

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

**Экспериментальное получение
коэффициента поверхностного
натяжения σ разных жидкостей и
определения рабочего диапазона
установки**

Автор:
Егор ФЕТИСОВ

Научный руководитель:
Александр Степанович
ЗОЛКИН

25 мая 2016 г.

1 Аннотация

В данной работе представлено экспериментальное получение коэффициента поверхностного натяжения(КПН) жидкости. Также проверяется зависимость КПН от температуры. Устанавливается рабочий диапазон установки. В работе приводится разбор экспериментов проведенных автором работы. Исследовалось несколько видов жидкостей. Неорганические жидкости: Вода, Органические жидкости: Глицерин. Измерения проводились при температурах: 25 и 45, 50 градусов Цельсия.

2 Введение

Силы поверхностного натяжения играют важную роль в таких областях как металлургия, нефтедобыча, строительство и лакокрасочная промышленность. В металлургии они используются в качестве смазки прокатных станков и действуют при очень высоких температурах, при которых не имеется возможности использовать масло из-за его горючести. В строительстве ПАВ добавляют в цемент, что позволяет увеличить водостойкость, морозостойкость и прочность затвердевшего материала. В лакокрасочной промышленности ПАВ используют для снижения силы поверхностного натяжения, что позволяет краскам проникать в маленькие углубления поверхности и их заполнение с вытеснением при этом оттуда другого вещества (например, воды). В нефтедобыче ПАВ используют для гидрофобизации при забойных зон пласта, что позволяет увеличить нефтеотдачу и сократить потери нефти.

Коэффициент поверхностного натяжения изучался достаточно продолжительное время на сегодня для него получены ряд важных научных теорий, некоторые из них приведены ниже.

3 Методика выполнения эксперимента:

3.1 Описание экспериментальной установки:

Генератор переменного напряжения, импульсный источник света, вибратор, кювета, набор исследуемых жидкостей. Импульсный источник света и вибратор (генератор волн) питаются от

одного и того источника переменного тока. Генератор волн представляет собою электродинамическую систему электромагнитного реле, к якорю которой прикреплена пластина, передающая колебания исследуемой среде.

Прозрачная кювета с исследуемой жидкостью помещается на просмотровом столике таким образом, чтобы пластина вибратора лишь слегка касалась жидкости в центре кюветы. Увеличенное неподвижное изображение волн проецируется на экран. Коэффициент увеличения = 0.54 для воды и 0.49 для глицерина. Допустимая погрешность эксперимента от 2 до 8 σ

4 Научная составляющая

Для грамотного понимания эксперимента рассмотренного далее необходимо ввести ряд физических понятий которые будут измеряться в данной работе.

4.1 Явление поверхностного натяжения

Поверхностное натяжение — термодинамическая характеристика поверхности раздела двух находящихся в равновесии фаз (состояний вещества), определяемая работой обратимого изотермического образования единицы площади этой поверхности раздела при условии, что температура, объем системы и химические потенциалы всех компонентов в обеих фазах остаются постоянными. Поверхностное натяжение имеет двойной физический смысл — энергетический и силовой. Энергетическое (термодинамическое) определение: поверхностное натяжение — это удельная работа увеличения поверхности при её растяжении при условии постоянства температуры. Силовое (механическое) определение: поверхностное натяжение — это сила, действующая на единицу длины линии, которая ограничивает поверхность жидкости. Почему называют поверхностным натяжением? Для ответа на этот вопрос рассмотрим следующий опыт. Если проволочный каркас с подвижной перемычкой АВ, поместить в мыльный раствор, то на нем образуется мыльная пленка — тонкий слой жидкости с двумя свободными поверхностями. Опыт показывает, что пленка стремится сократиться (уменьшить площадь поверхности). Чтобы удержать в равновесии перемычку АВ, к ней

надо приложить определенную силу. Найдём связь между этой силой и величиной σ . Для этого изотермически увеличим силу F на бесконечно малую величину δF . Тогда перемычка начнёт медленно перемещаться вниз, при смещении на ΔX , прирост площади составит $\Delta S = 2l\Delta X$. Для этого надо совершить работу $\Delta A = 2\sigma l\Delta X$. С другой стороны Работа равна $F\Delta X$. Приравнявая два уравнения находим, что $\sigma = \frac{F}{2l}$ Таким образом, пленка находится в состоянии натяжения. В таком же состоянии натяжения находится вообще поверхность любой жидкости. Жидкость ведет себя так, как будто она помещена в эластичный (например, резиновый) мешок. Конечно, эта аналогия является внешней. При растяжении резиновой пленки сила пропорциональна степени растяжения, тогда как сила поверхностного натяжения от площади поверхности не зависит. Силы поверхностного натяжения приводят к тому, что, если поверхность жидкости искривленная, то в условиях равновесия давления по разные стороны поверхности отличаются:

$$P_{\text{в}} - P_{\text{н}} = \sigma(1/R_{\text{в}} + 1/R_{\text{н}}) = \sigma K \quad (1)$$

Здесь левая часть равенства есть разность давлений внутри жидкости и снаружи. $R_{\text{в}}$ и $R_{\text{н}}$ радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных сечений поверхности жидкости. Радиус кривизны считается положительным, если соответствующее сечение выгнуто в сторону жидкости, в противном случае он считается отрицательным. Формула 7 является формулой Лапласа. Величина K равна сумме обратных радиусов кривизны называется кривизной поверхности. С увеличением температуры величина поверхностного натяжения уменьшается и равна нулю при критической температуре. Наиболее известная эмпирическая зависимость поверхностного натяжения от температуры была предложена Лорандом Этвёшем, так называемое правило Этвёша. В настоящее время получен вывод теоретической зависимости поверхностного натяжения от температуры в области до критических температур, подтверждающей правило Этвёша (журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета», 2012, вып. 1, с. 24-28).

4.2 Правило Этвёша

"The first assumption of the Eötvös rule is: 1. The surface tension is a linear function of the temperature. This assumption is approximately fulfilled for most known liquids. When plotting the surface tension versus the temperature a fairly straight line can be seen which has a surface tension of zero at the critical temperature. 2. The temperature dependence of the surface tension can be plotted for all liquids in a way that the data collapses to a single master curve. To do so either the molar mass, the density, or the molar volume of the corresponding liquid has to be known."Первое предположение правила Этвёша является: 1. Поверхностное натяжение является линейной функцией температуры. Это предположение приближенно выполняется для большинства известных жидкостей. При построении поверхностного натяжения в зависимости от температуры довольно прямую линию можно увидеть, который имеет поверхностное натяжение, равное нулю при критической температуре. 2. Температурная зависимость поверхностного натяжения могут быть построена для всех жидкостей таким образом, что данные коллапсирует к одной аппроксимирующей кривой. Для этого молекулярная масса, плотность или молярный объем соответствующей жидкости должны быть известны.

4.3 Волны

Волны – это возмущение точек среды, распространяющееся в пространстве. Для передачи таких возмущений, необходимы силы. Волны бывают двух видов: продольные и поперечные. Если продольные волны образуются в любой среде, так как для образования их не нужны большие силы, то поперечные образуются только в твердых. Исключением из этого правила являются волны на поверхности жидкости или на границе раздела двух жидкостей. В образовании и распространении этих волн определяющую роль играют силы поверхностного натяжения и силы тяжести, действующие на частицы жидкости. В зависимости от природы восстанавливающих сил волны на поверхности жидкости подразделяются на капиллярные волны (если преобладают силы поверхностного натяжения) и гравитационные (если преобладают силы тяжести). Если же в формировании волны обе силы играют существенную роль, то волны называют

гравитационно-капиллярными.

4.4 Гравитационно-капиллярные волны

Гравитационные волны на воде — разновидность волн на поверхности жидкости, при которых сила, возвращающая деформированную поверхность жидкости к состоянию равновесия, есть просто сила тяжести, связанная с перепадом высот гребня и впадины в гравитационном поле. Найдем выражение для скорости распространения гравитационно-капиллярных волн. Для упрощения задачи рассмотрим случай невязкой и несжимаемой жидкости. Кроме того, будем считать, что амплитуда волны (половина высоты между гребнем и подошвой волны) много меньше ее длины. При распространении таких волн, как показывают уравнения гидродинамики и экспериментальные исследования, частицы жидкости совершают движение по окружности, расположенной в вертикальной плоскости. Радиус окружности r для частиц на поверхности жидкости равен амплитуде волны. Частицы в глубине жидкости вращаются по окружностям меньшего радиуса. Период вращения частиц T связан с длиной волны λ и скоростью волны c очевидным соотношением:

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad (2)$$

Модуль скорости вращения частиц поверхности жидкости v равен

$$v = 2\pi r/T = 2\pi r c/\lambda \quad (3)$$

Поскольку по условию r много меньше λ , то v много меньше c . Направим ось X по невозмущенной поверхности жидкости в сторону распространения волны, а ось Z — вертикально вниз. Тогда координаты x и z некоторой выделенной частицы поверхности жидкости в зависимости от времени t , отсчитываемые от ее положения равновесия, будут описываться уравнениями:

$$x = r \cos(2\pi t/T) = r \cos(2\pi ct/\lambda) \quad (4)$$

$$y = r \sin(2\pi t/T) = r \sin(2\pi ct/\lambda) \quad (5)$$

Соответствующие компоненты скорости будут тогда равны:

$$v_x = -(2\pi r c/\lambda) (\sin(2\pi ct/\lambda)) \quad (6)$$

$$v_y = (2\pi r c \lambda) (\cos(2\pi c t / \lambda)) \quad (7)$$

Вращение соседних точек поверхности жидкости описывается уравнениями, аналогичными (2, 3, 4, 5) но со сдвигом по фазе. Сдвиг фазы для частицы, находящейся на расстоянии X равен

$$\Delta\phi = -2\pi\Delta X/\lambda \quad (8)$$

Рассмотрим движение жидкости в системе отсчета, движущейся со скоростью c в направлении распространения волн. В этой системе волны будут неподвижны, а движение частиц приповерхностного слоя жидкости будет складываться из равномерно-поступательного со скоростью $-c$ и вращения со скоростью v . В данной системе отсчета течение жидкости стационарно, т.е. в каждой точке скорость течения постоянна по абсолютной величине и направлению. Для стационарного течения невязкой и несжимаемой жидкости справедлив закон Бернулли. Согласно этому закону вдоль траектории движения частицы жидкости (т.н. трубки тока) остается постоянной следующая величина:

$$P + \frac{\rho v^2}{2} + \rho g h = const \quad (9)$$

Здесь P – давление в точке пространства, где расположен рассматриваемый элемент жидкости; ρ – плотность жидкости; v – скорость частицы жидкости; h – высота, на которой находится рассматриваемый элемент жидкости; g – ускорение свободного падения. По своей сути закон Бернулли является частным случаем закона сохранения энергии для стационарного потока идеальной (то есть без внутреннего трения) несжимаемой жидкости. Применим закон Бернулли для элемента жидкости, движущегося в приповерхностном слое. В рассматриваемой системе отсчета скорость течения в точке А равна $c-v$, а в точке В – $c+v$. Тогда из уравнения Бернулли (9) следует, что

$$P_a + \frac{\rho}{2}(c-v)^2 + 2\rho g r = P_b + \frac{\rho}{2}(c+v)^2 \quad (10)$$

или

$$2\rho c v = 2\rho g r + (P_a - P_b) \quad (11)$$

Произведём замены v и разности давлений по формуле Лапласа. Найдём форму поверхности жидкости. Очевидно, что это форма траектории частицы жидкости в системе отсчёта движущейся со

скоростью c в направлении распространения волн. При переходе в движущуюся систему координат, и z вертикальная компонента скорости v_z не меняется. Горизонтальная компонента преобразуется согласно закону относительности Галлилея ($-c$ в силу малости v) Таким образом в данной системе координат положение частицы приблизительно описывается по формулам:

$$x = -ct; z = r \sin(2\pi ct\lambda) \quad (12)$$

В точках Минимума и Максимума Коэффициента Кривизны равны

$$K_a = \frac{4\pi^2 r}{\lambda^2}; K_b = -\frac{4\pi^2 r}{\lambda^2} \quad (13)$$

Подставляя в уравнение 11 находим скорость распространение волн

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}} \quad (14)$$

Представляя $c=f*\lambda$ Выразим σ

4.5 Метод бегущих волн

При возмущении жидкости осциллятором «лежащим» на её поверхности, по ней начинает распространяться круг волн. Если просветить кювету с жидкостью импульсным источником света с частотой равной частоте возмущения, то на экран проецируется «стоячая» волновая картина. Далее изображение переносится на бумагу. Измеряя длину волны на экране и геометрически пересчитывая её (зная расстояние от источника света до поверхности жидкости и расстояние от поверхности до экрана, а также про подобие треугольников) можно получить величину поверхностного натяжения по формуле:

$$\sigma = (\rho\lambda^2/4\pi^2)(2\pi\lambda f^2 - g); \quad (15)$$

Следует помнить о том, что жидкость преломляет лучи света, идущие от источника, и необходимо учитывать коэффициент преломления

4.6 Порядок проведения курсовой работы

- 1) Перед началом работы тщательно промыть и обезжирить кювету и осторожно налейте в нее исследуемую жидкость. Уровень жидкости должен составлять 0,7–1 см, т. е. быть настолько высоким, чтобы дно кюветы не оказывало влияния на процесс образования и распространения волн.
- 2) Установить кювету на просмотровый столик, привести пластину вибратора в соприкосновение с поверхностью жидкости примерно в центре кюветы.
- 3) Предварительно поставив ручку регулировки выходного напряжения генератора переменного тока в нулевое положение, включить генератор в сеть. После включения установить заданную частоту и по возможности минимальное напряжение, необходимое для устойчивой работы вибратора и импульсного источника света.
- 4) Приступить к измерению длин волн на различных частотах генератора и, используя расчетную формулу (11), определить коэффициент поверхностного натяжения предложенных для исследования жидкостей. Так как точность получаемых результатов невысока, измерения для каждой жидкости и каждой частоты проводить многократно, 5–7 раз дублируя их.

5 Экспериментальные данные

5.1 Первичные данные

Частота	Длина волны (см)	Частота	Длина волны (см)
90 Гц	0,6	130 Гц	0,3
90 Гц	0,5	130 Гц	0,4
90 Гц	0,7	130 Гц	0,2
90 Гц	0,8	130 Гц	0,4
100 Гц	0,8	140 Гц	0,3
100 Гц	0,9	140 Гц	0,3
100 Гц	0,7	140 Гц	0,2
100 Гц	0,6	140 Гц	0,1
110 Гц	0,5	150 Гц	0,2
110 Гц	0,6	150 Гц	0,2
110 Гц	0,7	150 Гц	0,3
110 Гц	0,5	150 Гц	0,1
120 Гц	0,5	160 Гц	0,2
120 Гц	0,4	160 Гц	0,3
120 Гц	0,3	160 Гц	0,4
120 Гц	0,4	160 Гц	0,2

Таблица 1: Таблица экспериментально снятых Длин волн при разных частотах

5.2 Обработка данных эксперимента

По данным полученным в результате эксперимента производится усреднение в соответствии с частотами, на которых получены данные. Основываясь на таблице 1, составляется таблица 18.

Частота Гц	Средняя длина волны (см)
90	0.65
100	0.63
110	0.52
120	0.46
130	0.46
140	0.49
150	0.45
160	0,26

Таблица 2: Таблица средних значений длин волн по всем частотам

Основываясь на формуле 7 произвожу вычисление коэффициента поверхностного натяжения для воды:
При разных частотах получаются следующие значения:

Частота Гц	КПН (дин/см)
90	85,14
100	87,74
110	78,04
120	64,97
130	76,98
140	82,86
150	76,25
160	74,23

Таблица 3: Таблица коэффициентов поверхностного натяжения для воды при 25 градусах Цельсия

Среднее значение КПН для данных частот составляет 75.85 дин/см
Табличное значения коэффициента поверхностного натяжения для воды 72,54 дин/см. (www.wikipedia.org/wiki/Поверхностное_натяжение)

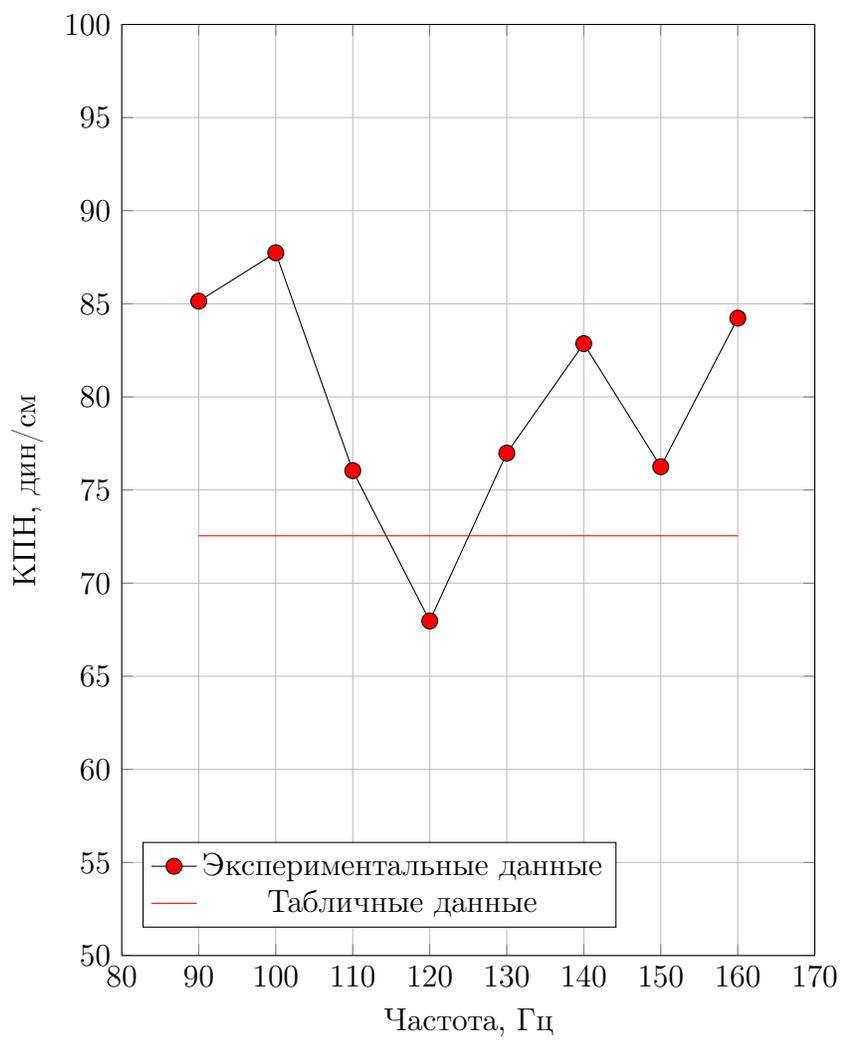


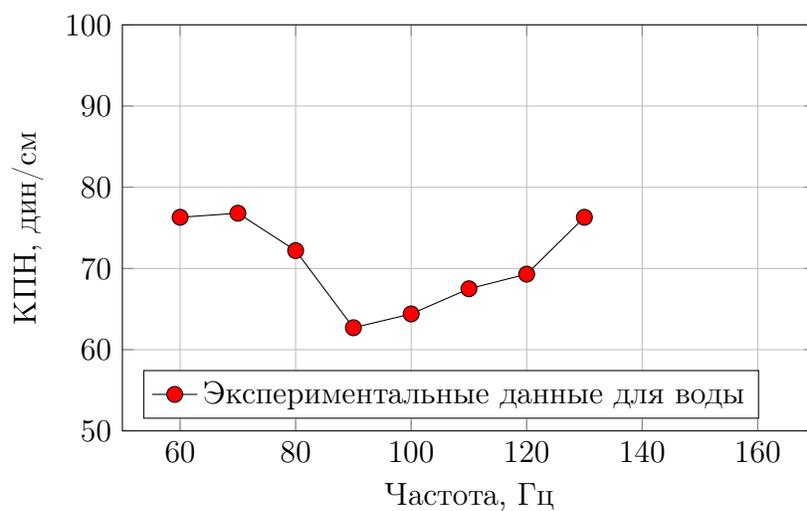
График №1 экспериментальных данных

Частота (Гц)	Средняя длина волны (см)
60	0,85
70	0,67
80	0,60
90	0,54
100	0,5
110	0,55
120	0,5
130	0,4

Таблица 4: Средняя длина волны при температуре воды в 50 градусов

Частота (Гц)	КПН (дин/см)
60	80,6
70	76,8
80	72,2
90	62,7
100	64,4
110	67,5
120	69,3
130	76,3

Таблица 5: КПН воды при 50 градусах



6 Оценка погрешностей

В данной работе было проведено более 30 измерений на каждую частоту. Следовательно имеет место указать среднеквадратичное отклонение для экспериментальных частот. Среднеквадратичное отклонение вычисляется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - x_{\text{ср}})^2} \quad (16)$$

Частота	СКО
90	0.13
100	0.12
110	0.08
120	0.10
130	0.07
140	0.07
150	0.06
160	0.06

Таблица 6: таблица среднеквадратичных отклонений для исследуемых частот

Далее необходимо вычислить погрешность самого коэффициента поверхностного натяжения. В формуле 7 лишь два параметра погрешности которых можно учесть таким образом формула для подсчета погрешности выглядит следующим образом:

$$\Delta\sigma = \pm\sigma_{\text{ср}} \sqrt{\left(\frac{3 * \Delta\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{2 * \Delta f}{f}\right)^2} \quad (17)$$

Таким образом относительная погрешность $\sigma = 5.43$ дин/см, для воды при 25 градусах и 2.3 дин/сам для воды при 50 градусах. Таким образом учитывая что стандартное отклонение равняется 1 дин/см. Т.е. можно сказать, что значение полученное мною лежит в пределах $\pm 2\sigma$ для обоих случаев (СКО не путать с КПН!!!)

7 Экспериментальные данные для Глицерина 30%

7.1 Первичные данные

Частота	Длина волны (см)	Частота	Длина волны (см)
60 Гц	0,7	100 Гц	0,7
60 Гц	0,9	100 Гц	0,5
60 Гц	0,8	100 Гц	0,6
60 Гц	0,8	100 Гц	0,5
70 Гц	0,7	110 Гц	0,4
70 Гц	0,9	110 Гц	0,5
70 Гц	0,6	110 Гц	0,6
70 Гц	0,5	120 Гц	0,5
80 Гц	0,4	120 Гц	0,4
80 Гц	0,5	120 Гц	0,5
80 Гц	0,4	120 Гц	0,3
80 Гц	0,6	130 Гц	0,2
90 Гц	0,5	130 Гц	0,3
90 Гц	0,4	130 Гц	0,4
90 Гц	0,6	130 Гц	0,2

Таблица 7: Таблица экспериментально снятых Длин волн(на глицерине) при разных частотах

7.2 Обработка данных эксперимента

По данным полученным в результате эксперимента производится усреднение в соответствии с частотами, на которых получены данные. Основываясь на таблице 1, составляется таблица 18.

Частота Гц	Средняя длина волны (см)
60	0.46
70	0.43
80	0.36
90	0.34
100	0.32
110	0.31
120	0.28
130	0.28

Таблица 8: Таблица средних значений длин волн по всем частотам

Основываясь на формуле 7 произвожу вычисление коэффициента поверхностного натяжения для воды:
При разных частотах получают следующие значения:

Частота Гц	КПН (дин/см)
60	54,41
70	63,21
80	49,16
90	54,58
100	54,62
110	63,17
120	53,58
130	55,62

Таблица 9: Таблица коэффициентов поверхностного натяжения для воды при 25 градусах Цельсия

Среднее значение КПН для данных частот составляет 54.64 дин/см
Табличное значения коэффициента поверхностного натяжения для воды 68 дин/см. (www.wikipedia.org/wiki/Поверхностное_натяжение)

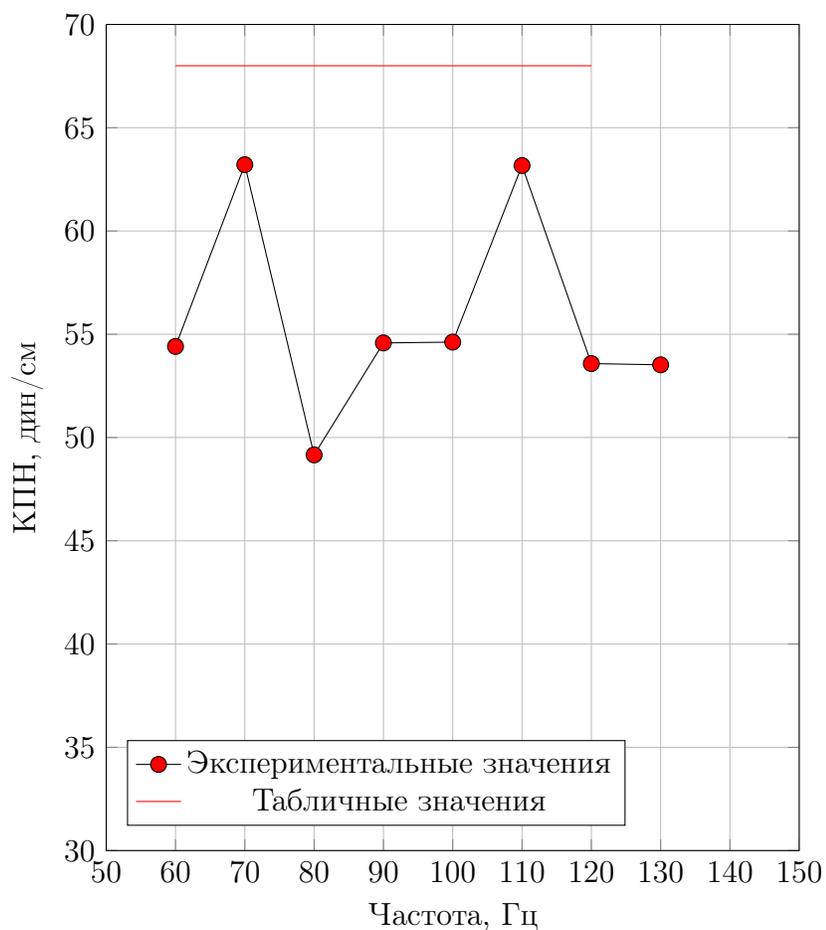


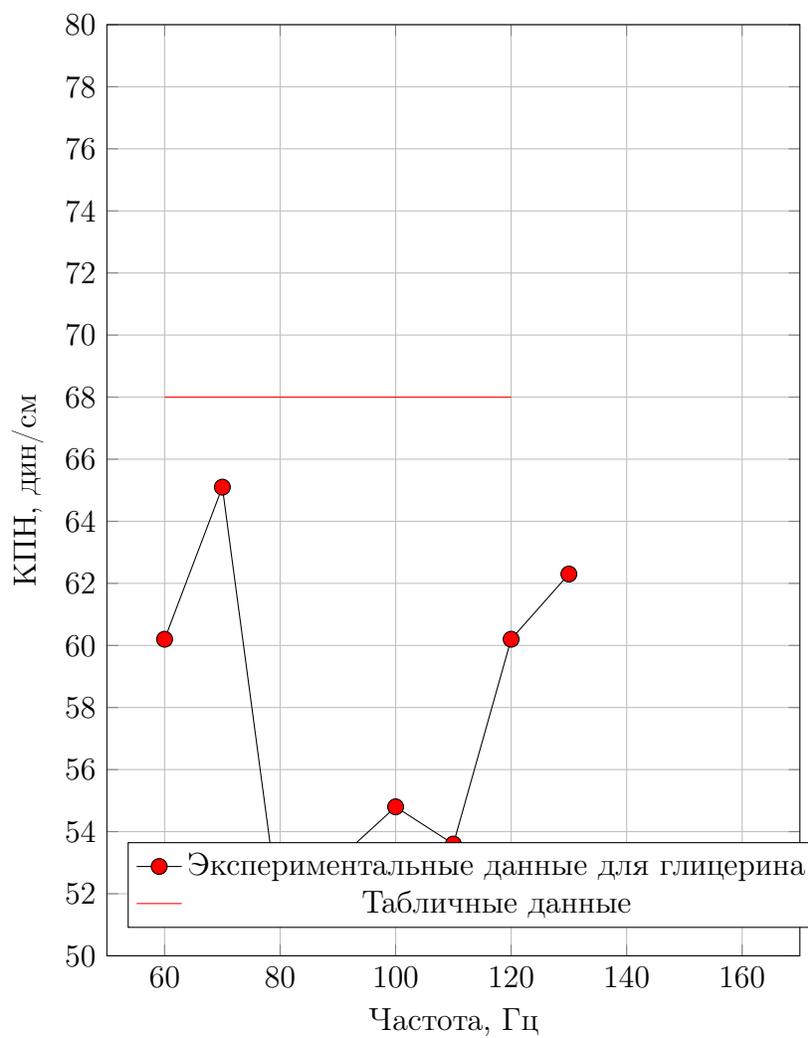
График №2 экспериментальные КПН по глицирину 30 % Видно,

Частота (Гц)	Средняя длина волны (см)
60	0,9
70	0,85
80	0,76
90	0,68
100	0,69
110	0,75
120	0,75
130	0,74

Таблица 10: Средняя длина глицирин при температуре воды в 45 градусов что Средний КПН меньше чем получался в предыдущих экспериментах.

Частота (Гц)	КПН (дин/см)
60	60,2
70	65,1
80	51,2
90	53,1
100	54,8
110	53,6
120	60,2
130	62,3

Таблица 11: КПН глицерина при 45 градусах



8 Оценка погрешностей

В данной работе было проведено более 30 измерений на каждую частоту. Следовательно имеет место указать среднеквадратичное отклонение для экспериментальных частот. Среднеквадратичное отклонение вычисляется по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (x_i - x_{\text{ср}})^2} \quad (18)$$

Частота	СКО
60	0.11
70	0.11
80	0.13
90	0.11
100	0.08
110	0.08
120	0.08
130	0.10

Таблица 12: таблица среднеквадратичных отклонений для исследуемых частот

Далее необходимо вычислить погрешность самого коэффициента поверхностного натяжения. В формуле 7 лишь два параметра погрешности которых можно учесть таким образом формула для подсчета погрешности выглядит следующим образом:

$$\Delta\sigma = \pm\sigma_{\text{ср}} \sqrt{\left(\frac{3 * \Delta\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{2 * \Delta f}{f}\right)^2} \quad (19)$$

Таким образом относительная погрешность $\sigma = 4.83$ дин/см. Таким образом учитывая что стандартное отклонение равняется 1 дин/см. Т. е. можно сказать, что значение полученное мною лежит в пределах $\pm 2\sigma$ при повышении температуры до 45 градусов (СКО не путать с КПН!!!)

9 Обсуждение результатов

В ходе эксперимента проводимого с водой и глицерином были получены значения отличающиеся от табличных значений на

один СКО. Но я считаю, что данные отклонения в пределах поставленного эксперимента не значительны, поскольку было проведено всего лишь 30 измерений на каждой из частот для воды и 15 для глицерина, чем и объясняется отклонение в 8σ при комнатной температуре и 2σ при температуре 45 градусов. Также следует указать на несовершенство установки, в которой не учитывалась вибрация от работы осциллятора, что создавало дополнительные колебания, и как следствия интерференцию волн, что и сказалось на ходе работы. В целом, я как автор данной работы считаю, что полученные мною экспериментальные данные, можно считать результатом, поскольку они были повторены и воспроизведены мною, а также был проведен анализ данных полученных студентами Физического Факультета группы 15371. Однако, следует признать, что проследить зависимость КПН от температуры не удалось поскольку изменение температуры являлось незначительным. Но даже так можно сделать вывод об уменьшении КПН при повышении температуры. Также отмечу, что рабочий диапазон установки составляет 90-120 Гц, именно в этом диапазоне были получены наиболее приближенные к табличным данным результаты.

10 Благодарности

Выражаю глубокую благодарность студентам группы 15371, а именно: 1) Рыбакову Максиму 2) Савенко Егор 3) Тютеревой Юлии 4) Шейко Николаю 5) Федотову Ивану 6) Шеленбергу Альберту
За предоставленные собственные данные по данной лабораторной работе.

11 Выводы

Итак, мной твердо установлено, что коэффициент поверхностного натяжения можно вычислить методом бегущей волны, и в результате этого применения этого метода получены следующие результаты: 1) КПН для Воды $\sigma = 75.85 \pm 5.45 \frac{\text{дин}}{\text{см}}$ Выяснено теоретическое предположение об изменении КПН при изменении Температуры.

2) КПН для Глицерина 30% $\sigma = 54.64 \pm 4.58 \frac{\text{дин}}{\text{см}}$ Полученные мною данные совпадают с допустимой погрешностью поставленной мною перед началом эксперимента.

12 Список Литературы

- 1) Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкостей волновым методом и оценка размера их молекул. Хайрулин Р.А., Брагин О.А. Новосибирск: КОФ НГУ, 2012. - 16с
- 2) Остроумов С. А., Лазарева Е. В. Поверхностное натяжение водных растворов додецилсульфата натрия в присутствии водных растений — Вода: технология и экология. 2008 № 3 с. 57-60.
- 3) (<http://physics.ru/courses/op25part1/content/chapter3/section/paragraph5/theory.html.VzdJNSumXeQ>) - 3.5. Свойства жидкостей. Поверхностное натяжение
- 4) (http://teachmen.ru/methods/phys_prac8.html) -ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ
- 5) Eötvös, L. (1886). "Ueber den Zusammenhang der Oberflächenspannung der Flüssigkeiten mit ihrem Molecularvolumen". Annalen der Physik 27: 448–459
- 6) Канонников И. И., Менделеев Д. И. Глицерин, в технике // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона : в 86 т. (82 т. и 4 доп.). — СПб., 1890—1907.
- 7) Волобуев В. С., Богатин А. С. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкостей методом отрыва кольца // Юный ученый. — 2015. — №2. — С. 102-104.

Содержание

1	Аннотация	1
2	Введение	1
3	Методика выполнения эксперимента:	1
3.1	Описание экспериментальной установки:	1
4	Научная составляющая	2
4.1	Явление поверхностного натяжения	2
4.2	Правило Этвёша	4
4.3	Волны	4
4.4	Гравитационно-капиллярные волны	5
4.5	Метод бегущих волн	7
4.6	Порядок проведения курсовой работы	8
5	Экспериментальные данные	9
5.1	Первичные данные	9
5.2	Обработка данных эксперимента	9
6	Оценка погрешностей	13
7	Экспериментальные данные для Глицерина 30%	14
7.1	Первичные данные	14
7.2	Обработка данных эксперимента	14
8	Оценка погрешностей	18
9	Обсуждение результатов	18
10	Благодарности	19
11	Выводы	19
12	Список Литературы	20