхностный слой жидкости оказывает на нее большое внутреннее давление, достигающее десятков тысяч атмосфер.

Заметим, что внутреннее давление нельзя измерить на опыте. Это связано с тем, что оно, как указано выше, всегда направлено внутрь жидкости, нормально к ее поверхности. Поэтому оно не действует на стенки сосуда и тела, погруженные в жидкость.

Можно считать, что при обычных условиях жидкости практически несжимаемы. Малая сжимаемость жидкостей объясняется тем, что небольшое уменьшение расстояния r между молекулами на малых взаимных расстояниях между ними приводит к появлению больших сил межмолекулярного отталкивания. Понятно, что при очень больших внешних давлениях жидкости должны обнаруживать значительную сжимаемость. Опыты Бриджмена и других показали, что это действительно так.

2. Рассмотрим вопрос об энергии поверхностного слоя жидкости. Частицы этого слоя имеют кинетическую энергию теплового движения и потенциальную энергию, обусловленную силами межмолекулярного взаимодействия. Средняя кинетическая энергия частиц зависит от температуры. В случае равновесного состояния температура постоянна по всему объему жидкости. Поэтому в среднем кинетические энергии молекул поверхностного слоя и молекул, находящихся внутри объема жидкости, одинаковы. Иначе обстоит дело с потенциальной энергией. При переходе молекул из внутренних частей жидкости на

ее поверхность они должны совершить работу против направленных внутрь жидкости сил притяжения со стороны других частиц жидкости. Эта работа идет на увеличение потенциальной энергии молекул, переходящих в поверхностный слой. Следовательно, частицы поверхностного слоя имеют большую потенциальную энергию, чем частицы внутри жидкости.

В § 13.1 мы говорили о том, что в состоянии устойчивого равновесия система должна иметь минимальное значение потенциальной энергии¹. Поэтому всякое жидкое тело, на которое не действуют внешние силы, должно принять такую

форму, при которой площадь его поверхности будет минимальной. Так как жидкость, кроме того, несжимаема, то состоянию устойчивого равновесия жидкого тела соответствует минимум отношения площади его поверхности к объему. Из математики известно, что этому условию удовлетворяют тела сферической формы. Наблюдения мельчайших капель, взвешенных в воздухе и других средах, показывают, что они действительно имеют форму шариков. К такому же

выводу приводит опыт Ж. Плато, известный из курса средней школы.

3. Стремление жидкости сократить размеры свободной поверхности свидетельствует о том, что поверхностный слой подобен растянутой упругой пленке: в нем так же, как в упругой пленке, действуют силы натяжения. Для иллюстрации этого положения рассмотрим следующий опыт (рис. 14.1). Горизонтальный прямоугольный проволочный каркас $ABCD$ и разделяющую его на две части перекладину ab полностью затягивают пленкой мыльной воды (рис. 14.1, a). В этом случае силы, действующие на перекладину со стороны верхней и нижней пленок, взаимно уравновешены и перекладина неподвижна. Если нижнюю пленку разорвать (рис. 14.1, b), то под действием одной верхней пленки перекладина начнет перемещаться вверх. Для компенсации действия пленки к перекладине нужно приложить силу f . Опыты показали, что сила f пропорциональна длине перекладины

$$f = 2\alpha l. \quad (14.6)$$

Коэффициент пропорциональности α называют **коэффициентом поверхностного натяжения жидкости**. Мыльная пленка имеет два ограничивающих ее поверхностных слоя, каждый из которых действует на перекладину с силой αl . Поэтому в правой части формулы (14.6) стоит множитель 2.

¹ Строго говоря, при постоянстве объема и температуры нужно говорить о минимуме не потенциальной, а свободной энергии.

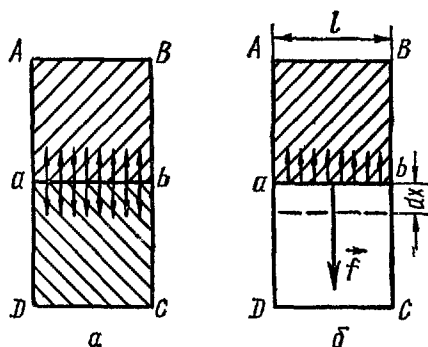


Рис. 14.1.

Из (14.6) следует, что коэффициент поверхностного натяжения численно равен силе, действующей на единицу длины контура, ограничивающего поверхность жидкости. Эта сила вызвана взаимным притяжением между молекулами поверхностного слоя. Она направлена по касательной к поверхности жидкости и перпендикулярно к контуру. В Международной системе единиц (СИ) коэффициент поверхностного натяжения измеряют в Н/м; в системе СГС — в дин/см.

4. Коэффициент поверхностного натяжения α зависит от химического состава жидкости и ее температуры. С возрастанием температуры α уменьшается и обращается в нуль при критической температуре. Исследование этой зависимости позволило Д. И. Менделееву сделать важный вывод относительно существования критической температуры (см. § 13.3).

В таблице 13 приведены значения α для некоторых жидкостей, граничащих с указанными в таблице средами.

Таблица 13

Жидкость	Среда	Температура, °С	α , 10 ⁻³ Н/м
Вода	Воздух	20	72,7
»	»	100	58,8
»	Этиловый эфир	20	12,2
Ртуть	Воздух	20	465
Этиловый спирт	Пары спирта	20	22,7
Глицерин	Воздух	20	63,4

5. Следует заметить, что между поверхностным слоем жидкости и упругой пленкой имеется существенное различие. Натяжение обычной упругой пленки прямо пропорционально ее деформации и равно нулю при некоторой k — o — n — i площади поверхности пленки. Поверхностное натяжение в жидкостях не зависит от размеров свободной поверхности, т. е. стремится сократить ее до нуля. Это своеобразие свойств жидких пленок объясняется тем, что при изотермическом растяжении или сжатии таких пленок изменяется $ч$ — $и$ — $о$ — $л$ — $е$ — $к$ молекул, содержащихся в них, а среднее расстояние между молекулами не меняется. Поэтому не изменяются и силы межмолекулярного взаимодействия, определяющие величину поверхностного натяжения.

6. Найдем выражение для свободной энергии поверхностного слоя жидкости. В § 12.4 было показано, что изменение свободной энергии системы ΔF равно работе $A'_{изот}$, совершаемой над системой внешними силами в обратимом изотермическом процессе,

$$\Delta F = F_2 - F_1 = A'_{изот}. \quad (14.7)$$

Для вычисления работы $A'_{изот}$ воспользуемся схемой, изображенной на рис. 44.1, б. При перемещении границы пленки ab на расстояние dx внешняя сила f совершает работу

$$\delta A' = f \cdot dx = 2\alpha l \cdot dx.$$

Произведение $2l \cdot dx$ представляет собой увеличение площади свободной поверхности жидкой пленки dS . Поэтому

$$dA' = \alpha \cdot dS. \quad (14.8)$$

Полная работа A' , совершаемая внешними силами при изменении площади поверхности пленки от S_1 до S_2 , будет равна

$$A' = \int_{S_1}^{S_2} \alpha \cdot dS. \quad (14.9)$$

В случае изотермического изменения площади $\alpha = \text{const}$ и

$$A'_{\text{изот}} = \alpha(S_2 - S_1). \quad (14.10)$$

Подставив это выражение в (14.7), получим

$$F_2 - F_1 = \alpha(S_2 - S_1). \quad (14.11)$$

Изменение свободной энергии поверхностного слоя жидкости равно произведению ее коэффициента поверхностного натяжения на изменение площади поверхности.

Из (14.11) следует, что

$$F = \alpha S. \quad (14.12)$$

Таким образом, коэффициент поверхностного натяжения численно равен свободной энергии поверхностного слоя, площадь которого равна единице. Поэтому его можно измерять в системе СИ — в Дж/м², а в системе СГС — в эрг/см².

§ 14.5. Поверхностно-активные вещества. Адсорбция

1. Растворение в жидкости различных добавок вызывает изменение поверхностного натяжения. Это особенно заметно в тех случаях, когда силы взаимодействия между молекулами растворенного вещества и растворителя сильно отличаются от сил взаимодействия между молекулами растворителя. Если последние больше первых, то молекулы растворенного вещества, слабо взаимодействующие с молекулами растворителя, «выталкиваются» последними в поверхностный слой. Концентрация молекул растворенного вещества в поверхностном слое будет больше концентрации их в объеме жидкости.

Вещества, собирающиеся в поверхностном слое при растворении их в жидкости, называют **поверхностно-активными веществами**, а явление повышенной концентрации молекул этих веществ в поверхностном слое растворителя называют **адсорбцией**. Адсорбция молекул газа или жидкости может происходить также и на поверхности твердого тела, контактирующего с газом или жидкостью (например, на по-