

Отчёт по лабораторной работе 2.5.1.

**Измерение коэффициента поверхностного
натяжения жидкости.**

Работу выполнил Грмов Артём
ЛФИ Б02-006

Долгопрудный, 2021 г.

1. Аннотация

Цель работы:

- 1) измерение температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения дистиллированной воды с использованием известного коэффициента поверхностного натяжения спирта;
- 2) определение полной поверхностной энергии и теплоты, необходимой для изотермического образования единицы поверхности жидкости при различной температуре.

В работе используются: прибор Ребиндера с термостатом и микроманометром; исследуемые жидкости; стаканы.

Наличие поверхностного слоя приводит к различию давлений по разные стороны от искривленной границы раздела двух сред. Для сферического пузырька с воздухом внутри жидкости избыточное давление даётся формулой Лапласа:

$$\Delta P = P_{\text{внутри}} - P_{\text{снаружи}} = \frac{2\sigma}{r}. \quad (1)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения, $P_{\text{внутри}}$ и $P_{\text{снаружи}}$ — давления внутри пузырька и снаружи, r — радиус кривизны поверхности раздела двух фаз. Эта формула лежит в основе предлагаемого метода определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости. Измеряется давление ΔP , необходимое для выталкивания в жидкость пузырька газа.

2. Экспериментальная установка

Исследуемая жидкость (дистиллированная вода) наливается в сосуд (колбу) В (рис.1). Тестовая жидкость (этиловый спирт) наливается в сосуд Е. При измерениях колбы герметично закрываются пробками. Через одну из двух пробок проходит полая металлическая игла С. Этой пробкой закрывается сосуд, в котором проводятся измерения. Верхний конец иглы открыт в атмосферу, а нижний погружен в жидкость. Другой сосуд герметично закрывается второй пробкой. При создании достаточного разрежения воздуха в колбе с иглой пузырьки воздуха начинают пробулькивать через жидкость. Поверхностное натяжение можно определить по величине разрежения ΔP , необходимого для прохождения пузырьков, с помощью формулы (1) (при известном радиусе иглы).

Разрежение в системе создается с помощью аспиратора А. Кран К2 разделяет две полости аспиратора. Верхняя полость при закрытом кране К2 заполняется водой. Затем кран К2 открывают и заполняют водой нижнюю полость аспиратора. Разрежение воздуха создается в нижней полости при открывании крана К1, когда вода вытекает из неё по каплям. В колбах В и С, соединённых трубками с нижней полостью аспиратора, создается такое же пониженное давление. Разность давлений в полостях с разреженным воздухом и атмосферой измеряется спиртовым микроманометром.

Для стабилизации температуры исследуемой жидкости через рубашку D колбы В непрерывно прогоняется вода из термостата.

Обычно кончик иглы лишь касается поверхности жидкости, чтобы исключить влияние гидростатического давления столба жидкости. Однако при измерении температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения возникает ряд сложностей. Во-первых, большая теплопроводность металлической трубки приводит к тому, что температура на конце трубки заметно ниже, чем в глубине жидкости. Во-вторых, тепловое расширение поднимает уровень жидкости при увеличении температуры.

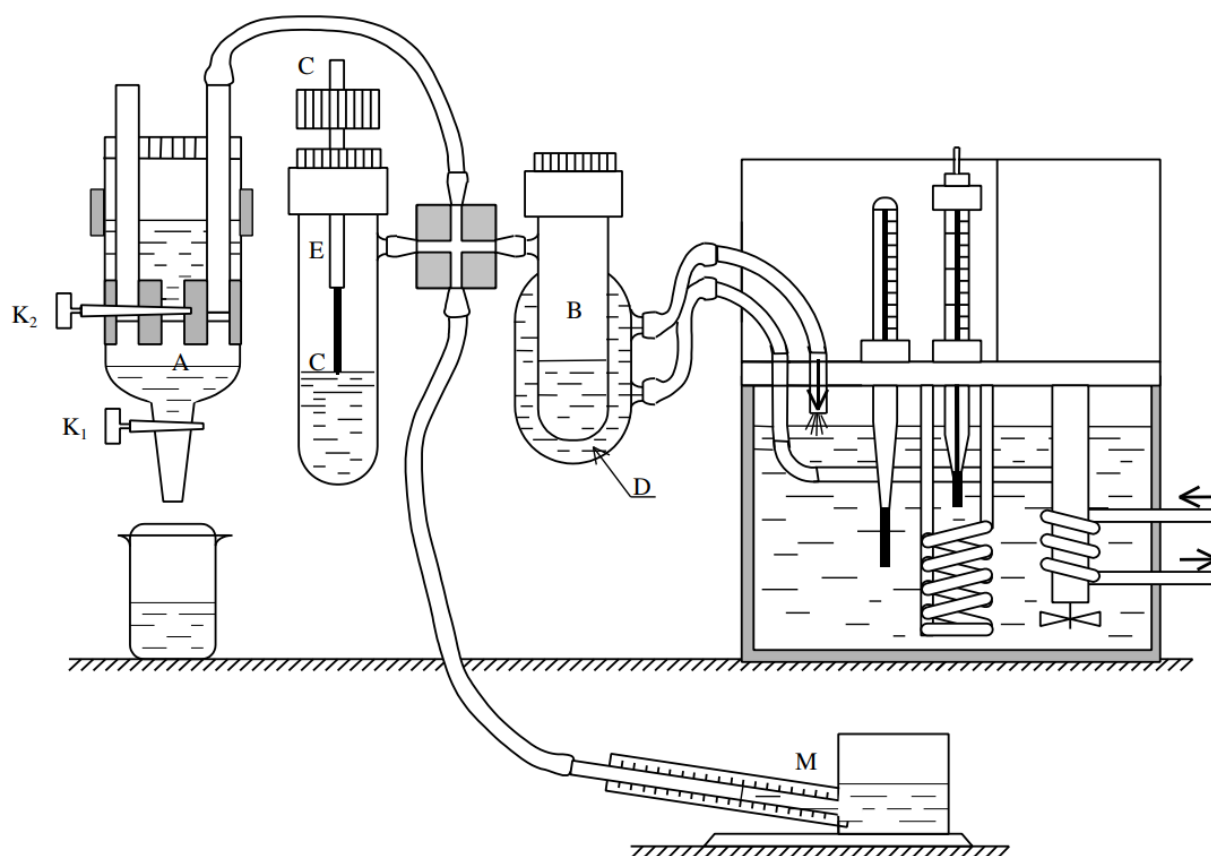


Рис. 1: Схема установки для измерения температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения

Обе погрешности можно устранить, погрузив кончик трубки до самого дна. Полное давление, измеренное при этом микроманометром, $P = \Delta P + \rho gh$. Заметим, что ρgh от температуры практически не зависит, так как подъём уровня жидкости компенсируется уменьшением её плотности (произведение ρh определяется массой всей жидкости и поэтому постоянно). Величину ρgh следует измерить двумя способами. Во-первых, замерить величину $P_1 \Delta P'$, когда кончик трубки только касается поверхности жидкости. Затем при этой же температуре опустить иглу до дна и замерить $P_2 = \rho gh + \Delta P''$ ($\Delta P'$, $\Delta P''$ — давления Лапласа). Из-за несжимаемости жидкости можно положить $\Delta P' = \Delta P''$ и тогда $\rho gh = P_2 - P_1$. Во-вторых, при измерениях P_1 и P_2 замерить линейкой глубину погружения иглы h . Это можно сделать, замеряя расстояние между верхним концом иглы и любой неподвижной частью прибора при положении иглы на поверхности и в глубине колбы.

3. Результаты измерений и обработка данных

3.1. Измерение диаметра иглы

Измерение диаметра иглы проведём двумя методами:

- 1) напрямую, с помощью микроскопа;
- 2) косвенно, определяя максимальное давление $\Delta P_{\text{спирта}}$ при пробулькивании пузырьков воздуха через спирт.

С помощью микроскопа получим значение: $d_{\text{мик}} = 1.15 \pm 0.05$ мм.

Для измерения диаметра иглы вторым способом проведём серию из трёх измерений давления $\Delta P_{\text{спирта}}$. Учтём, что погрешность микроманометра составляет $\Delta_{\text{ман}} = 1$ деление. Полученные данные занесём в таблицу 1.

Таблица 1.
Результаты измерения $\Delta P_{\text{спирта}}$

Серия измерений $\Delta P_{\text{спирта}}$, дел			$\Delta P_{\text{ср}}$, дел	$\sigma_{\text{случ}}$, дел	$\sigma_{\text{полн}}$, дел
1	2	3			
39	39	39	39	0	1

Случайную и полную погрешности рассчитаем используя следующие формулы:

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

$$\sigma_{\text{полн}} = \sqrt{\sigma_{\text{случ}}^2 + \sigma_{\text{приб}}^2}, \quad (3)$$

где n — количество измерений данной величины, $x_{\text{ср}}$ — её среднее значение, x_i — её значение в конкретном опыте, $\sigma_{\text{приб}}^2$ — приборная погрешность.

Для перевода показаний микроманометра в паскали надо воспользоваться следующей формулой:

$$P = C \cdot h \cdot \frac{\gamma_{\text{сп залит}}}{\gamma_{\text{сп пр}}} \cdot K \cdot 9.81, \quad (4)$$

где P — давление в паскалях; $C = 1$ — поправочный множитель; h — значение в делениях шкалы; $K = 0.2$ — постоянная угла наклона; $\gamma_{\text{сп залит}}$ — плотность спирта, залитого в прибор; $\gamma_{\text{сп пр}} = 0.8095$ гм/см³ — плотность спирта, указанная на приборе.

Определяя диаметр иглы с помощью формулы (1), получаем следующие значения: от $d_{\text{спир}} = 1.12 \pm 0.03$ мм до $d_{\text{спир}} = 1.17 \pm 0.03$ мм. Точное значение зависит от залитого в прибор спирта. Оба значения совпадают с диаметром измеренным на микроскопе в пределах погрешностей, поэтому будем в дальнейших расчётах использовать $d_{\text{мик}}$.

Результаты этого опыта используем для определения плотности залитого в прибор спирта $\gamma_{\text{сп залит}} \approx 0.8205$ гм/см³.

3.2. Определение глубины погружения иглы

Для проведения дальнейших опытов необходимо узнать глубину погружения иглы. Воспользуемся двумя методами измерения этой величины:

- 1) напрямую, с помощью линейки;
- 2) косвенно, определяя разность давлений P_1 и P_2 при пробулкивании пузырьков воздуха через воду. P_1 — давление, когда игла находится у самой поверхности; P_2 — давление на интересующей нас глубине.

Измерения при помощи линейки дают нам следующие значения: $h_1 = 17 \pm 0.5$ мм, $h_2 = 6 \pm 0.5$ мм, $\Delta h_{\text{лин}} = 11 \pm 0.5$ мм (h_1 и h_2 расстояния от конца иглы до дна сосуда в разных положениях).

Для определения глубины погружения иглы вторым способом измерим P_1 и P_2 с помощью серии из трёх опытов. Данные занесём в таблицу 2.

Таблица 2.
Результаты измерения P_1 и P_2

Величина	Серия измерений давления, дел			$d_{\text{ср}}$, дел	$\sigma_{\text{случ}}$, дел	$\sigma_{\text{полн}}$, дел
	1	2	3			
P_1	95.0	96.0	97.0	96.0	0.6	1.2
P_2	154.0	153.0	153.0	153.3	0.3	1.2

С помощью формулы (2) и формулы для расчёта давления столба жидкости получим:

$$\Delta h = \frac{P_1 - P_2}{\rho_{\text{воды}} g}. \quad (5)$$

Окончательно получим, что $\Delta h_{\text{ман}} = 11.6 \pm 0.3$ мм. Это значение сходится с полученным нами при помощи другого метода в пределах погрешностей. В дальнейших расчётах будем использовать $\Delta h_{\text{ман}}$, так это значение меньше зависит от человеческого фактора.

3.3. Определение коэффициента поверхностного натяжения воды в зависимости от температуры

Снимим температурную зависимость $\sigma_{\text{воды}}(T)$ дистиллированной воды. Будем проводить измерения в диапазоне от 20°C до 60°C через каждые 5°C. Для уменьшения случайной погрешности будем проводить серии из трёх опытов. Полученные данные занесём в таблицу 3.

Таблица 3.
Результаты измерения максимального давления пробукливания

Т, °C	Серия измерений $P_{\text{ман}}$, дел			$P_{\text{ср}}$, дел	$\sigma_{\text{случ}}$, дел	$\sigma_{\text{полн}}$, дел
	1	2	3			
20.0	154.0	153.0	153.0	153.3	0.3	1.0
25.0	150.0	153.0	153.0	152.0	1.0	1.4
30.0	150.0	151.0	151.0	150.7	0.3	1.0
35.2	148.0	148.0	149.0	148.3	0.3	1.0
40.2	146.0	147.0	147.0	146.7	0.3	1.0
45.1	147.0	146.0	146.0	146.3	0.3	1.0
50.1	146.0	145.0	146.0	145.7	0.3	1.0
55.1	144.0	144.0	143.0	143.7	0.3	1.0

Погрешности были рассчитаны по формулам (2) и (3).

Теперь рассчитаем коэффициент поверхностного натяжения воды $\sigma_{\text{воды}}$ по формуле (1) при различных температурах и оценим его погрешность используя выражение:

$$\sigma_{\sigma_{\text{воды}}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta P}}{\Delta P}\right)^2}, \quad (6)$$

где $\Delta P = P_{\text{ман}} - p_{\text{воды}} g \Delta h$.

Полученные данные занесём в таблицу 4.

Таблица 4.
Результаты измерения $\sigma_{\text{воды}}$ при разных температурах

T, °C	20.0	25.0	30.0	35.2	40.2	45.1	50.1	55.1
ΔP , Па	191	188	186	181	178	177	176	172
$\sigma_{\Delta P}$, Па	5	5	5	5	5	5	5	5
$\sigma_{\text{воды}}$, Н/м	0.055	0.054	0.053	0.052	0.051	0.051	0.051	0.050
$\sigma_{\sigma_{\text{воды}}}$, Н/м	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002

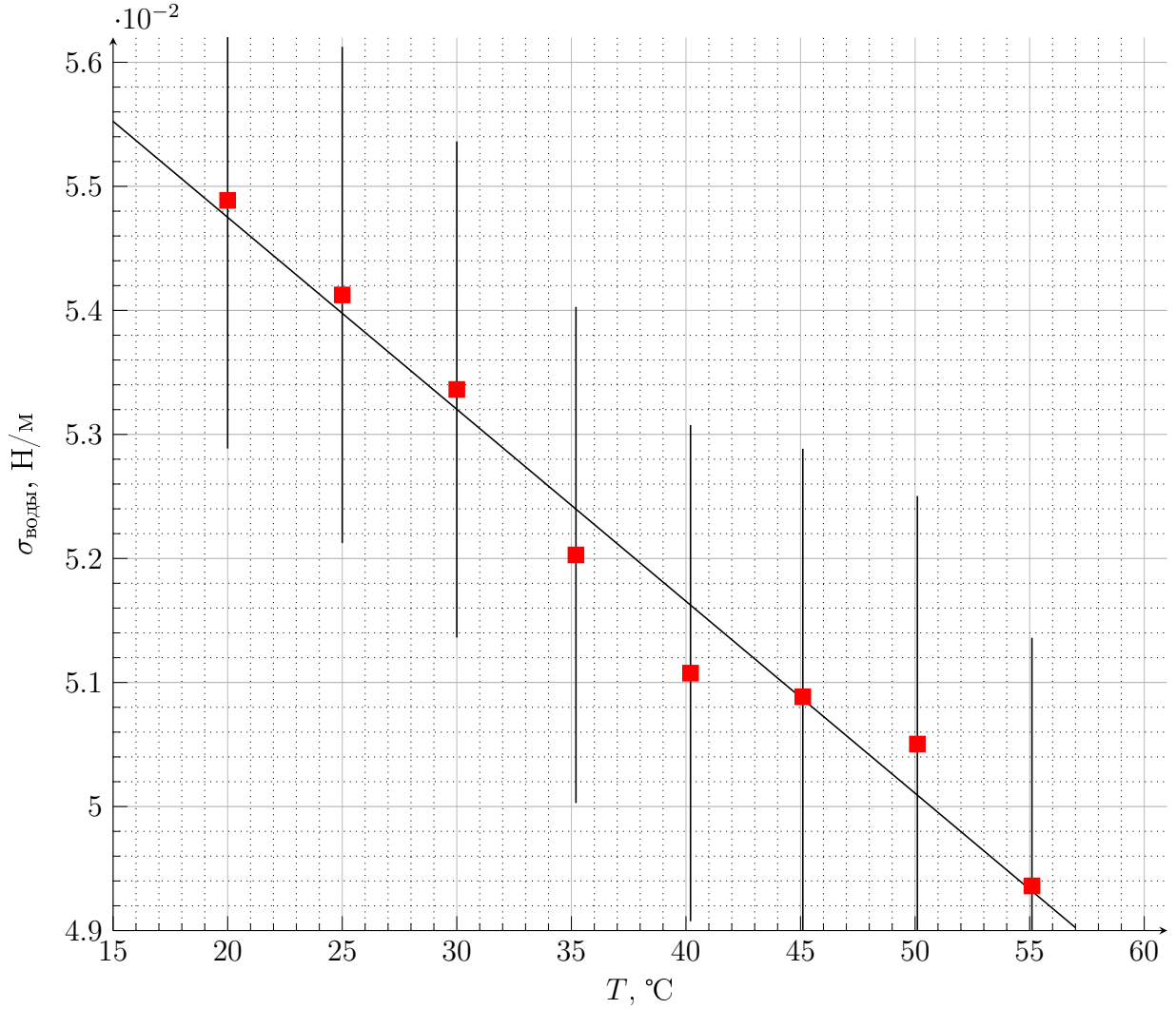


Рис. 2: График зависимости $\sigma_{\text{воды}}$ от T

Теоретическая прямая на графике (рис.2) была построена с помощью метода наименьших квадратов:

$$\frac{d\sigma_{\text{воды}}}{dT} = \frac{\langle \sigma_{\text{воды}} T \rangle - \langle \sigma_{\text{воды}} \rangle \langle T \rangle}{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2}, \quad \sigma_{\text{воды}}(0) = \langle \sigma_{\text{воды}} \rangle - \frac{d\sigma_{\text{воды}}}{dT} \langle T \rangle \quad (7)$$

где $\frac{d\sigma_{\text{воды}}}{dT}$ — угловой коэффициент, а $\sigma_{\text{воды}}(0)$ — свободный член. Погрешность определения $\frac{d\sigma_{\text{воды}}}{dT}$ оценим по формуле:

$$\sigma_{\frac{d\sigma_{\text{воды}}}{dT}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{\langle \sigma_{\text{воды}} \rangle - \langle \sigma_{\text{воды}} \rangle^2}{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2} - \left(\frac{d\sigma_{\text{воды}}}{dT} \right)^2}. \quad (8)$$

В итоге получим следующее значение: $\frac{d\sigma_{\text{воды}}}{dT} = (-15.5 \pm 0.9) \cdot 10^{-5} \text{ Н/м} \cdot \text{К}$.

3.4. Удельная поверхностная энергия и теплота образования единицы площади поверхности

Построим график зависимости теплоты образования единицы поверхности жидкости q от T и график зависимости поверхностной энергии на единицу площади $\frac{U}{F}$ от T . Для этого воспользуемся формулами:

$$q = -T \cdot \frac{d\sigma_{\text{воды}}}{dT}, \quad \frac{U}{F} = \left(\sigma - T \cdot \frac{d\sigma_{\text{воды}}}{dT} \right) = \sigma_{\text{воды}}(0). \quad (9)$$

Для построения графиков запишем значения в таблицу 5:

Таблица 5.

Значения q и $\frac{U}{F}$ при разных температурах

$T, ^\circ\text{C}$	20.0	25.0	30.0	35.2	40.2	45.1	50.1	55.1
$q, \text{Н/м} \cdot 10^{-3}$	3.1	3.9	4.6	5.4	6.2	7.0	7.8	8.5
$\sigma_q, \text{Н/м} \cdot 10^{-3}$	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5
$\frac{U}{F}, \text{Н/м}$	0.058	0.058	0.058	0.057	0.057	0.058	0.058	0.058
$\sigma_{\frac{U}{F}}, \text{Н/м}$	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002

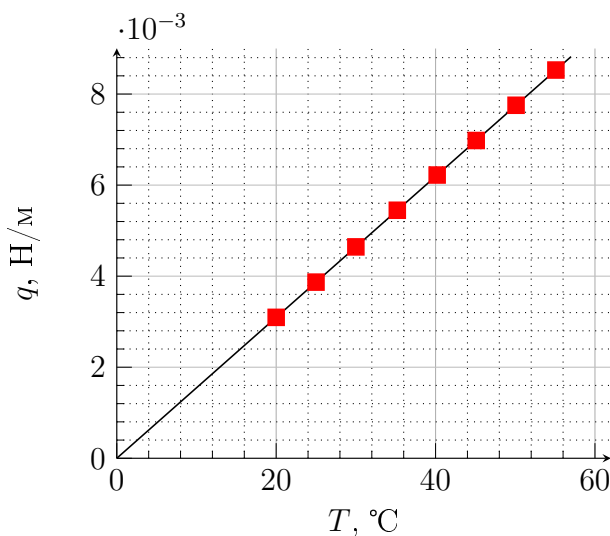


График зависимости q от T

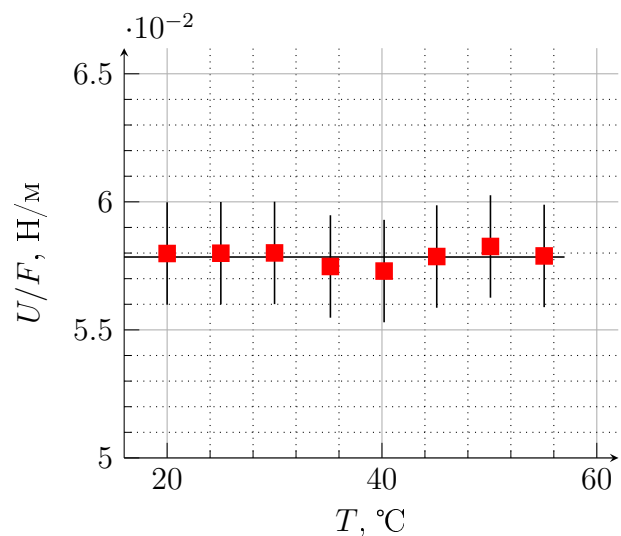


График зависимости $\frac{U}{F}$ от T

4. Обсуждение результатов

В данной работе мы определяли коэффициент поверхностного натяжения воды. Согласно справочнику ни одно из значений не согласуется с экспериментальными. Так погрешность измерения оказалась порядка 5%, то результаты нельзя списать на плохие приборы. Одной из причин столь неудовлетворительных результатов, возможно, является попадание в исследуемую жидкость остатков спирта. Так же последние опыты были

плохо проведены из-за нехватки времени, однако они не могли сильно повлиять на конечный результат. Зависимость $\sigma(T)$ хоть и получилась линейной в пределах погрешностей, вызывает к себе много вопросов из-за маленького диапазона и неточных измерений.

Также в данной работе определялись удельная поверхностная энергия и теплота образования единицы площади поверхности. О второй величине никаких справочных материалов обнаружено не было. О качестве определения удельной поверхностной энергии можно судить из общих представлений: так как это энергия взаимодействия молекул поверхностного слоя с остальными, то она не должна сильно меняться с температурой из-за слабого расширения воды. В нашей это предположение наблюдается.

5. Вывод

Данную работу можно охарактеризовать как неудачу. Последние измерения были выполнены довольно небрежно, а качественные измерения дают не ожидаемый изначально результат. Однако небольшие погрешности измерений указывают на то, что при более грамотном и аккуратном подходе к используемому оборудованию мы можем получить лучшие результаты.