

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Кафедра ФН-4

А.В. Семиколенов, К.М. Королёва, В.В. Сиваков

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом
отрыва петли

Методические указания к лабораторной работе Т-102

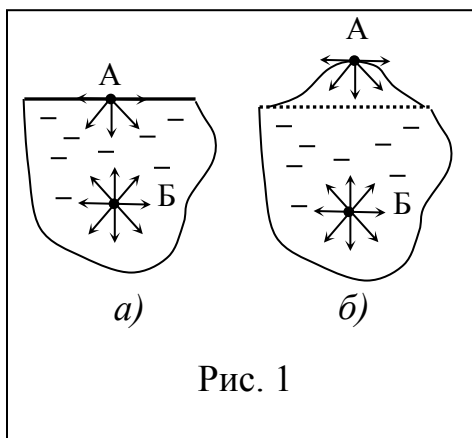
Москва, 2024 г.

Цель работы — изучение явления поверхностного натяжения жидкости, измерение коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва петли.

1. Теоретическая часть

Опыт показывает, что поверхность жидкости стремится принять такую форму, чтобы иметь минимальную площадь. Это явление связано с воздействием на поверхность жидкости механических сил, стремящихся уменьшить площадь этой поверхности. Указанные силы называются силами поверхностного натяжения.

Между молекулами жидкости действуют силы взаимного притяжения. Это приводит к тому, что на молекулы, находящиеся на поверхности жидкости (точка А на рисунке 1, а) действует усредненная результирующая сила со стороны остальных молекул жидкости, стремящаяся втянуть их внутрь. Для молекул находящихся в глубине (точка Б на рисунке 1, а) эта усредненная



результатирующая сила равна нулю. Если изменить форму поверхности жидкости, например, точку А (на рисунке 1, б) поднять вверх, то придется совершить положительную работу против межмолекулярных сил.

Опыт показывает, что существует прямая зависимость между величиной работы внешних сил и изменением площади свободной

поверхности жидкости:

$$\delta A' = \sigma \cdot dS. \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности σ называется *поверхностным натяжением жидкости*, единицы измерения Н/м.

Рассмотрим явления, возникающие на границе раздела жидкости и газа. Пусть имеется тонкая пленка жидкости (например, мыльная пленка), натянутая на рамку с одной подвижной перемычкой (рисунок 2). При медленном

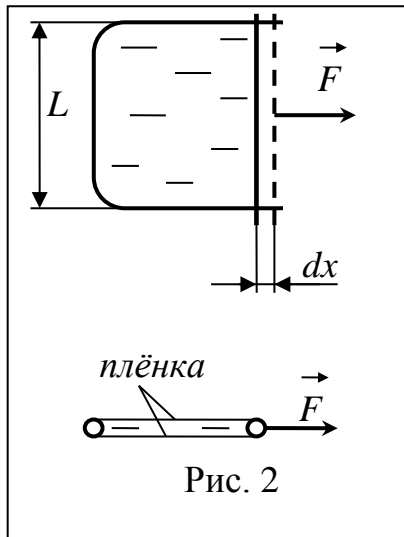


Рис. 2

перемещении перемычки под действием силы F на величину dx , площадь поверхности пленки увеличивается на величину

$$dS_{\text{пов}} = 2Ldx \quad (2)$$

Двойка в формуле (2) означает, что пленка жидкости имеет две поверхности (жидкость заключена между пленками) и, если её толщина много больше межмолекулярного расстояния, то происходит независимое воздействие двух

поверхностей пленки на перемычку. Требование медленности перемещения перемычки позволяет считать рассматриваемый процесс изотермическим и квазистатическим (обратимым).

Элементарная работа, которую необходимо совершить против сил поверхностного натяжения, с учётом (1) и (2) определяется по формуле

$$\delta A' = Fdx = \sigma dS_{\text{пов}} = \sigma 2Ldx \quad (3)$$

Из формулы (3) можно определить величину силы, приложенной к рамке

$$F = 2\sigma L \quad (4)$$

В случае, когда имеется одна пленка жидкости, сила поверхностного натяжения равна

$$F = \sigma L \quad (4')$$

Рассмотрим теперь явления, происходящие с каплей жидкости, помещенной на поверхность твердого тела. В этом случае имеются три границы раздела между фазами: газ – жидкость, жидкость – твердое тело и газ - твердое тело. Поведение капли жидкости будет определяться значениями поверхностного натяжения на указанных границах раздела.

Если сила поверхностного натяжения на границе раздела жидкости и газа будет стремиться придать капле сферическую форму, то это означает, что поверхностное натяжение на границе раздела жидкости и твердого тела будет больше поверхностного натяжения на границе раздела газа и твердого тела. В этом случае наблюдается *несмачивание* поверхности твердого тела жидкостью.

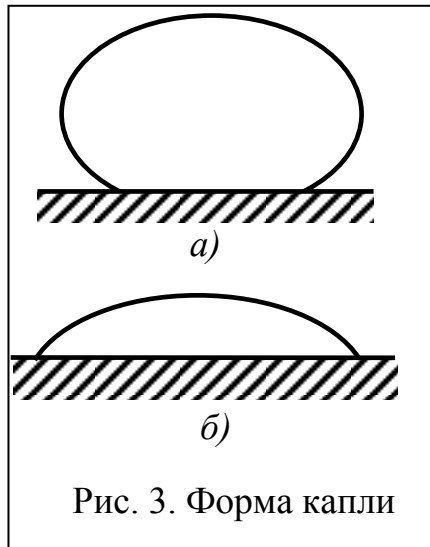


Рис. 3. Форма капли

Форма капли будет определяться равнодействующей сил поверхностного натяжения и силы тяжести. Если капля большая, то она будет растекаться по поверхности, а если маленькая - стремиться к шарообразной форме (рис. 3, а).

Если поверхностное натяжение на границе раздела жидкости и твердого тела меньше поверхностного натяжения на границе раздела газа

и твердого тела, то капля приобретет такую форму, чтобы уменьшить площадь поверхности границы раздела газ - твердое тело, то есть будет растекаться по поверхности тела (рис. 3, б). В этом случае наблюдается *смачивание* жидкостью твердого тела.

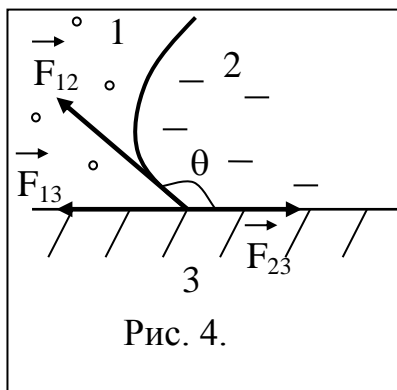


Рис. 4.

Для количественного описания смачивания жидкостью твердого тела рассмотрим равновесие сил, действующих на элемент dL контура, образованного пересечением трех границ раздела фаз: газа 1, жидкости 2 и твердого тела 3 (рис.4)

$$\vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{23} = \vec{0} . \quad (5)$$

Учитывая, что $F_{12} = \sigma_{12} dL$, $F_{13} = \sigma_{13} dL$, $F_{23} = \sigma_{23} dL$, где σ_{12} , σ_{13} , σ_{23} - поверхностные натяжения на границах раздела газ-жидкость, газ - твердое тело и жидкость - твердое тело, условие равновесия (5) вдоль горизонтальной поверхности примет вид $\sigma_{12} \cos \theta + \sigma_{23} - \sigma_{13} = 0$. Откуда

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{23}}{\sigma_{12}} . \quad (6)$$

Как следует из этой формулы (6), равновесию жидкости на поверхности твердого тела соответствует вполне определенный угол θ (отсчитываемый со стороны жидкости), который называется *краевым углом*. Этот угол может принимать значения от 0 до π .

При $\theta = 0$ наблюдается явление *полного смачивания* твердого тела жидкостью (например, капля керосина на поверхности стекла), а при $\theta = \pi$ - полное не смачивание (например, капля воды на поверхности парафина). Если краевой угол $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$, то имеет место частичное смачивание, а при $\frac{\pi}{2} < \theta < \pi$ - частичное не смачивание.

Применяемая в данной лабораторной работе методика определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости основана на измерении дополнительного (по сравнению с весом тела) усилия, необходимого для вытягивания тела в виде тонкого обруча из жидкости. Это дополнительное усилие возникает на границе соприкосновения тела с жидкостью, длина которой в случае тонкого обруча равна удвоенной длине окружности обруча. Из (4) следует

$$F = \sigma \cdot 2L \quad (7)$$

где F - величина дополнительного усилия, L — длина полосы, образующей обруч. Наличие множителя «2» в формуле (7) отражает тот факт, что граница соприкосновения обруча с жидкостью есть как на его внешней, так и на его внутренней поверхностях.

При измерении коэффициента поверхностного натяжения угол смачивания принимается как нулевой, независимо от реального угла смачивания между материалом обруча и исследуемой жидкостью. Дело в том, что непосредственно перед отрывом обруч приподнимается над поверхностью жидкости, и граница раздела жидкость в воздухе становится продолжением цилиндрической поверхности твердого тела (обруча), т.е. краевой угол становится нулевым.

2. Экспериментальная часть

2.1 Экспериментальное оборудование

На рис. 5 показана лабораторная установка для измерения коэффициента поверхностного натяжения жидкости.

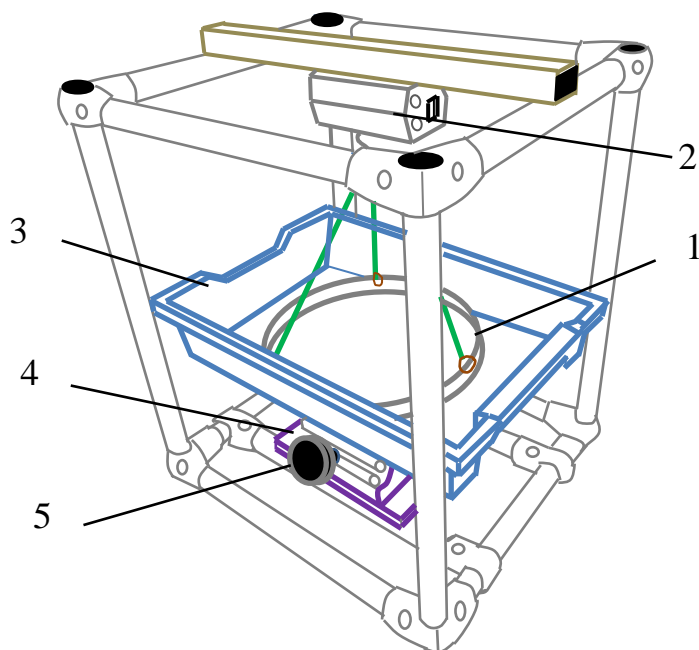


Рис. 5 Лабораторная установка

Она включает в себя тонкий металлический обруч («петлю») (1), подвешенный к крюку датчика силы (2). Обруч погружается в кювету с исследуемой жидкостью (3), размещенную на подъемном столике (4). Высота столика регулируется рукояткой (5). Снизу на дне кюветы имеется слой магнитной резины, что позволяет надежно фиксировать ее на подъемном столике. К приборам и принадлежностям также относится компьютер с необходимым программным обеспечением и соединительный USB-кабель, с помощью которого датчик силы присоединяется к компьютеру.

Для измерения коэффициента поверхностного натяжения в работе используется обруч (петля) из нержавеющей стали толщиной 0.7 мм с длиной окружности 825 мм (средний диаметр - 262.6 мм).

Подвеска обруча к датчику силы обеспечивается с помощью 3х нитей, закрепленных на металлическом кольце. Каждая из нитей крепится к обручу с помощью кольца из гибкой медной проволоки. Кольца из медной проволоки используются для выравнивания длин нитей подвеса (путем деформации кольца) и установки кольца в горизонтальной плоскости.

Предельная нагрузка на датчик силы составляет 0.2 кг.

2.2. Порядок проведения эксперимента

Указания по технике безопасности

Перед выполнением работы получите инструктаж у лаборанта. Не дотрагивайтесь до поверхности обруча, поскольку следы на его поверхности могут влиять на результаты измерений.

Соблюдайте общие правила техники безопасности работы в лаборатории "Физика".

1. Соберите экспериментальную установку согласно рис. 5, для чего опустите кювету в нижнее положение и наполните ее исследуемой жидкостью примерно на одну треть.

2. Подсоедините датчик силы к USB порту компьютера. Включите компьютер, запустите программу «Практикум по общей физике» (рис. 6). При загрузке программа должна идентифицировать присоединенный датчик и загрузить окно регистрации данных. Выберите сценарий выполнения работы «Определение коэффициента поверхностного натяжения» двойным кликом левой кнопки мыши (рис. 6).

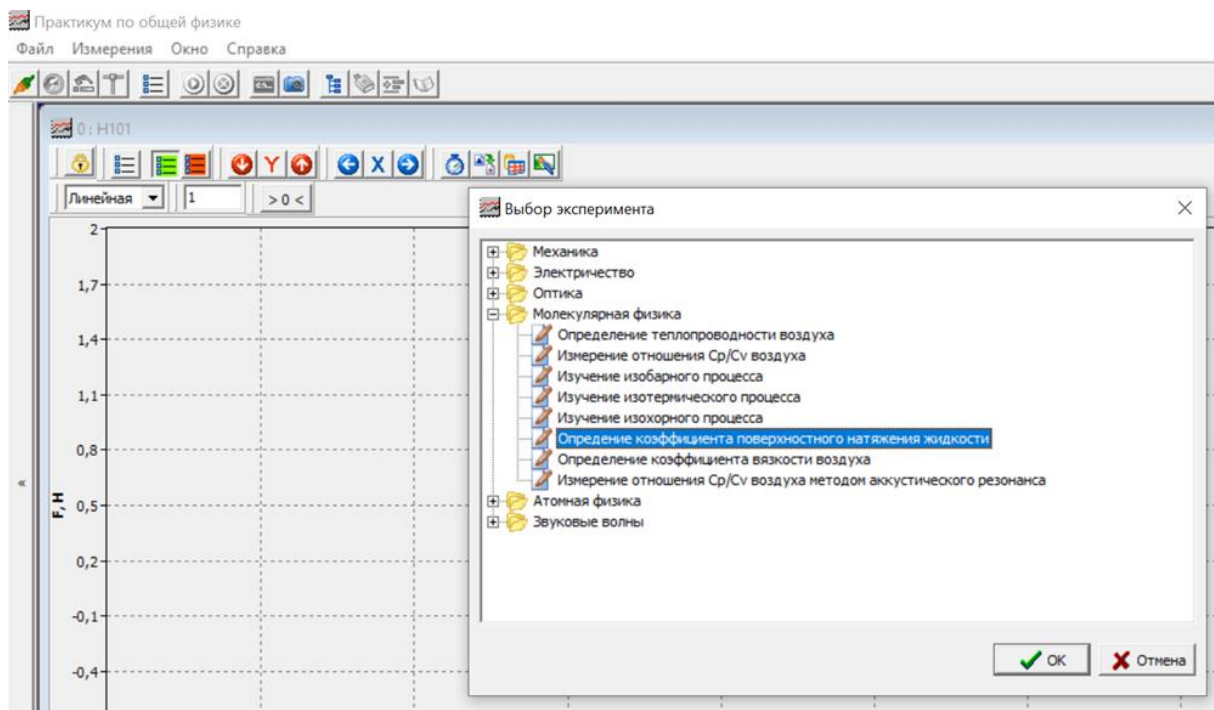


Рис. 6 Запуск программы

3. Убедитесь, что на крюке датчика силы нет нагрузки. Если к крюку подвешен

обруч, то его следует снять. Выберите в меню 1 (рис.7) режим измерений «АЦП с калибровкой». Нажмите кнопку 2 (рис.7) для использования встроенной калибровочной таблицы.

После этого проведите коррекцию нуля датчика силы. Для этого один раз нажмите экранную кнопку $> 0 <$ (кнопка 3 на рисунке 7). Кнопка «залипнет» на непродолжительное время, а потом вернётся в исходное состояние.

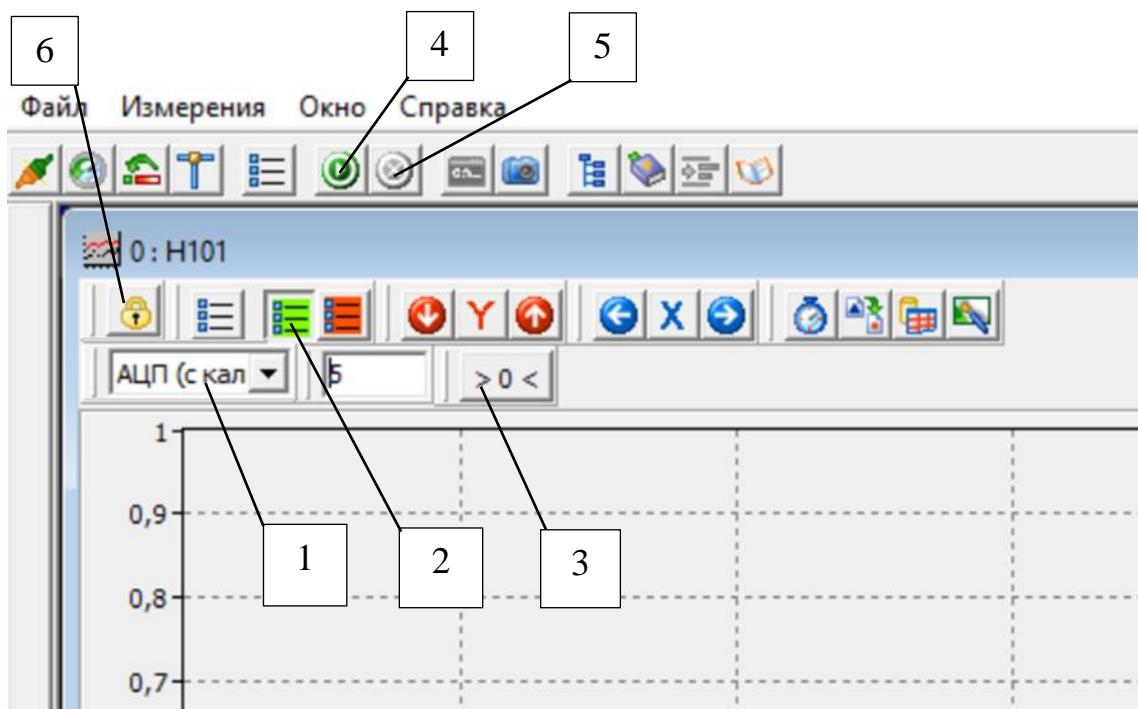


Рис. 7 . Кнопки программы

Протрите обруч салфеткой. Подвесьте обруч к датчику силы. Обруч при этом должен висеть над поверхностью воды и не касаться её.

4. Начните регистрацию данных кнопкой 4 (рис.7).

Вращая рукоятку (5) (рис. 5) по часовой стрелке, поднимите кювету до уровня, при котором обруч погрузится в жидкость, по крайней мере, на одну треть своей высоты. В окне программы появится график зависимости величины силы от времени .

5. Дайте уровню жидкости успокоиться в течение 10-15 сек, после чего плавно опускайте кювету до того момента (ручка 5, против часовой стрелки), пока обруч снова не окажется в воздухе. Когда обруч уже приподнимается над уровнем воды в кювете, но еще останется связанным с водой, следует опускать кювету с остановками (малыми шагами). Это позволяет повысить точность определения

силы поверхностного натяжения. После отрыва обруча от воды остановите регистрацию данных кнопкой 5 (рис.7).

6. Включите на экране горизонтальные маркеры кнопкой 6 (рис.7) и с их помощью измерьте значение дополнительной силы, возникающей при выдергивании обруча из жидкости. Для этого установите правой кнопкой мыши синий маркер на значение силы при сухом обруче (вес обруча), а левая кнопка мыши сиреневый маркер - на значение дополнительной силы непосредственно перед отрывом обруча (рис.8). В окне появится значение силы при отрыве.

Перепишите это значение в отчёт, в таблицу 1. (Если это значение получается отрицательным, то маркеры следует поменять местами)

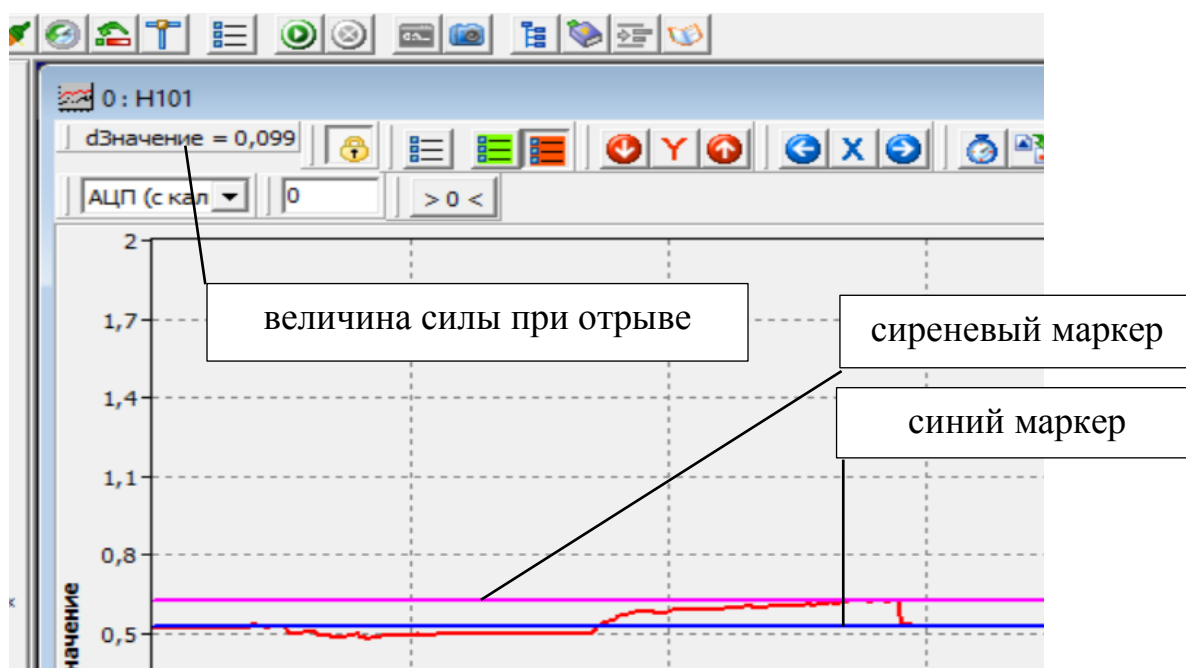


Рис. 8. Окна программы

Нажмите зеленую кнопку ПЛЮС в верхней части экрана программы справа для ввода разности указанных значений силы в таблицу окна обработки данных 7. Повторив действия, описанные в пунктах 4-6 не менее 6 раз. При каждом новом запуске будет появляться окно вопроса «Очистить таблицу накопленных данных?». Если постоянно выбирать вариант ответа «НЕТ», то в результате, получится таблица, содержащая 7 измеренных значений дополнительной силы.

2.3. Обработка результатов измерений.

Таблица 1

Экспериментальные значения силы

№	F, H
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	

1. Используя полученные результаты, определите среднее значение силы $\langle F \rangle$ и определите соответствующую полуширину доверительного интервала

$$\Delta F = t_{p,f} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \langle F \rangle)^2}{n(n-1)}}$$

Значения коэффициента $t_{p,f}$ для $P = 0,95$ можно найти в таблице 2.

Найденные значения занесите в таблицу 3.

Таблица 2.

Значения коэффициента $t_{p,f}$

$f = n - 1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P = 0.95$	12.71	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.37	2.31	2.26

2. Из (6) определите величину коэффициента поверхностного натяжения

$$\sigma = F / 2L, \text{ где } 2L = 2 \cdot \pi \cdot \langle D \rangle$$

и относительную погрешность косвенных измерений

$$\frac{\Delta \sigma}{\langle \sigma \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2}$$

При расчётах следует принять

$$\langle D \rangle = 262.6 \text{ мм}, \Delta D = 0.1 \text{ мм}, \pi \approx 3.1416, \Delta \pi / \pi \approx 3 \cdot 10^{-5}$$

Результаты вычислений занесите в таблицу 3.

Таблица 3.

Результаты обработки экспериментальных данных

$\langle F \rangle$, Н	ΔF , Н	σ , Н/м	$\Delta \sigma$, Н/м	$\sigma \pm \Delta \sigma$, мН/м

3. Контрольные вопросы

1. Что такое коэффициент поверхностного натяжения?
2. Как определяется угол смачивания? Каковы его предельные значения?
3. Почему в данной работе рассматривается полное смачивание?
4. Влияет ли кривизна свободной поверхности жидкости на давление в жидкости?

Рекомендуемая литература

1. Глаголев К.В., Морозов А.Н.. Физическая термодинамика. – М. : Изд-во МГТУ, 2004.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Молекулярная физика и термодинамика. - М. : Наука. Физматлит, 2004, 1998
3. Иродов И.Е. Физика макросистем. Основные законы. . М.-С.-П.:Физматлит, 2006, 2001.
4. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. - М.: Высшая школа, 1981.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том II. Термодинамика и молекулярная физика. - М.: Наука, 1975.