

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»

---

# Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости и его зависимости от температуры методом отрыва кольца

*Учебно-методическое пособие*

Под редакцией А.Н. Морозова



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2 0 1 8

УДК 532.61.08  
ББК 22.365  
О-62

Издание доступно в электронном виде по адресу  
[ebooks.bmstu.press/catalog/70/book1883.html](http://ebooks.bmstu.press/catalog/70/book1883.html)

Факультет «Фундаментальные науки»  
Кафедра «Физика»

*Рекомендовано Научно-методическим советом  
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебно-методического пособия*

*Авторы:*

И.С. Голяк, А.В. Новгородская, И.Л. Фуфурин, С.О. Юрченко

**О-62** **Определение коэффициента поверхностного натяжения жидко-**  
**сти и его зависимости от температуры методом отрыва кольца :**  
учебно-методическое пособие / [И. С. Голяк и др.] ; под ред.  
А. Н. Морозова. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
2018. — 21, [3] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4983-5

Кратко рассмотрены явления поверхностного натяжения. Изложена методика экспериментального определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца. Представлено описание лабораторной установки. Даны указания по выполнению лабораторной работы и обработке результатов измерений.

Для студентов 1-го курса всех факультетов МГТУ им. Н.Э. Баумана.

УДК 532.61.08  
ББК 22.365

ISBN 978-5-7038-4983-5

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018  
© Оформление. Издательство  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторная работа «Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости и его зависимости от температуры методом отрыва кольца» выполняется в Модуле № 2 второго семестра в соответствии с планом-графиком проведения физического практикума.

В методических указаниях кратко рассмотрены физические основы явления поверхностного натяжения жидкости и методика экспериментального определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом отрыва кольца.

Для определения коэффициента поверхностного натяжения используется экспериментальная установка — торсионный динамометр с подвешенным кольцом. Измерения силы, действующей на кольцо в момент отрыва пленки жидкости, проводятся при различных температурах жидкости. По результатам измерений исследуется зависимость коэффициента поверхностного натяжения жидкости от ее температуры. Для полученных экспериментальных значений по методу наименьших квадратов строится линия регрессии. В приложении представлены таблицы с необходимыми справочными данными.

Лабораторная работа направлена на закрепление теоретических знаний в области явлений поверхностного натяжения, а также приобретение навыков постановки эксперимента и обработки полученных результатов.

После успешного освоения материала учебного издания студенты будут:

- ✓ *знать* устройство и принцип работы экспериментальной установки для определения коэффициента поверхностного натяжения;
- ✓ *владеть* методикой измерения коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца;
- ✓ *уметь* обрабатывать полученные экспериментальные данные с помощью статистических методов, а также представлять результаты в виде графических зависимостей с формулировкой выводов;
- ✓ *понимать* зависимость коэффициента поверхностного натяжения жидкостей от температуры.

Для подготовки к лабораторной работе студенты должны изучить данные методические указания (они представлены в электронном виде на сайте кафедры <http://fn.bmstu/index.php/fn4>), а также изучить литературу [1–3].

**Цель лабораторной работы** — изучение поверхностных явлений в жидкости, экспериментальное определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости и его температурной зависимости.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Молекулы жидкости располагаются настолько близко друг к другу, что между ними возникают значительные силы притяжения. Поскольку взаимодействие быстро уменьшается с увеличением расстояния между молекулами, то, начиная с некоторого расстояния, силы притяжения становятся пренебрежимо малы. Это расстояние  $R_M$  называется радиусом молекулярного действия, а сфера радиусом  $R_M$  — сферой молекулярного действия. Радиус молекулярного действия имеет значение порядка нескольких эффективных диаметров молекулы, т. е. имеет порядок  $10^{-8}$  м.

Каждая молекула испытывает притяжение со стороны всех соседних с ней молекул, находящихся в пределах сферы молекулярного действия. Равнодействующая всех этих сил для каждой молекулы (например, молекулы  $a$  на рис. 1), находящейся от поверхности жидкости на расстоянии, превышающем  $R_M$ , в среднем равна нулю.

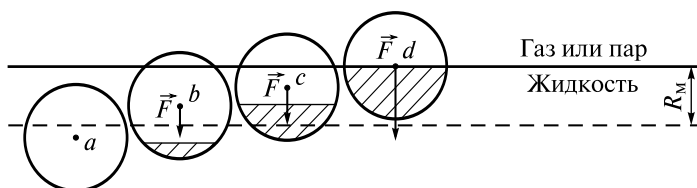


Рис. 1. Механизм возникновения поверхностного натяжения

Иначе обстоит дело, если молекула находится на меньшем расстоянии от свободной поверхности, чем радиус молекулярного действия  $R_M$ . Так как плотность пара или газа, с которым граничит жидкость, во много раз меньше ее плотности, выступающая за пределы жидкости часть сферы молекулярного действия будет менее заполнена молекулами, чем оставшаяся часть. В результате на каждую молекулу, находящуюся в поверхностном слое толщиной  $R_M$ , будет действовать сила  $\vec{F}$ , направленная внутрь жидкости. Эта сила тем больше, чем ближе молекула находится к границе

слоя, так как в этом случае возрастает разность сил притяжения молекулы жидкости ( $b$ ,  $c$  или  $d$  на рис. 1) к молекулам жидкости, находящимся в заштрихованной области (см. рис. 1) сферы молекулярного действия, к молекулам газа или пара в такой же по объему области над поверхностью жидкости.

Переход молекулы из глубины жидкости в поверхностный слой связан с необходимостью совершения работы против действующих в поверхностном слое сил. Эта работа совершается молекулой за счет запаса ее кинетической энергии и идет на увеличение потенциальной энергии молекулы. Таким образом, молекулы в поверхностном слое обладают дополнительной потенциальной энергией, а поверхностный слой в целом — дополнительной потенциальной энергией, которая является составной частью внутренней энергии жидкости и называется свободной.

Ясно, что свободная энергия жидкости  $E_s$  пропорциональна площади  $S$  свободной поверхности, т. е.

$$E_s = \sigma S, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Из-за наличия свободной энергии жидкость обнаруживает стремление к сокращению площади своей поверхности. Жидкость ведет себя так, как если бы она была заключена в упругую растянутую пленку, стремящуюся сжаться. Поэтому предоставленная самой себе жидкость будет принимать форму с минимальной площадью поверхности, т. е. форму шара.

Рассмотрим находящийся в равновесии сферический газовый пузырь радиусом  $R$ . Из-за наличия у поверхностного слоя свободной энергии  $E_s$  на границе раздела жидкой и газообразной фаз возникает скачок давления  $\Delta P$ , который зависит от коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  и радиуса пузыря  $R$ .

Будем считать жидкость несжимаемой, когда плотность всех частиц жидкости постоянна и одинакова, а газ — идеальным газом. При выполнении этих условий внутренняя энергия контактируемых фаз является функцией только температуры:  $E_1 = E_1(T)$ ,  $E_2 = E_2(T)$ . Индексы «1» и «2» означают газ и жидкость соответственно. Пусть по каким-либо причинам радиус газового пузыря увеличился на бесконечно малую величину  $dR$ . Процесс считаем изотермическим ( $T = \text{const}$ ) и равновесным. Соответствующая элементарная работа  $dA$  расширяющегося газа

$$dA = \Delta P dV,$$

где  $dV$  — элементарное изменение объема газового пузыря при соответствующем изменении его радиуса.

По закону сохранения энергии эта работа идет на изменение внутренней энергии системы:

$$dA = dE_s + dE_1 + dE_2.$$

Отсюда, учитывая, что  $dE_1 = dE_2 = 0$  при  $T = \text{const}$ , а  $dE_s = \sigma dS$ ,  $dV = S dR = 4\pi R^2 dR$ ,  $dS = 8\pi R dR$ , приходим к соотношению

$$\Delta P 4\pi R^2 dR = \sigma 8\pi R dR.$$

Окончательно получаем формулу Лапласа для перепада давления на поверхностном слое пузыря:

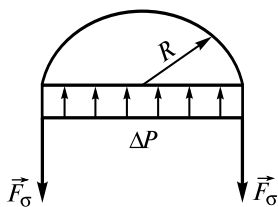
$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R}. \quad (2)$$

Формула (2) оказывается справедливой и в общем случае контакта жидкости и газа, только тогда  $R$  — радиус кривизны данного участка свободной поверхности (гауссова кривизна), а  $\Delta P$  — скачок давления при переходе через тот же участок поверхности раздела фаз.

Перепад давления между газовой и жидкой фазой происходит в очень тонкой жидкой пленке, толщина которой равна радиусу молекулярного действия  $R_m \sim 10^{-8}$  м, т. е. эта тонкая поверхностная пленка проявляет упругие свойства наподобие стенок надутого резинового шарика. Упругая сила  $F_\sigma$ , возникающая в поверхностном слое, называется силой поверхностного натяжения. Она может быть определена из условия равновесия.

Предварительно отметим, что если давления в газовом пузыре и жидкости равны, то сила поверхностного натяжения равна нулю, т. е. сила поверхностного натяжения влияет исключительно на избыточное давление в газовом пузыре  $\Delta P$  (см. (2)). На рис. 2 изображена половина газового пузыря, условно разрезанная вдоль большого круга. Равновесие достигается, если сила поверхностного натяжения

$$F_\sigma = \Delta P \pi R^2.$$



**Рис. 2.** Условие равновесия газового пузыря

Тогда, учитывая формулу (2), получим

$$F_{\sigma} = \sigma 2\pi R \text{ или } \sigma = \frac{F_{\sigma}}{2\pi R},$$

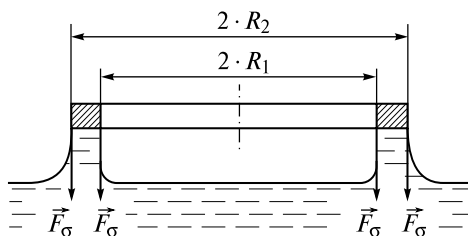
т. е. сила поверхностного натяжения, проходящая на единицу длины сечения поверхностной пленки, численно равна коэффициенту поверхностного натяжения.

Установленная связь между силой поверхностного натяжения и коэффициентом поверхностного натяжения получена на примере газового пузыря (см. рис. 2), но носит общий характер и не зависит от конкретной формы свободной поверхности жидкости. Например, если свободная поверхность плоская, то перепад давления на ней равен нулю в силу того, что кривизна поверхности равна нулю. Несмотря на это, поверхностная пленка существует и сила натяжения в ней

$$F_{\sigma} = \sigma L, \quad (3)$$

где  $L$  — длина сечения поверхностной пленки.

На этом факте основан способ определения поверхностного натяжения жидкости, применяемый в данной работе. В процессе эксперимента от поверхности жидкости медленно отрывается кольцо, которое в начале эксперимента погружается в жидкость полностью. Форма поверхности жидкости при отрыве кольца изображена в сечении на рис. 3. Если в момент отрыва измерить силу



**Рис. 3.** Форма поверхности жидкости при отрыве кольца

взаимодействия жидкости и кольца (она в этот момент максимальна) и исключить вес кольца, то коэффициент поверхностного натяжения можно определить по формуле

$$\sigma = \frac{F_{\sigma}}{2\pi(R_1 + R_2)}, \quad (4)$$

где  $R_1, R_2$  — соответственно внутренний и внешний радиусы кольца.

## Контрольные вопросы

1. Как зависит коэффициент поверхностного натяжения жидкости от температуры?
2. Какой физический смысл коэффициента поверхностного натяжения жидкости?
3. Почему капля жидкости в свободном состоянии принимает шарообразную форму?
4. Что такое силы поверхностного натяжения и каково их происхождение?

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Описание экспериментальной установки

Для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости используется экспериментальная установка (рис. 4).

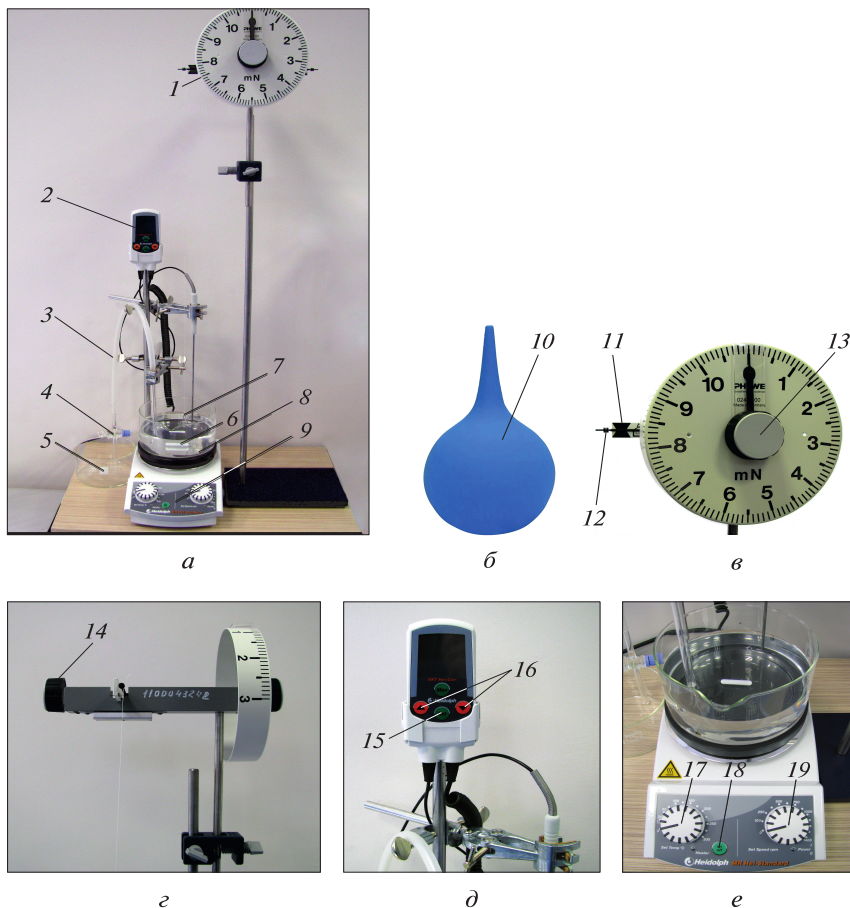


Рис. 4. Экспериментальная установка

На рис. 4, *a* представлен общий вид установки, которая состоит из торсионного динамометра 1, цифрового термометра 2, силиконового шланга 3 со стеклянными на концах стопорящим вентилем 4 и трубкой, двух стеклянных колб для дистиллированной воды — колбы 5 на 560 мл и колбы 8 на 1000 мл, магнита 6, кольца 7 для измерения поверхностного натяжения, магнитной мешалки 9. Спринцовка 10 (рис. 4, *б*) используется для втягивания воды в силиконовый шланг 3.

Размеры кольца 7 известны:  $2R_1 = 19,1$  мм,  $2R_2 = 20,0$  мм (см. рис. 3).

К левому рычагу торсионного динамометра 1 посредством шелковой нити прикреплено кольцо 7. Магнитная мешалка 9 необходима для равномерного нагрева исследуемой жидкости. Цифровой термометр 2 позволяет точно устанавливать требуемую температуру. Силиконовый шланг 3 служит для переливания жидкости из колбы 8 в колбу 5.

На рис. 4, *в*, *г* соответственно показан увеличенный вид спереди и сбоку динамометра (где 11 — метки; 12 — рычаг; 13 — ручка стрелки; 14 — ручка юстировки); на рис. 4, *д* — общий вид панели цифрового термометра (где 15 — кнопка «Set»; 16 — кнопки «▲▼»); на рис. 4, *е* — общий вид панели магнитной мешалки (где 17 — регулятор температуры; 18 — кнопка включения; 19 — регулятор скорости вращения мешалки).

## Порядок выполнения эксперимента

Перед началом эксперимента следует протереть внутреннюю поверхность колбы 8 и кольцо 7 спиртом, чтобы устранить с их поверхности возможные загрязнения, в частности жировые. Данная операция необходима, так как даже самое малое количество загрязнения способно существенно исказить результаты измерений.

**ВНИМАНИЕ!** После протирки нужно дать просохнуть спирту, чтобы он не влиял на поверхностное натяжение. Прикасаться руками к кольцу и внутренней поверхности колбы нельзя!

Эксперимент провести в указанном ниже порядке.

1. Отъюстировать торсионный динамометр:

а) проверить, не перекручена ли металлическая полоса, соединяющая ручку стрелки 13 динамометра и ручку юстировки 14. Если

металлическая полоса перекручена, раскрутить ее обратно по направлению закручивания вращением ручки стрелки 13 динамометра;

**ВНИМАНИЕ! Работа с динамометром с перекрученной металлической полосой способна привести к искажению результатов измерений и порче оборудования!**

б) установить стрелку шкалы динамометра в положение «0»;  
в) опустить кольцо 7 в пустую колбу 8;  
г) с помощью ручки юстировки 14 на обратной стороне динамометра скомпенсировать вес кольца так, чтобы рычаг 12 находился точно между двумя метками 11.

2. Заполнить колбу 8 дистиллированной водой.

3. С помощью спринцовки 10 втянуть воду в силиконовый шланг 3, предварительно открыв стопорящий вентиль 4. После заполнения силиконового шланга 3 водой закрыть вентиль и вылить оставшуюся воду из спринцовки 10 в колбу 8. Погрузить кольцо 7 полностью в воду в колбе 8 (левый рычаг 12 поднимется вверх — это нормально).

4. Включить магнитную мешалку 9 (если не включена), перевести регулятор 18 с правой стороны в положение «ON».

5. Значение температуры, высветившееся на цифровом термометре 2, принять за начальное  $t_0$  и записать его в таблицу «Экспериментальные данные».

6. Открыть стопорящий вентиль 4, позволив воде медленно перетекать из колбы 8 в колбу 5. После того как рычаг 12 начал опускаться, плавно поворачивая ручку 13 (по ходу часовой стрелки), сохранять положение рычага 12 между двумя метками 11. После отрыва кольца 7 от воды зафиксировать показание стрелки динамометра, после чего закрыть стопорящий вентиль 4. Полученное значение занести в таблицу «Экспериментальные данные».

7. Вылить жидкость из колбы 5 назад в колбу 8. Плавно поворачивая ручку 13 (против хода часовой стрелки), вернуть стрелку динамометра в исходное положение.

8. Нагреть жидкость на 10 °С:

а) нажать на цифровом термометре кнопку 15 «Set». С помощью кнопок 16 (▲▼) задать необходимое значение температуры. Для более быстрого достижения нужной температуры можно временно выставить значение выше на 1 °С. Снова нажать на кнопку 15 «Set»;

б) включить нагрев, нажав кнопку включения 18. Плавно поворачивая регулятор температуры 17, установить желаемую темпе-

ратуру нагрева. Для более быстрого нагрева возможно временное увеличение температуры нагрева, но не более чем в два раза. Плавно поворачивая регулятор скорости вращения мешалки 19, установить желаемую скорость перемешивания жидкости;

в) при достижении заданной температуры выключить перемешивание. Занести установившееся значение температуры в таблицу «Экспериментальные данные».

9. Повторить пп. 6–9 семь раз от начального значения температуры с шагом 10 °С. Конечное значение температуры не должно превышать 85 °С. При достижении данной температуры измерения завершить.

### Экспериментальные данные

№ п/п	$t$ , °С	$F_{\sigma}$ , мН	$\sigma$ , мН/мм
1	$t_0$		
2	$t_0 + 10$		
...			
7	$t_0 + 60$		
$\langle \sigma \rangle =$			

Указанное число измерений в эксперименте может быть уменьшено по решению преподавателя, но не должно быть меньше пяти.

### Анализ и обработка результатов измерений

1. Рассчитать значения коэффициента поверхностного натяжения  $\sigma$  по формуле (4). Результаты записать в таблицу «Экспериментальные данные». Принять диаметр кольца:

- внешний  $D_2 = 2R_2 = 20$  мм;
- внутренний  $D_1 = 2R_1 = 19,1$  мм.

2. Представить полученные данные в графическом виде, для чего необходимо по оси абсцисс отложить значения  $x = t$ , °С, а по оси ординат значения  $y = \sigma$ , мН/мм. При этом экспериментальные данные должны с учетом погрешности эксперимента укладываться на прямую линию.

3. Найти коэффициенты линейной регрессии и построить аппроксимационную прямую. Убедиться в линейной зависимости полученных экспериментальных результатов.

Известно, что величина  $\sigma$  линейно зависит от температуры  $t$ . Однако экспериментально полученные значения содержат ошибки измерений, что отражается в отклонении экспериментальных точек на графике от прямой линии.

Для построения теоретически предсказанной прямой зависимости по полученным экспериментальным данным используется метод линейной регрессии. Метод линейной регрессии заключается в представлении набора экспериментальных точек  $(x_i, y_i)$  в виде линейной зависимости  $Y = a + bx$ . Нахождение параметров  $a$  и  $b$  по набору экспериментальных точек  $(x_i, y_i)$  является задачей линейной регрессии. Для нахождения параметров линейной регрессии, как правило, используется метод наименьших квадратов. Суть метода состоит в следующем: необходимо для функционала вида

$$S = \sum_{i=1}^N (y_i - Y_i)^2 \rightarrow \min,$$

где  $(x_i, y_i)$  — набор  $N$  экспериментальных точек (в нашем случае 7);  $Y_i = a + bx_i$  — линия (прямая) регрессии, определить параметры регрессии  $a$  и  $b$  из условия минимума функции  $S$ .

Для нахождения экстремума функции вычислим аналитические значения частных производных  $S$  по  $a$  и  $b$  и приравняем их нулю. В результате получим систему уравнений для нахождения  $a$  и  $b$ :

$$S = \sum_{i=1}^N (y_i - Y_i)^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - a - bx_i)^2 \rightarrow \min;$$

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial b} = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^N x_i + b \sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N x_i y_i; \\ Na + b \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N y_i; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{a}{N} \sum_{i=1}^N x_i + \frac{b}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i; \\ a + \frac{b}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i. \end{cases}$$

Учитывая понятие среднего значения физической величины  $x$  в виде

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \langle x \rangle, \quad (5)$$

перепишем полученную систему:

$$\begin{cases} a \langle x \rangle + b \langle x^2 \rangle = \langle xy \rangle; \\ a + b \langle x \rangle = \langle y \rangle. \end{cases}$$

Тогда формулы для нахождения коэффициентов регрессии будут выглядеть так:

$$\begin{cases} a = \frac{\langle x^2 \rangle \langle y \rangle - \langle x \rangle \langle xy \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}; \\ b = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}. \end{cases} \quad (6)$$

Таким образом, необходимо по формулам (5) и (6) вычислить коэффициенты  $a$  и  $b$  и на графике построить прямую вида  $Y_i = a + bx_i$ , где  $x_i$  — значения  $t$ , °C;  $y$  — значения  $\sigma$ , мН/мм,  $i = 1 \dots N$ .

4. Определить доверительный интервал для проведенных измерений.

Интервал, в котором с заданной вероятностью находится истинное значение измеряемой величины, называется доверительным интервалом. Полуширина доверительного интервала является оценкой погрешности результатов измерений. В нашем случае можно считать, что ширина доверительного интервала не зависит от температуры и составляет одно и то же значение для всех экспериментальных точек.

Для оценки полуширины доверительного интервала вычислим погрешность единичного измерения  $\Delta y$  по следующей формуле:

$$\Delta y = t_{P,f} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - Y_i)^2}, \quad (7)$$

где  $N = 7$  — количество измерений;  $y_i = \sigma_i$ ;  $Y_i = a + bx_i$ ;  $x_i$  — значения  $t$ , °С.

Множитель  $t_{P,f}$  называется коэффициентом Стьюдента для случая малого числа измерений и является функцией доверительной вероятности  $P$  (вероятности того, что истинное значение окажется в доверительном интервале) и числа измерений  $N$ . Для случая  $P = 0,95$  и  $f = N - 1 = 6$  величина коэффициента  $t_{P,f} \approx 2,45$  (для других значений  $P$  и  $f$  значения коэффициента Стьюдента приведены в табл. П2 приложения).

Таким образом, необходимо рассчитать полуширину доверительного интервала по формуле (7) с учетом  $t_{P,f}$  для фактического числа измерений  $N$ , на графике построить доверительный интервал вида  $[y_i - \Delta y; y_i + \Delta y]$  для всех экспериментальных точек  $i = 1 \dots N$ .

Критерием правильности построения линии регрессии и корректности проведения эксперимента будет служить тот факт, что линия регрессии проходит внутри доверительного интервала в каждой экспериментальной точке (для расчета коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $\Delta y$  допускается использование пакетов типа Microsoft Excel).

Результат измерения:

$$\sigma = \langle \sigma \rangle \pm \Delta \sigma.$$

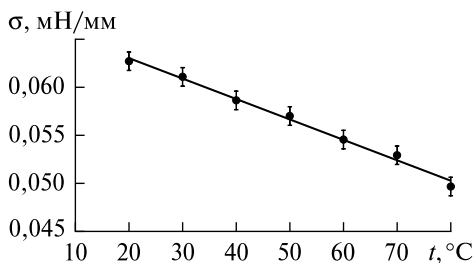
Округлив результат измерения, получим в окончательном виде

$$\sigma = \langle \sigma \rangle \pm \Delta \sigma, \text{ мН/мм,}$$

при  $P = 0,95$ .

Величина  $\Delta \sigma$  описывает случайную погрешность полученных экспериментальных значений.

Пример графического представления экспериментальных данных приведен на рис. 5.



**Рис. 5.** Графическое представление экспериментальных данных

Важно понимать, что возможны случаи, когда отдельные экспериментальные значения могут сильно отличаться от аппроксимации (от ожидаемого значения) и доверительный интервал не перекрывает линию аппроксимации. Такие значения называются выбросами и их необходимо исключать из последующего анализа.

### Контрольные вопросы

1. Какие виды погрешностей встречаются при определении коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца?
2. Что такое метод наименьших квадратов?
3. Что такое доверительный интервал?

## **ТРЕБОВАНИЯ К ПОРЯДКУ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

Отчет о лабораторной работе должен соответствовать требованиям, предъявляемым на кафедре физики. **Студент должен иметь:** тетрадь для выполнения лабораторных работ объемом не менее 48 страниц, чертежные инструменты и калькулятор; допуск по технике безопасности; краткий конспект выполняемой лабораторной работы; допуск к работе от преподавателя.

**В конспекте лабораторной работы должны быть отражены:** название работы и ее номер; цель работы; краткое изложение теоретической части; описание экспериментальной части, включающее схему установки, наименование заданий, таблицы для записи результатов измерений и место для расчетов; контрольные вопросы и письменные ответы на них.

Первичная обработка результатов экспериментов проводится во время занятия, результаты представляются преподавателю, который делает отметку о выполнении работы в карточке-журнале. Расчеты проводятся в единицах СИ и заносятся в тетрадь. Все графические работы выполняются на масштабной-координатной бумаге.

## ЗАЩИТА И ОЦЕНКА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Защита лабораторной работы проходит либо во время текущего занятия (в виде собеседования с преподавателем), либо на следующем занятии. Студент, не имеющий конспекта лабораторной работы, к выполнению работы не допускается и готовит конспект во время занятия.

**Оценка** за лабораторную работу выставляется в карточку-журнал преподавателем следующим образом:

**3 балла** — лабораторная работа выполнена и защищена в срок: конспект и итоговый отчет выполнены в соответствии с требованиями; даны полные и правильные ответы на вопросы, задаваемые на защите лабораторной работы;

**2 балла** — лабораторная работа выполнена и защищена с нарушением графика: качество конспекта и итогового отчета удовлетворительные; даны неполные, но по сути правильные ответы на вопросы, задаваемые на защите лабораторной работы;

**1 балл** — лабораторная работа выполнена со значительным нарушением графика и не защищена: конспект и итоговый отчет неполные; даны неверные ответы на вопросы, задаваемые на защите лабораторной работы;

**0 баллов** — лабораторная работа не выполнена и не защищена.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Глаголев К.В., Морозов А.Н.* Физическая термодинамика. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 272 с.
2. *Савельев И.В.* Курс общей физики: в 5 т. Т. 3: Молекулярная физика и термодинамика: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2011. 224 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/706> (дата обращения 14.05.2018).
3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика: в 10 т. Т. 6: Гидродинамика. М.: Физматлит, 2015. 736 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

*Таблица П1*

### Справочные значения плотности и вязкости воды

№ п/п	$T_{ж}$ , К	$\rho_{ж}$ , г/см <sup>3</sup>	$\eta$ , мПа · с
1	293,15	0,9982	1,002
2	298,15	0,9970	0,897
3	303,15	0,9956	0,797
4	308,15	0,9940	0,726
5	313,15	0,9922	0,653
6	318,15	0,9902	0,597
7	323,15	0,9880	0,548

*Таблица П2*

### Коэффициент Стьюдента $t_{f}$ для различных значений доверительной вероятности

Число степеней свободы $f = N - 1$	N	Доверительная вероятность			
		0,90	0,95	0,99	0,999
1	2	6,31	12,70	63,65	636,61
2	3	2,91	4,30	9,92	31,59
3	4	2,35	3,18	5,84	12,92
4	5	2,13	2,77	4,60	8,61
5	6	2,01	2,57	4,03	6,86
6	7	1,94	2,44	3,70	5,95
7	8	1,89	2,36	3,49	5,40
8	9	1,85	2,30	3,35	5,04
9	10	1,83	2,26	3,24	4,78
10	11	1,81	2,22	3,16	4,58
11	12	1,79	2,20	3,10	4,43

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	3
Теоретическая часть .....	5
Контрольные вопросы .....	9
Экспериментальная часть .....	10
Описание экспериментальной установки .....	10
Порядок выполнения эксперимента .....	11
Анализ и обработка результатов измерений .....	13
Контрольные вопросы .....	17
Требования к порядку проведения лабораторной работы .....	18
Защита и оценка лабораторной работы .....	19
Литература .....	20
Приложение .....	21

*Учебное издание*

**Голяк Игорь Семенович**  
**Новгородская Алла Викторовна**  
**Фуфурин Игорь Леонидович**  
**Юрченко Станислав Олегович**

**Определение коэффициента  
поверхностного натяжения жидкости  
и его зависимости от температуры  
методом отрыва кольца**

Редактор *О.М. Королева*  
Художник *Э.Ш. Мурадова*  
Корректор *Н.В. Савельева*  
Компьютерная графика *Т.К. Сегеды*  
Компьютерная верстка *О.В. Беляевой*

Оригинал-макет подготовлен  
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты  
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 19.10.2018. Формат 60×90/16.  
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Изд. № 490-2018. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
press@bmstu.ru  
www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
baumanprint@gmail.com



## **Информационные технологии в образовательном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана**

### **Соответствие современным тенденциям в высшем образовании:**

- переход Университета на двухуровневую систему обучения
- введение блочно-модульной схемы учебного процесса и новых УМКД
- оперативный доступ к образовательным материалам через сеть Университета и Интернет

### **Учебники, учебные пособия и методические пособия, лабораторные практикумы, курсы лекций и другие материалы в электронной форме**

В 2014 году Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана запустило в эксплуатацию web-портал (<http://ebooks.bmstu.ru>) для обеспечения оперативного доступа студентов к учебной литературе в электронной форме через сеть Университета и Интернет. На площадке web-портала в настоящее время размещены учебно-методические издания, вышедшие в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана за последние 10 лет.

#### **Студентам:**

- полнотекстовый поиск требуемых материалов как по базе данных контента, так и внутри самого документа
- рубрикаторы по факультетам/кафедрам МГТУ им. Н.Э. Баумана, областям знаний, кодам специальностей (ОКСО), ключевым словам, указателям авторов
- доступ к контенту изданий путем просмотра или загрузки на стационарный, мобильный или планшетный компьютер, смартфон, коммуникатор в различных форматах

#### **Авторам:**

- возможность оперативно вносить изменения и дополнения в текст учебных изданий
- использование в учебном процессе материалов web-портала вне зависимости от выхода их печатной версии
- публикация эксклюзивной малотиражной литературы и повышение индекса научного цитирования автора и рейтинга Университета