

Лабораторная работа № 227

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН

Принадлежности: прибор ФПВ, исследуемая жидкость, электронный штангенциркуль.

Цель работы:

1. Исследование зависимости скорости распространения капиллярных волн от длины волны.
2. Измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

Введение.

Рассмотрим поверхность жидкости, наполняющей озеро или достаточно большой сосуд. В спокойном состоянии эта поверхность является плоской. Однако достаточно хотя бы ненадолго вывести жидкость из состояния равновесия, как по ее поверхности начинают распространяться волны: круговые (от брошенного камня), плоские (от ветра или волны), более сложные по форме.

Два рода сил возвращают на место выведенную из равновесия жидкость: силы тяжести и силы поверхностного натяжения. Силы тяжести стремятся совместить поверхность жидкости с эквипотенциальной поверхностью, т. е. расположить эту поверхность по горизонтальной плоскости (точнее говоря, по сфере, центр которой расположен в центре Земли). Сила поверхностного натяжения стремится сократить площадь поверхности, т. е. тоже придать ей вид плоскости.

Выведенная из состояния равновесия жидкость приобретает в поле тяжести и в поле сил поверхностного натяжения некоторую потенциальную энергию. До тех пор, пока эта энергия не перейдет в тепло, жидкость не может успокоиться. В ней возбуждается колебательное движение, – по поверхности жидкости бегут капиллярно–гравитационные волны.

Теория капиллярно–гравитационных волн основана на уравнениях гидродинамики и здесь не рассматривается. Эта теория приводит к следующей формуле для скорости капиллярно–гравитационных волн:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\sigma_0}{\rho\lambda}} \quad (1)$$

где c – фазовая скорость распространения волны, g – ускорение свободного падения, λ – длина поверхностной волны, σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения, ρ – плотность жидкости. График зависимости c от λ приведен на рис. 1.

Как видно из формулы (1), скорость распространения капиллярно– гравитационных волн сложным образом зависит от длины λ . Первое слагаемое под корнем отражает вклад силы тяжести, а второе – вклад сил поверхностного натяжения. Соотношения между этими слагаемыми существенно зависит от длины волны. При увеличении λ первое слагаемое подкоренного выражения растет, а второе – уменьшается.

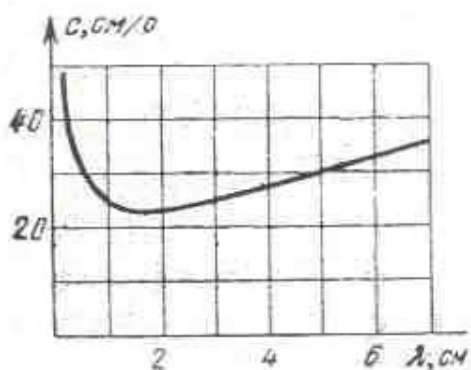


Рис. 1. Зависимость скорости капиллярно-гравитационных волн от длины волны.

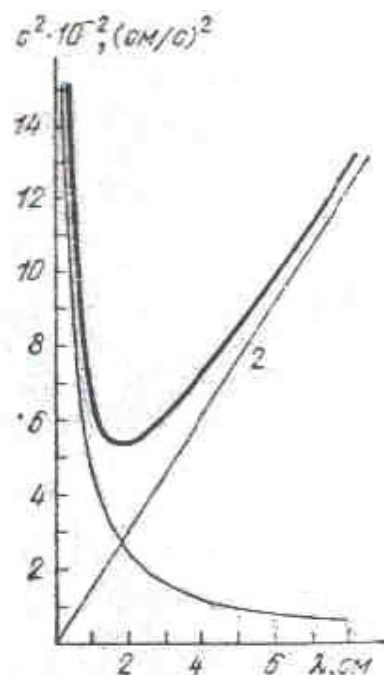


Рис. 2. Зависимость c^2 от λ . 1 — вклад сил поверхностного натяжения, 2 — вклад гравитационных сил.

Структуру формулы (1) удобно исследовать на графике, в котором по оси ординат откладывается не c , а c^2 (рис. 2). На рисунке кривая 1 изображает слагаемое, зависящее от сил поверхностного натяжения, а прямая 2 — слагаемое, связанное с гравитационными силами. По графику нетрудно определить, когда вклад прямой 2 оказывается в заданное число раз меньше вклада кривой 1. Рисунок ясно показывает, что движение достаточно длинных волн определяется только гравитационными силами. Наоборот, движение волн с малой длиной волны целиком связано с поверхностным натяжением. Оба члена вносят равный вклад при

$$\lambda_1 = 2\pi \sqrt{\sigma_0 / g\rho} \quad (2)$$

Для воды ($\sigma_0=0,073$ Н/м при $t=20^\circ\text{C}$) вычисление по формуле (2) дает $\lambda_1=1,71$ см.

Возбуждая в жидкости волны с достаточно малой λ , можно сколь угодно уменьшить вклад гравитационных сил в выражение для скорости распространения волн. При этом формула (10) упрощается и принимает вид

$$c \approx \sqrt{2\pi\sigma / \rho\lambda} \quad (3)$$

Формула (3) устанавливает связь между скоростью распространения капиллярной волны и величиной поверхностного натяжения жидкости. Измеряя на опыте c и λ (плотность ρ берется из таблиц), можно вычислить коэффициент поверхностного натяжения по формуле

$$\sigma \approx \rho\lambda c^2 / 2\pi \quad (4)$$

Кафедра общей физики ПГУ
Лаборатория молекулярной физики
Лабораторная работа № 227

которая следует из (3). Приближенная формула (4) описывает движение волны тем точнее, чем лучше выполнено неравенство

$$\lambda \ll \lambda_1 \quad (5)$$

Целью работы является: 1) исследование зависимости скорости распространения капиллярных волн от длины волны, 2) изменение коэффициента поверхностного натяжения жидкости по скорости распространения капиллярных волн. Предполагаемый метод является одним из наиболее точных методов изменения σ .

В нашей работе непосредственно измеряется не скорость c , а длина волны λ и частота f . Преобразуем формулу (4), вводя вместо скорости ее выражение через λ и f :

$$c = \lambda f. \quad (6)$$

Формула приобретает окончательный вид:

$$\sigma = \rho \lambda^3 f^2 / 2\pi. \quad (7)$$

Как ясно из предыдущего, формула (11) не является точной. Вычислим поправку, связанную с гравитационными силами. Разрешая (1) относительно σ_0 и учитывая (2) и (10), нетрудно получить связь величины σ , определенной формулой (11), с точной величиной коэффициента поверхностного натяжения σ_0 :

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 1 + \frac{\lambda^2}{\lambda_1^2}. \quad (8)$$

Из этой формулы следует, что при $\lambda \ll \lambda_1$ погрешность $\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0$, возникающая при пользовании приближенной формулой (11), определяется соотношением

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\lambda^2}{\lambda_1^2}. \quad (9)$$

При $\lambda/\lambda_1=0,1$ расхождение результатов составляет всего 1%. Погрешности, связанные с наличием поверхностно-активных примесей, растворенных в воде, обычно бывают существенно больше.

Описание установки.

Принцип действия устройства основан на освещении модулированным светом волновой картины на поверхности, исследуемой жидкости. Частота прерывания светового потока совпадает с частотой колебаний вибратора, возбуждающего волны. Стоячая волновая картина проецируется на экран, где и производятся необходимые измерения.

Устройство выполнено в настольном исполнении и состоит из диаскопа 1) и измерительного блока 2) рис. 1. диаскоп выполнен в виде штатива, основание которого служит экраном (3). В верхней части диаскопа находится точечный источник света (4), световой поток от которого модулируется генератором, нагрузкой которого служит динамический громкоговоритель (5). Диффузор громкоговорителя помещен в закрытую полость, выход из которой направлен в сторону поверхности жидкости в ванночке (6). Струя воздуха через отверстие в насадках возбуждает на поверхности жидкости волны, частота изменяется настройкой генератора. Синхронно с колебаниями диффузора динамика тем же генератором промоделирована интенсивность светового потока от светодиодного излучателя над ванночкой. Измерительный блок состоит из электронных схем задания, стабилизации и измерения частоты генератора колебаний. На передней

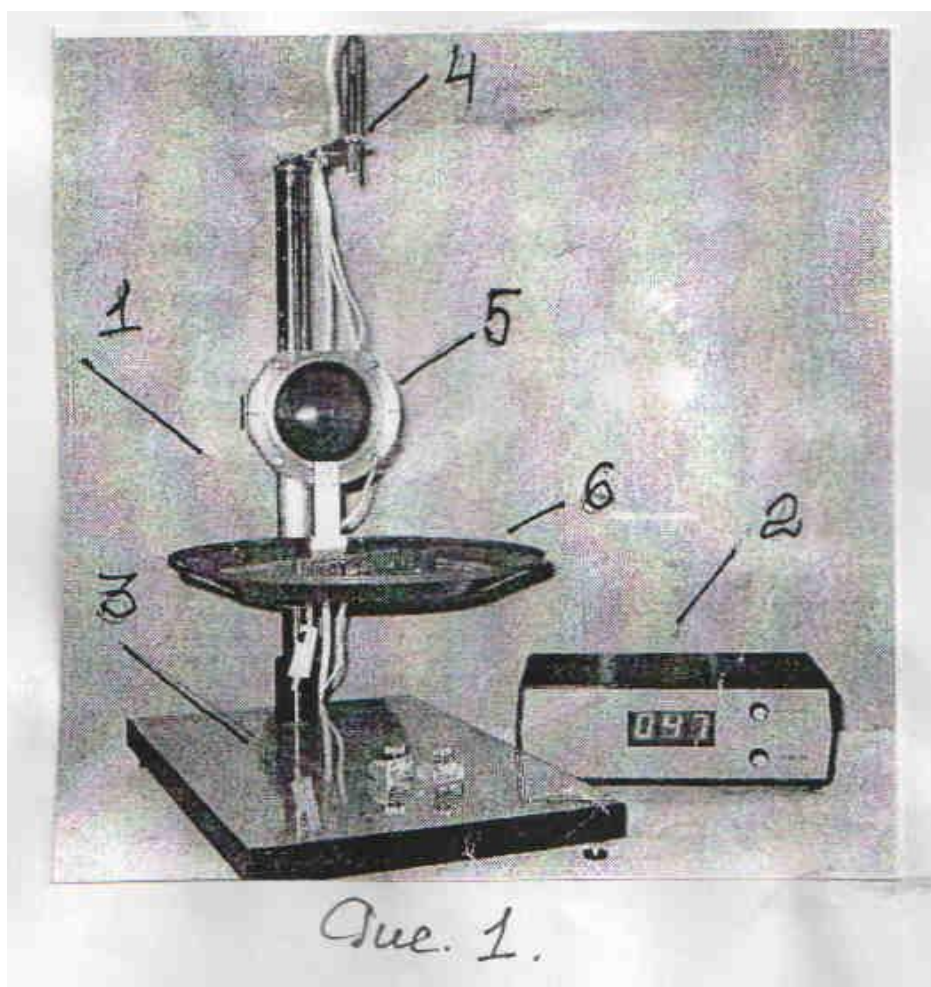
Кафедра общей физики ПГУ
Лаборатория молекулярной физики
Лабораторная работа № 227

панели размещены ручки регулировки частоты и уровня выходного напряжения генератора и цифровое табло частоты генератора.

Измерения.

Внимание! Коэффициент увеличения рассчитан для определенного положения диаскопа и ванночки на штативе, поэтому не следует изменять их положение на штативе.

1. Тщательно промыть ванночку (6) спиртом и заполнить ее исследуемой жидкостью (раствор спирта). При наполнении ванночки жидкостью и при дальнейшей работе будьте аккуратны, не погружайте пальцы в ванночку. Помните, что даже незначительные следы грязи способны существенно изменить величину поверхностного натяжения.
2. Включить установку в сеть. Установка подготовлена к работе, не следует смещать диаскоп на штативе. Положить лист белой бумаги на экран диаскопа (3).
3. Перед включением измерительного блока (2) в сеть ручки регулировки должны быть выведены в крайнее левое положение. Кнопкой СЕТЬ на задней панели измерительного блока включить устройство и дать ему прогреться в течение 2 минут.
4. Плавно вращая ручки ГРУБО и ТОЧНО регулировки частоты получить четкую волновую картину. Измерить штангенциркулем расстояние L между какими-либо двумя темными кольцами и сосчитать количество темных колец ($n=5\div 10$) между ножками штангенциркуля. Не следует штангенциркуль помещать в воду! Для одной частоты произвести не менее трех измерений для разного числа колец. Значения записать в таблицу.



Кафедра общей физики ПГУ
Лаборатория молекулярной физики
Лабораторная работа № 227

5. Повторить измерения для более высоких значений частоты генератора (не менее пяти значений частоты).
6. После окончания измерений отключить установку от сети. Вылить жидкость из ванночки, используя специальное устройство. Протереть ванночку насухо хлопчатобумажной тканью.

Обработка результатов измерений.

1. Над таблицей записать температуру, при которой проводились измерения.
2. Для каждой частоты вычислить длину волны по формуле

$$\lambda = \frac{L}{(n+1)k},$$

где k – коэффициент увеличения $k=1,3$.

3. Вычислить скорость волны по формуле $v = \lambda f$, где λ – средние значения длины волны при определенной частоте.
4. Построить график зависимости скорости распространения капиллярных волн от длины волны.
5. Построить график, изображая на оси абсцисс величину $1/f^2$, а по оси ординат λ^3 . найдите из графика угловой коэффициент полученной прямой $m = f^2 \lambda^2$ и вычислите по нему коэффициент поверхностного натяжения жидкости с помощью формулы

$$\sigma = \frac{m\rho}{2\pi},$$

где ρ – плотность следуемой жидкости, плотность 40% спирта равна $0.93 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

6. С помощью градуировочного графика определить, какой концентрации соответствует данная жидкость.

Таблица 1.

T_0								
№	$L, \text{ м}$	n	$f, \text{ Гц}$	$\lambda, \text{ м}$	$v, \text{ м/с}$	$1/f^2$	λ^3	$\sigma, \text{ Н/м}$
Ср								

Контрольные вопросы.

1. Какие силы участвуют в образовании волн на поверхности жидкости?
2. От чего зависит скорость волны? Что называется длиной волны? Какова связь между длиной волны, скоростью и периодом? Как связана скорость распространения колебаний с упругостью среды?
3. Что такое поверхностное натяжение? Объясните причину появления сил поверхностного натяжения.
4. Объясните теоретические графики на рис. 1 и рис. 2.
5. Почему получается неподвижная картина круговых волн?