

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Национальный исследовательский
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

М.Р.Каткова

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ
ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ОТРЫВА КОЛЬЦА**

Практикум

Рекомендовано методической комиссией физического факультета
для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки
03.03.02 «Физика», 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»,
28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»,
09.03.02 «Информационные системы и технологии»

Нижний Новгород

2021

УДК 535.317
ББК 22.365
К-29

К-29 Каткова М.Р. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ОТРЫВА КОЛЬЦА: Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2021. – 16 с.

Рецензент: кандидат физ.-мат. наук, доцент **Тележников А.В.**

В работе студенты знакомятся с методикой измерения коэффициента поверхностного натяжения воды методом отрыва кольца с использованием оборудования и программного обеспечения LD Didactic. Практикум предназначен для студентов 1 курса физического факультета.

Ответственный за выпуск:
председатель методической комиссии
физического факультета ННГУ, к.ф.-м.н., доцент **Перов А.А.**

УДК 535.317
ББК 22.365

© Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, 2021

Цель работы заключается в измерении коэффициента поверхностного натяжения воды методом отрыва кольца с помощью электронного датчика силы.

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Молекулы жидкости располагаются настолько близко друг к другу, что силы притяжения между ними имеют значительную величину. Если молекула удалена от поверхности жидкости на расстояние, превышающее радиус сферы молекулярного действия, то эти силы в среднем уравниваются, и в дальнейшем ими можно пренебречь. Если молекула находится в приграничном слое, толщина которого равна радиусу сферы молекулярного действия, то появляется результирующая сила, направленная внутрь жидкости. Переход молекулы из объема жидкости в поверхностный слой связан с необходимостью совершения работы против сил, действующих в поверхностном слое. Работа, которую надо затратить, чтобы изотермически и квазистатически увеличить поверхность жидкости на единицу при сохранении ее объема неизменным, называется коэффициентом поверхностного натяжения или просто *поверхностным натяжением* [1, 2].

В общем виде термин натяжения объясняется следующим образом. Жидкое состояние возникает тогда, когда потенциальная энергия притяжения молекул превосходит по абсолютному значению их кинетическую энергию. Силы притяжения между молекулами в жидкости значительны и обеспечивают удержание молекул в объеме жидкости. Таким образом, у жидкости образуется поверхность, которая ограничивает ее объем. Поверхность, ограничивающая данный объем, зависит от формы. Из геометрии известно, что при заданном объеме минимальной поверхностью обладает шар.

При изотермических процессах роль потенциальной энергии играет свободная энергия U , для которой справедливо соотношение

$$dU = -\delta A, \quad (1)$$

где δA - работа, связанная с возникновением свободной энергии dU . В результате однородности поверхности очевидно, что свободная поверхностная энергия пропорциональна площади поверхности. Поэтому на основании сказанного выше с учетом (1) можно написать

$$U = \sigma S, \quad (2)$$

где σ — удельная плотность свободной энергии поверхности.

Так же как в механике система стремится достигнуть состояния с наименьшей потенциальной энергией, и только состояние с наименьшей потенциальной энергией является устойчивым, в термодинамике система в изотермических условиях стремится достигнуть состояния с наименьшей свободной энергией. Поэтому поверхность жидкости стремится сократиться. Благодаря этому вдоль поверхности жидкости действуют силы, называемые силами поверхностного натяжения. В этом отношении жидкость уподобляется тонкой резиновой пленке, растянутой изотропно по всем направлениям в плоскости поверхности.

Наличие поверхностного натяжения можно наглядно рассмотреть на примере мыльных пленок. Так на вынутой из мыльного раствора проволочной рамке образуется мыльная пленка (рис.1). Если проволока MN рамки $KLMN$ без сильного трения может скользить вдоль проволок LM и KN , то силы поверхностного натяжения увлекают ее по направлению к LK и площадь пленки сокращается. И, наоборот, для того, чтобы увеличить площадь мыльной пленки, необходимо к проволоке MN приложить силу \vec{F} .

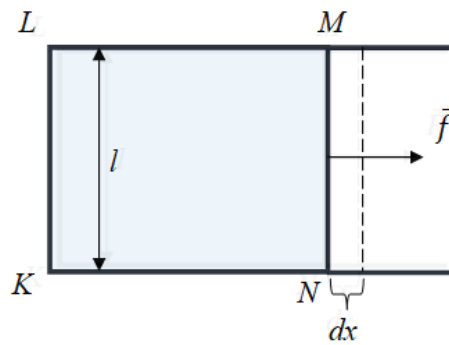


Рис. 1. Схематичное представление контура с мыльной пленкой

При смещении проволоки на dx совершается работа $\delta A = f dx$, а площадь мыльной пленки при этом изменяется на $dS = l dx$. Поэтому (1) с учетом (2) принимает вид

$$dU = 2\sigma dS = -f dx = -f \frac{dS}{l}, \quad (3)$$

где множитель 2 учитывает, что у пленки две поверхности. Тогда полученное слагаемое $-f/2l$ - это сила, отнесенная к длине MN каждой из поверхностей пленки и действующая в направлении мыльной пленки. Данная сила численно равна плотности поверхностной свободной энергии, поскольку $1\text{ Дж/м}^2=1\text{ Н/м}$. Поэтому σ называется поверхностным натяжением. Оно зависит от свойств жидкости и варьируется в широких пределах. У большинства жидкостей поверхностное натяжение имеет при 20°C значения от 10^{-2} до 10^{-1} Н/м [2].

Свободная энергия, характеризуемая σ , сосредоточена в небольшом поверхностном слое жидкости, поэтому и силы поверхностного натяжения действуют только в тонком поверхностном слое. В этом отношении тонкий поверхностный слой действует наподобие резиновой оболочки, которой окружен объем жидкости. Разница с резиновой оболочкой состоит лишь в том, что она имеет постоянное натяжение независимо от того, как изменяется поверхность жидкости в результате изменения формы занимаемого ею объема. На первый взгляд неясно, как возникают силы поверхностного натяжения, действующие вдоль поверхности. Чтобы это понять, необходимо принять во внимание, что кроме сил притяжения на молекулы поверхностного слоя действуют также и другие силы, которые не позволяют этим молекулам переместиться внутрь жидкости. Равнодействующая этих сил и обеспечивает возникновение поверхностного натяжения.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

В данной лабораторной работе предлагается провести измерение коэффициента поверхностного натяжения воды методом Дю Нуи (Du Noüy ring method [3]). Суть метода заключается в том, что в жидкость погружается кольцо некоего радиуса, и вытягиванием его из жидкости проводится измерение максимальной силы, действующей на него в момент отрыва.

Из уравнения (3) коэффициент поверхностного натяжения выражается как

$$\sigma = \frac{dU}{2dS} \quad (4)$$

При поднятии кольца на некоторое расстояние dx , площадь под ним, аналогично пленке в рамке, изменяется следующим образом:

$$dS = 2\pi R \cdot dx, \quad (5)$$

где R – радиус кольца.

Чтобы увеличить площадь поверхностного слоя на величину dS , необходимо совершить работу $\delta A = f dx$. Таким образом, учитывая соотношение (1), получаем

$$\sigma = -\frac{f}{4\pi R} = \frac{F}{4\pi R}, \quad (6)$$

где F - это сила, при которой кольцо претерпевает отрыв от поверхности жидкости. По модулю эта сила равна силе, необходимой для вытягивания кольца из воды (как если бы мы тянули кольцо вверх), но по направлению противоположна ей.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА

Измерение коэффициента поверхностного натяжения описано в Государственном стандарте Российской Федерации ГОСТ Р 50003-92 (ИСО 304-85) «Вещества поверхностно-активные. Определение поверхностного натяжения путем вытягивания жидких пленок» [4]. Стандарт описывает различные способы вытягивания жидких пленок. Рассмотрим вариант с использованием кольца.

Данный стандарт определяет геометрические размеры кольца (см. рис.2), толщину проволоки – 0,3 мм, и ее материал (платиново-иридиевого сплава). В данной работе применяется кольцо из иного материала (меди).

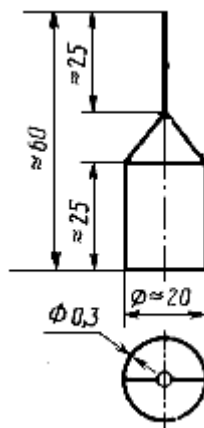


Рис. 2. Геометрические размеры кольца и его подвеса

Рассмотрим этапы измерения поверхностного натяжения на примере кольца. На рисунке 3 приведена схема измерения, а на рисунке 4 - график зависимости силы F , определяемой электронным датчиком силы, от вытеснения измерительного блока.

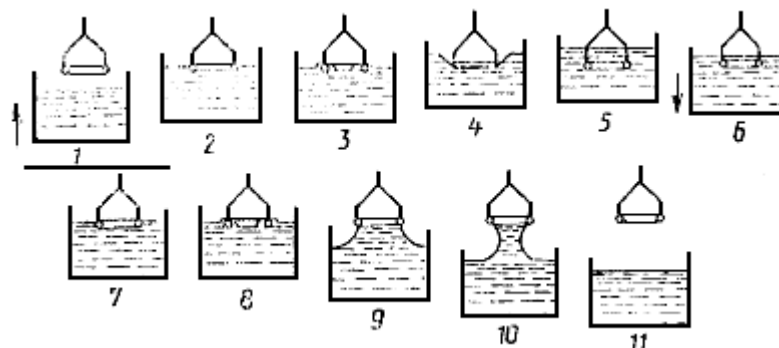


Рис. 3. Схема измерения поверхностного натяжения на примере кольца

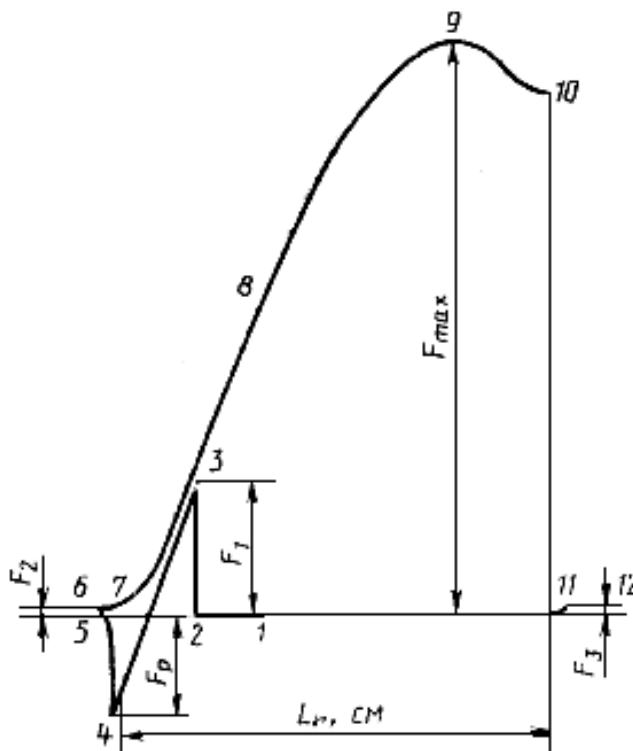


Рис. 4. Зависимость силы от вытеснения измерительного блока на примере кольца

Этапы с 1 по 6 не исследуются в данной работе и приведены для понимания всех происходящих в ходе выполнения работы процессов.

Этапы 1-5 соответствуют перемещению кольца в верхнюю часть измерительного сосуда, содержащего исследуемую жидкость, и в момент, когда кольцо погружается в жидкость.

Этапы 6-12 соответствуют перемещению кольца в нижнюю часть измерительного сосуда, содержащего исследуемую жидкость, и в момент, когда кольцо выходит из жидкости.

От этапа 1 до этапа 2 кольцо находится над поверхностью жидкости (поз.1).

На этапе 2 нижняя часть кольца касается поверхности жидкости (поз.2).

От этапа 2 до этапа 3 жидкость смачивает кольцо. Жидкость оказывает силу натяжения F_1 на кольцо (поз.3).

От этапа 3 до этапа 4 кольцо сжимает поверхность жидкости, сила натяжения F_1 уменьшается, увеличивается сила давления F_p (поз.4).

На этапе 4 кольцо пересекает поверхность жидкости.

От этапа 4 до этапа 5 сила давления F_p уменьшается. Сила натяжения F_2 , которая появляется, вызывается смачиванием нижней части кольца.

От этапа 5 до этапа 6 кольцо находится внутри жидкости (поз.5).

От этапа 6 до этапа 7 кольцо находится еще внутри жидкости (поз.6).

На этапе 7 верхняя часть кольца касается поверхности жидкости (поз.7).

От этапа 7 до этапа 10 кольцо вытягивает жидкую пленку из жидкости. Жидкость оказывает силу натяжения F на пленку (поз.8).

От этапа 7 до этапа 8 сила F изменяется линейно.

От этапа 7 до этапа 10 форма пленки жидкости изменяется непрерывно.

На этапе 9 жидкость оказывает на кольцо максимальную силу натяжения F_{max} (поз.9).

На этапе 10 пленка жидкости отделяется от кольца (поз.10).

От этапа 10 до этапа 11 сила натяжения F снижается из-за разрыва пленки. Оставшаяся сила натяжения F_3 обусловлена наличием пленки жидкости, которая остается задержанной на кольце (поз.11).

От этапа 11 до этапа 12 кольцо находится вне жидкости (поз.11).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ХОД РАБОТЫ

Установка, при помощи которой проводятся измерения поверхностного натяжения, представлена на рисунке 5. Она состоит из сообщающихся сосудов, электронного датчика силы (LD Didactic 524 060) и электронного термометра LD Didactic, состоящего из термопары NiCr-Ni (LD Didactic 666 193) и регистрирующего устройства с индикатором (LD Didactic 666 190). Датчик силы подключен к блоку обработки Sensor CASSY (LD Didactic 524 010), а он, в свою очередь, подключен к персональному компьютеру по шине USB. На компьютере установлено программное обеспечение CASSY Lab (LD Didactic 524 200).

Как видно из рисунка 5, конструкция кольца 5 подвешивается на креплении к датчику силы 6, который в свою очередь закреплен на штативе. В сосуд 1 заливается вода до необходимого уровня ниже края емкости. В воду помещается емкость малого объема 4, в которую заранее наливается исследуемая жидкость.

Перед началом испытаний необходимо очистить кольцо. Для этого требуется окунуть его в спирт, и затем промыть в достаточном объеме дистиллированной воды.

Далее датчик силы вместе с кольцом опускается до тех пор, пока кольцо полностью не погрузится под воду, и жестко закрепляется на штативе. С помощью системы кабелей подключаются модули блоков обработки 7 и 9, необходимые для датчика силы и термометра 8, настраивается программное обеспечение компьютера 10 (подробная инструкция содержится далее). Через некоторое время система приходит в состояние равновесия, и все ее элементы имеют одинаковую температуру, которую и показывает термометр. Признаком установления такого равновесия можно считать отсутствие изменений показаний термометра через 15 минут после указанных выше действий.

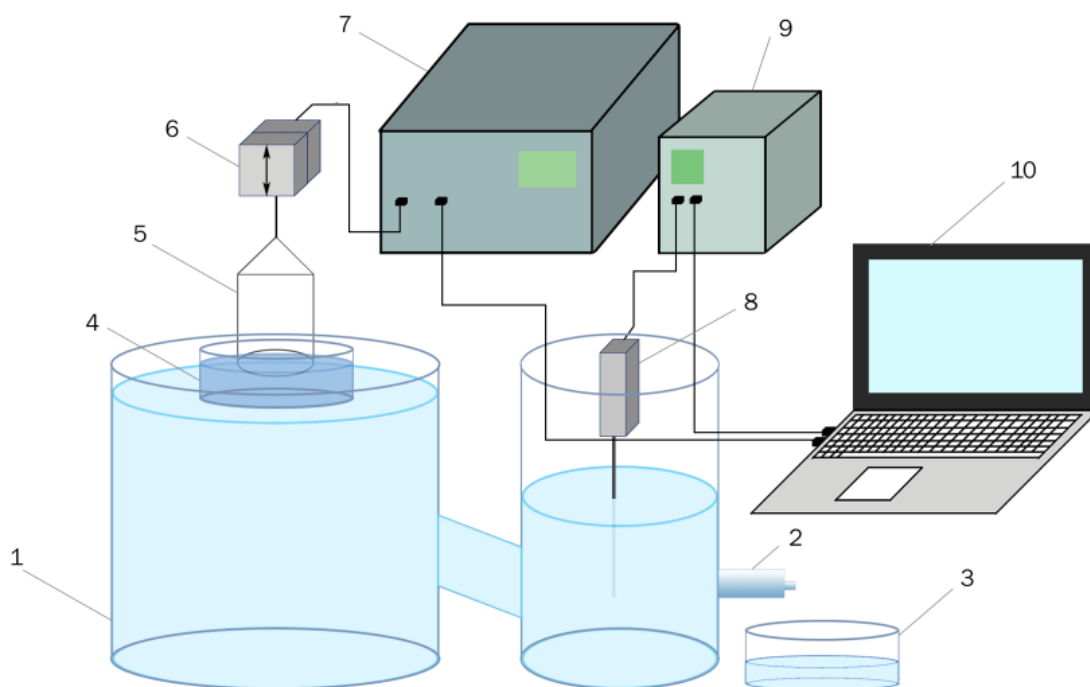


Рис. 5. Экспериментальная установка для определения поверхностного натяжения методом отрыва кольца: 1- система сообщающихся сосудов; 2 – дозатор для стока жидкости; 3 – емкость для вытекающей жидкости; 4 – емкость для исследуемой жидкости; 5 – кольцо; 6 – датчик силы; 7 – регистрирующее устройство для датчика силы (с АЦП); 8 – термопара; 9 – регистрирующее устройство для термопары с индикатором; 10 – персональный компьютер с программным обеспечением для сохранения и визуализации данных

Как только все элементы настроены, необходимо убедиться в работоспособности электронных элементов установки, т.е. проверить, реагирует ли датчик на изменения силы. После того, как установка будет полностью готова к работе, можно начинать измерения. Целесообразно сначала запустить регистрацию измерения величины силы F на компьютере, а затем откупорить герметичный колпачок дозатора 2 и пустить поток воды, который должен поступать в дополнительную емкость 3. Сразу после начала измерений, программное обеспечение отображает значение силы, установленное для датчика силы с помощью программного обеспечения, как нулевое. После отрыва кольца, прежде всего, следует прекратить вытекание воды, для чего требуется закрыть герметичный колпачок дозатора 2.

Далее требуется остановить сбор данных с датчика силы и зафиксировать температуру, отображаемую термометром. Результаты измерений должны быть сохранены в виде отдельного файла (или нескольких файлов) для их последующей обработки. Потребуется отобразить график изменения величины силы, определенной датчиком в зависимости от времени, а также определить максимальное значение силы, соответствующее отрыву кольца. По результатам измерений необходимо вычислить значение коэффициента поверхностного натяжения.

КРАТКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ CASSY Lab

В данной лабораторной работе для обработки получаемых в ходе эксперимента данных используется программное обеспечение CASSY Lab, устройством сопряжения с персональным компьютером для которого является Sensor-CASSY. Оба этих компонента произведены фирмой LD Didactic GmbH.

SENSOR-CASSY

Для проведения данного эксперимента используется Sensor-CASSY, который подключается к USB-порту персонального компьютера. Sensor-CASSY представляет собой устройство для записи экспериментальных данных (рис.6).

На данном блоке обработки имеется 5 аналоговых разъемов: цифрой 1 на рисунке 3 обозначены два аналоговых входа напряжения А и В с 4-мм гнездами, цифрой 2 – один аналоговый вход тока А с 4-мм гнездом, 3 – два аналоговых входа для подключения различных дополнительных модулей и датчиков. Существуют также гнезда 4-мм для подключения нулевых («минусовых») проводов (обозначенные цифрой «4» на рис.6). Для передачи данных на персональный компьютер имеется разъем 5 для кабеля USB. Адаптер переменного тока с выходным напряжением 12 В подключается к гнезду 6. Цифрой 7 обозначен один аналоговый выход с максимальным значением переменного напряжения 16 В. В данной работе к одному из разъемов 3 подключаются датчик силы, данные с которого фиксируются и передаются на персональный компьютер посредством кабеля USB.

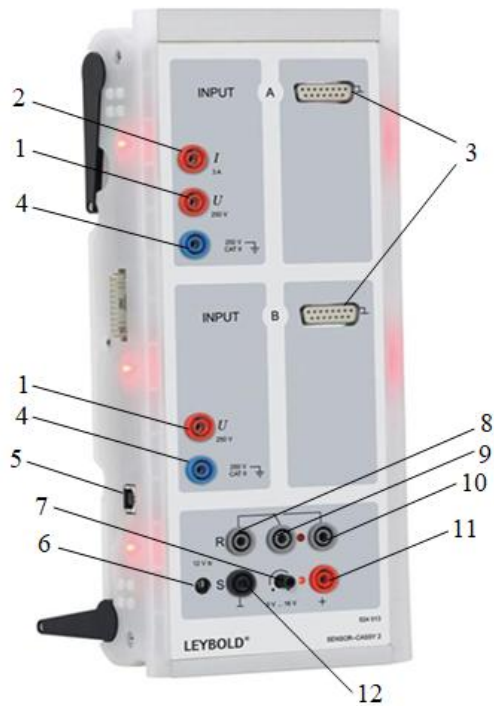


Рис.6. Внешний вид устройства Sensor-CASSY

CASSY Lab

Приведем описание программного обеспечения CASSY Lab 2 (версии 2.25), необходимое для получения и визуализации данных эксперимента [5].

Первое, что необходимо сделать, - это осуществить запуск приложения. После этого появится окно со сведениями о данной программе (рис.7). Если окно не пропало, необходимо его закрыть или нажать на кнопку «ОК» в нижней части.

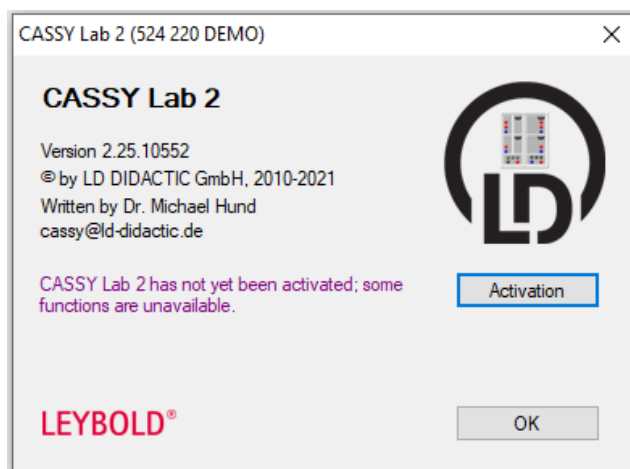


Рис. 7. Окно со сведениями о программе CASSY Lab 2

Далее, при условии, что блок обработки уже подключен к компьютеру, появится окно выбора каналов, в котором во вкладке «CASSY» будет схематично изображен подключенный блок обработки (рис.8). Для запуска измерений необходимо нажать левой кнопкой мыши на изображения необходимых входов, с помощью которых проводятся измерения. В нашем случае следует кликнуть на кнопку с обозначением « F_{A1} ».

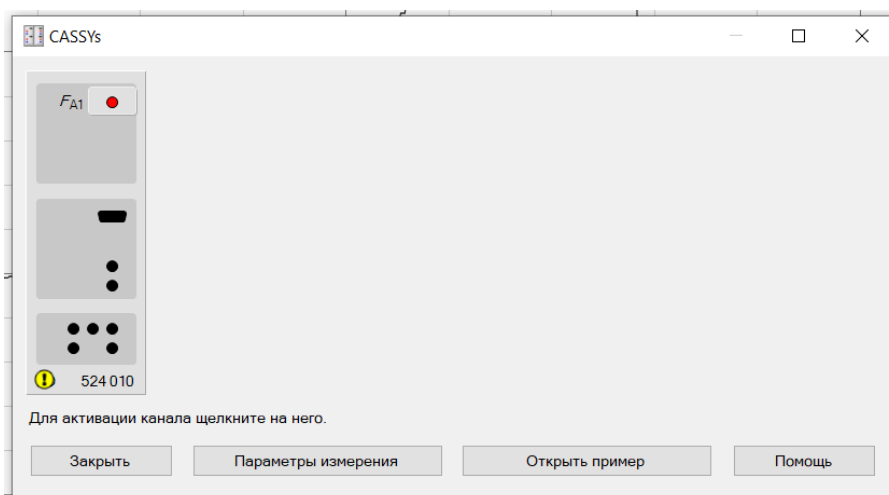




Рис. 8. Окно выбора каналов

Далее нажатием иконки  в верхнем меню вызывается окно «Установки» справа от области построения графика (рис.9). Нажав на строку с названием интересующего нас канала («Сила F_{A1} »), ниже появляется возможность выбора параметров измерений. Здесь можно установить предполагаемые пределы измерений, либо задать их автоматически. Для данной лабораторной работы рекомендуется задать пределы измерений от -10 до 10 мН, и выставить усреднение значений в 500 мс. В этом же окне происходит сброс значений с датчика в ноль.

После момента начала измерений в таблицу слева от окна графика заносится массив измерений. Через установленный в параметрах измерения («Measuring parameters») интервал времени измерения повторяются, и в таблицу заносится новая строка измерений. Измеренный массив данных можно редактировать непосредственно в таблице. Для этого в таблице выбирается интересующая ячейка и редактируется с клавиатуры. Удалить

полученные значения можно вызвав контекстное меню, щелкнув правой кнопкой мыши в окне с таблицей, либо в окне с графиком.

После того, как все настройки завершены, можно начинать измерения, нажав на клавишу F_9 , либо на кнопку  в панели инструментов. Повторное ее нажатие приостанавливает измерения.

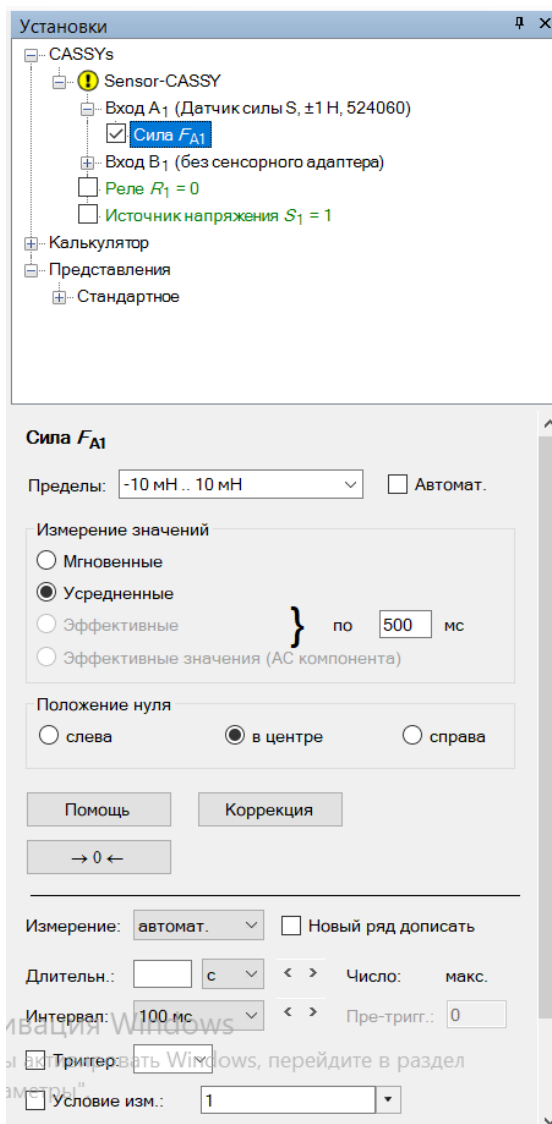


Рис.9. Окно «Settings»

По завершении измерений файл с результатами может быть сохранен в формате (*.labx) и использован для самостоятельной дальнейшей обработки в программе CASSY Lab 2, либо CASSY Lab (v.1.75), использование которой аналогично приведенному выше описанию для версии 2. Также есть возможность сохранить файл в формате (*.txt) в виде таблицы для

дальнейшей обработки в любой удобной программе, либо в формате (*.csv), который позволяет сразу открывать файл с данными в программе MS Excel.

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое коэффициент поверхностного натяжения жидкости? Чем обусловлено существование сил поверхностного натяжения?
2. Дайте определение поверхностной энергии. Почему жидкость стремится сократить свою площадь?
3. Нарисуйте схематически график изменения силы поверхностного натяжения в процессе поднятия кольца и объясните, какой участок соответствует отрыву и почему.
4. Определите коэффициент поверхностного натяжения жидкости, рассчитайте для полученного значения погрешность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики: в 5 т. – М.:ФИЗМАТЛИТ, 2005. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. –551 с.
2. Матвеев А.Н. Курс общей физики: в 5 т. – М.: Высшая школа, 1981. Т. 2. Молекулярная физика; Учеб. пособие для вузов. – 400 с.

СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

3. A NEW APPARATUS FOR MEASURING SURFACE TENSION. By P. LECOMT DU NOUY. (From the Laboratories of The Rockefeller Institute for Medical Research.) Received for publication, March 31, 1919.
4. ГОСТ Р 50003-92 (ИСО 304-85) «Вещества поверхностно-активные. Определение поверхностного натяжения путем вытягивания жидких пленок».
5. CASSY® Lab Руководство (524 210) LD Didactic GmbH.

Мария Ридовна **Каткова**

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ
ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ ОТРЫВА КОЛЬЦА**

Практикум

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.