

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Кафедра физики

«Исследование теплоемкости и теплоты парообразования воды»

Методические указания к лабораторной работе № 202 по курсу «Физика» для
студентов всех форм обучения всех направлений подготовки

Екатеринбург
2013

УДК 621.791

Составители А.Г. Андреева, Е.А. Борисова
Научный редактор А.Г. Волков

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ВОДЫ». Методические указания к лабораторной работе № 202 по курсу «Физика» для студентов всех форм обучения всех направлений подготовки /. Екатеринбург: УрФУ, 2013, 18 с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы. «ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ВОДЫ». Теоретическая часть содержит общие сведения о парообразовании при кипении. Экспериментальная часть включает описание лабораторной установки, конкретных задач, методик измерений и обработки результатов. Приведена форма отчета.

Подготовлено кафедрой физики.

© ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», 2013

© ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», 2013

© А.Г. Андреева, Е.А. Борисова, 2013

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ И ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ВОДЫ

Испарение

В поверхностном слое и вблизи поверхности жидкости действуют силы, которые обеспечивают существование поверхности и не позволяют молекулам покидать объем жидкости. Благодаря тепловому движению некоторая часть молекул имеет достаточно большие скорости, чтобы преодолеть силы, удерживающие молекулы в жидкости, и покинуть жидкость. Это явление называется *испарением*. Оно наблюдается при любой температуре, но его интенсивность возрастает с увеличением температуры.

Динамическое равновесие. Система пар-жидкость.

Если покинувшие жидкость молекулы удаляются из пространства вблизи поверхности жидкости, то, в конце концов, вся жидкость испарится. Если же молекулы, покинувшие жидкость, не удаляются, а удерживаются в замкнутом объеме около поверхности жидкости, то дальнейший процесс развивается по-другому. Покинувшие жидкость молекулы образуют пар. Молекулы пара, попавшие в область вблизи поверхности жидкости, силами притяжения втягиваются в жидкость. Таким образом, скорость испарения уменьшается.

При дальнейшем увеличении плотности пара достигается такая ситуация, когда число молекул, покидающих жидкость за некоторое время, равно числу молекул, возвращающихся в жидкость за то же время. Наступает состояние динамического равновесия. Пар в состоянии динамического равновесия с жидкостью называется *насыщенным*.

Очевидно, что с повышением температуры плотность, а, следовательно, и давление насыщенного пара увеличиваются (табл. 1 и 2). С увеличением плотности насыщенных паров поверхностное натяжение жидкости уменьшается, поскольку силы, направленные внутрь жидкости, уменьшаются из-за роста противоположно направленных сил со стороны насыщенного пара. Поэтому скрытая теплота парообразования с повышением температуры уменьшается. При критической температуре плотность насыщенных паров становится равной плотности жидкости, и различие между ними исчезает. Это означает, что и поверхность исчезает, и, следовательно, поверхностное натяжение и скрытая теплота парообразования при критической температуре обращаются в нуль.

Пар не является газом в строгом смысле этого слова. Газ – это агрегатное состояние вещества при данных температуре и давлении. Пар же не является агрегатным состоянием вещества, потому что агрегатным состоянием вещества при данных температуре и давлении является жидкое состояние. В связи с этим поведение пара отличается от поведения газа. В частности, у идеальных газов давление точно обратно пропорционально объему, а у реальных газов – с достаточно большой точностью. У паров же, близких к насыщению, давление незначительно изменяется с объемом, а у насыщенных паров со-

всем не изменяется. В грубом приближении газовые законы могут быть применены к ненасыщенным парам. Если же пары очень далеки от насыщения, то газовые законы для их описания являются хорошим приближением.

Таблица 1.

Давление насыщенных паров некоторых веществ при 20°C.

Вещество	p , кПа	Вещество	p , кПа
Ацетон	24,0	Ртуть	$1,63 \cdot 10^5$
Бензол	10,0	Толуол	2,93
Вода	2,34	Хлороформ	21,3
Метиловый спирт	12,9	Этиловый спирт	5,87

Таблица 2.

Зависимость давления насыщенных паров воды от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	с	-5	-3	-1	0	1	25
	кПа	0,40	0,463	0,563	0,611	0,656	3,168
		1					
$t, ^\circ\text{C}$	с	3	5	9		15	20
	кПа	0,757	0,872	1,	148	1,704	2,337

Кипение.

Когда при нагревании жидкости достигается температура, при которой давление насыщенных паров равно внешнему давлению, устанавливается равновесие между жидкостью и ее насыщенным паром. При сообщении жидкости дополнительного количества теплоты происходит немедленное превращение соответствующей массы жидкости в пар. Наименьшее давление в жидкости теоретически приходится на ее верхние слои, и это превращение жидкости в пар должно в первую очередь происходить в верхних слоях. В действительности разность в давлениях между различными слоями жидкости незначительна по сравнению с самим давлением, поскольку 10^5 Па соответствуют давлению примерно 10-метрового слоя воды. Кроме того, жидкость обычно подогревается снизу. Оба эти обстоятельства приводят к тому, что интенсивное превращение жидкости в пар происходит по всему объему жидкости. Этот процесс называется *кипением*.

Кипение – это переход жидкости в пар (*фазовый переход I рода*), происходящий с образованием в объеме жидкости пузырьков пара или заполненных паром полостей на нагреваемых поверхностях. Пузырьки растут (вследствие испарения в образующуюся полость жидкости), всплывают, и содержащийся в них насыщенный пар переходит в паровую фазу над жидкостью.

Рассмотрим основные особенности этого типа фазового перехода.

Во-первых, для кипения характерен более интенсивный перенос тепла от нагретой твердой поверхности к соприкасающейся жидкости по сравнению с тем случаем, когда жидкость не кипит.

Во-вторых, температура кипения резко зависит от внешнего давления, а также наличия растворенных веществ.

В-третьих, в отличие от других фазовых переходов, во время кипения система обычно остается приблизительно гомогенной и физически однородной.

Четвертая особенность относится к кипению смесей и растворов: из-за летучести компонент пузырьки содержат главным образом пар более летучего вещества.

В-пятых, кипение сопровождается звуковым и ультразвуковым шумом.

Для поддержания кипения в жидкости необходимо подводить теплоту, которая расходуется на парообразование и на работу пара против внешнего давления при увеличении объема паровой фазы. Температурой кипения ($T_{\text{кип}}$) является та температура, при которой давление насыщенных паров становится равным внешнему давлению. Строго говоря, $T_{\text{кип}}$ соответствует температуре насыщенного пара над плоской поверхностью кипящей жидкости, т. к. сама жидкость всегда несколько перегрета относительно $T_{\text{кип}}$. При увеличении давления температура кипения увеличивается, а при уменьшении давления – уменьшается, это следует из уравнения *Клапейрона–Клаузиуса*:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T \cdot (V_1 - V_2)}$$

оно связывает давление p , при котором находится в равновесии двухфазная система, с температурой. Если известны скрытая теплота перехода L и объемы жидкой V_2 и газообразной V_1 фаз как функции температуры. Решение данного дифференциального уравнения позволяет найти зависимость давления от температуры.

Предельной температурой кипения является *критическая температура* вещества. Температура кипения при атмосферном давлении приводится обычно как одна из основных физико-химических характеристик химически чистого вещества.

Воду в герметически закрытом сосуде можно нагреть до температуры, значительно большей 100°C , без того, чтобы она закипела. Этот прием используется, например, в быденной жизни для ускорения варки продуктов в герметически закрытом сосуде. С другой стороны, понизив достаточно давление над поверхностью воды, например путем откачки воздуха из сосуда, в котором находится жидкость, можно вызвать кипение жидкости при комнатной температуре.

Таким образом, кипение на различных уровнях в жидкости происходит, строго говоря, при различной температуре, и нет какой-то одной определенной температуры кипения жидкости. Определенную температуру имеет насыщенный пар над поверхностью кипящей жидкости. Его температура не зависит от того, как происходит кипение жидкости на различной глубине, и определяется только внешним давлением. Именно температура насыщенного пара над поверхностью кипящей жидкости имеется в виду, когда говорят о температуре кипения.

Перегретая жидкость.

Можно объяснить существование перегретой жидкости. Если жидкость лишена примесей и не содержит пузырьков пара, то при достижении температуры кипения в ней стремятся образоваться пузырьки пара. Но как только такой пузырек образуется внутри жидкости, пар в нем, будучи насыщенным относительно плоской поверхности жидкости, является перенасыщенным относительно вогнутой поверхности жидкости, которой ограничен рассматриваемый пузырек. Поэтому пар пузырька немедленно конденсируется в жидкость и пузырек исчезает. Этому также способствует увеличение давления на пузырек пара со стороны вогнутой поверхности жидкости, ограничивающей пузырек. Это давление также стремится раздавить образовавшийся пузырек пара. Кипение начнется, если в жидкость ввести **нечто** такое, что обеспечит возможность образования пузырьков пара, имеющих с самого начала достаточно большой радиус для того, чтобы пар в пузырьке не был слишком сильно пересыщен, и давление со стороны стенок пузырька не было слишком велико.

Переохлажденный пар.

Насыщенный **при** некоторой температуре пар является перенасыщенным относительно более низкой температуры. Поэтому при понижении температуры насыщенного пара часть **его** превращается в жидкость. Это явление называется конденсацией. В обычных условиях **пары** воды конденсируются во всем объеме пара в виде мельчайших капелек–тумана. Однако если воздух, в котором находится насыщенный пар, достаточно хорошо очищен от примесей, то при охлаждении пара не происходит превращения пара в жидкость и возникает метастабильное состояние, названное переохлажденным паром.

При охлаждении насыщенного пара образуются маленькие капельки жидкости. Однако они не могут сколько-нибудь долго существовать, потому что насыщенный пар, в котором они образуются, является ненасыщенным для выпуклой поверхности капелек. Поэтому жидкость капелек немедленно испаряется, и капельки исчезают.

Для начала процесса конденсации надо обеспечить существование такой ситуации, чтобы с самого начала могли образовываться капельки жидкости достаточно большого радиуса, для которых пар не явился бы сильно ненасыщенным. Для этого необходимо наличие зародышей конденсации. В этом отношении ситуация совершенно аналогична перегретой жидкости.

Пузырьковое кипение

При кипении в жидкости устанавливается определенное распределение температуры (рис. 1): у поверхностей нагрева (стенок сосуда, труб и т. п.) жидкость заметно перегрета. Величина перегрева зависит от ряда физических и химических свойств, как самой жидкости, так и граничных твердых поверхностей. Опыты показывают, что тщательно очищенные жидкости, лишённые растворённых газов (воздуха), можно при соблюдении особых мер предосторожности перегреть на десятки градусов без закипания.

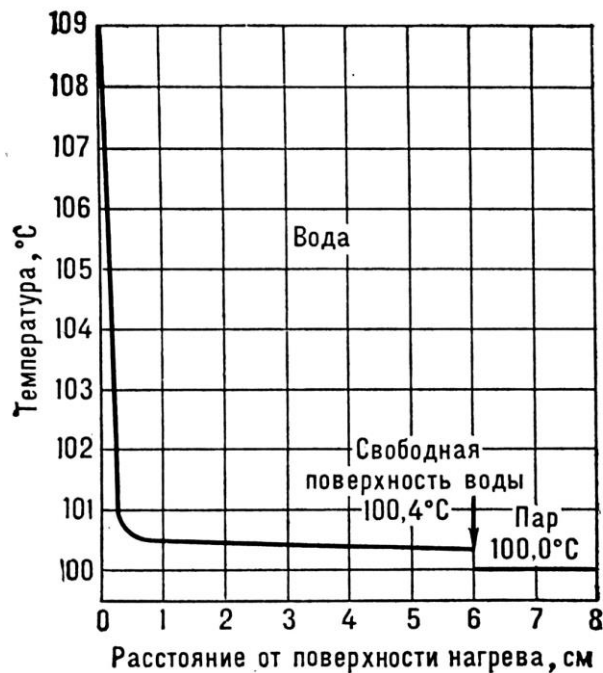


Рис. 1 Распределение температуры при кипении в жидкости.

Когда такая перегретая жидкость вскипает, то процесс кипения протекает бурно, напоминая взрыв. Теплота перегрева расходуется на парообразование, поэтому закипевшая жидкость быстро охлаждается до температуры насыщенного пара, с которым она находится в равновесии. Возможность перегрева чистой жидкости без кипения объясняется затруднённым возникновением начальных маленьких пузырьков (зародышей): энергетические затраты на образование пузырька значительны из-за большой поверхностной энергии пузырька. Если же жидкость содержит растворённые газы и различные мельчайшие взвешенные частицы, то уже незначительный перегрев (на десятые доли градуса) вызывает устойчивое и спокойное кипение, при котором начальными зародышами паровой фазы служат газовые пузырьки, образующиеся на поверхности твердых частиц. Основные центры парообразования находятся в точках нагреваемой поверхности, где имеются мельчайшие поры с адсорбированным газом, а также различные неоднородности, включения и налёты, снижающие молекулярное сцепление жидкости с поверхностью. Для роста образовавшегося пузырька необходимо,

чтобы давление пара в нём несколько превышало сумму внешнего давления, давления вышележащего слоя жидкости и *капиллярного давления*, которое зависит от кривизны поверхности пузырька. Это условие осуществляется, когда пар и окружающая его жидкость, находящаяся с паром в тепловом равновесии, имеют температур, превышающую $T_{кип}$. В повседневной практике наблюдается именно этот вид кипения, называемый пузырьковым.

Зависимость теплоты кипения воды от температуры насыщения

Температура $T_s, ^\circ\text{C}$	Теплота кипения $\lambda, \text{ккал/г}$	Температура $T_s, ^\circ\text{C}$	Теплота кипения $\lambda, \text{ккал/г}$	Температура $T_s, ^\circ\text{C}$	Теплота кипения $\lambda, \text{ккал/г}$	Температура $T_s, ^\circ\text{C}$	Теплота кипения $\lambda, \text{ккал/г}$
0	597,3	80	551,3	150	505,0	300	335,4
20	586,0	100	539,0	200	463,5	350	213,3
40	574,7	120	526,1	250	409,6	374	33,4
60	563,2						

2. Цель работы и описание лабораторной установки

Целью работы является определение теплоемкости и теплоты парообразования воды, а также расчет изменения энтропии в ходе парообразования воды при ее кипении.

Лабораторная установка представляет собой единый блок (рис. 2), в котором смонтированы:

1. Печь – термостат со встроенным электронным термометром и вентилятором для охлаждения образца;
2. Панель управления с электронным дисплеем;
3. Выдвижной ящик с секундомером и мультиметром.

Под металлической крышкой в верхней части прибора находятся пустой тигель и теплоизолирующий кожух коричневого цвета. В пластиковой коробке находятся остальные принадлежности, необходимые для выполнения работы (глицерин, салфетка и др.).

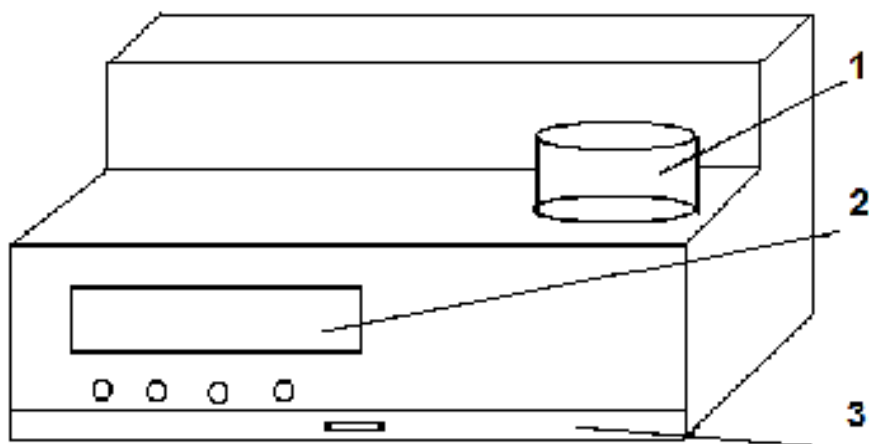


Рис.2. Внешний вид лабораторного комплекса ЛКТ

3. Расчетные формулы

Для экспериментального определения теплоемкости воды необходимо измерить количество теплоты, подведенное к тиглю с водой в процессе нагрева в определенном интервале температур ΔT :

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

В данной работе определение количества теплоты производится по мощности, выделяемой электронагревателем в течение определенного времени:

$$\Delta Q = I \cdot U \Delta t, \text{ где}$$

I – сила тока в нагревателе;

U – напряжение;

Δt – время нагрева.

Поскольку в реальных условиях часть выделяемой нагревателем мощности «рассеивается», т.е. идет на нагрев окружающего воздуха и т.п., то формула для расчета теплоемкости печи с тиглем и водой записывается как

$$C_1 = \frac{(UI - W^1) \Delta t}{\Delta T}, \text{ где} \quad (1)$$

W^1 – мощность потерь в данном интервале температур;

ΔT – интервал температур.

Теплоемкость воды C находится как разность теплоемкости C_1 , рассчитанной по формуле (1) и теплоемкости C_0 печи с тиглем.

$$C = C_1 - C_0 \quad (2)$$

Удельная теплоемкость c воды рассчитывается по формуле

$$c = \frac{C}{m}, \text{ где} \quad (3)$$

m – масса налитой в тигель воды.

В данной работе определяется также удельная теплота L парообразования воды при кипении. Расчетная формула для удельной теплоты парообразования записывается как

$$L = \frac{(\langle UI \rangle - W_1^1) \Delta t_{\text{эди}}}{m_1}, \text{ где} \quad (4)$$

$\langle UI \rangle$ - средняя мощность установки в ходе кипения воды, W_1^1 - мощность потерь при температуре кипения, $\Delta t_{\text{кип}}$ - время кипения, m_1 - масса выкипевшей воды. Приращение энтропии в ходе процесса парообразования воды при ее кипении определяется по формуле

$$\Delta S = \frac{Lm_1}{T_{\text{кип}}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{кип}}$ – температура кипения воды.

4. Ход работы

1. Занесите мощность W' тепловых потерь и теплоемкость C_0 печи без образца в табл. П.1. отчета.
2. Включите тумблер «Сеть» на лицевой панели прибора. При включенном тумблере светятся дисплей вольтметра и зеленый индикатор электронного термометра.
3. Соедините гнездо «Термостат» на лицевой панели с гнездом печи-термостата при помощи кабеля, находящегося в выдвижном ящичке в нижней части прибора.
4. Нанесите на поверхность печи 2-3 капли глицерина (для теплового контакта).
5. Взвесьте пустой тигель. С помощью мензурки налейте в тигель 30-40 мл воды. Взвесьте тигель с водой. Определите массу налитой воды.
6. Установите тигель с водой на печь. Закройте тигель теплоизолирующим кожухом коричневого цвета, стержнем с пружинами прижмите кожух к плите.
7. Регулятор «Температура» на панели прибора установите в крайнее правое положение, что соответствует максимально возможной температуре нагрева положение.
8. Нажав кнопку T_1 на панели, определите начальную температуру печи и занесите ее значение в табл. п.2.
9. Нажмите кнопку U_H и с помощью регулятора «Нагрев» подайте на регулятор напряжение $(19,0 \pm 0,5)$ В. Контроль напряжения – по дисплею прибора.
10. Включите тумблер «Нагрев» на панели прибора и **одновременно** с этим запустите секундомер. Приблизительно в этот же момент времени, нажав кнопку U_H , измерьте значения установившегося напряжения и ,нажав кнопку

I_H , определите рабочий ток, текущий через нагреватель. Занесите значения напряжения и тока в начальный момент времени в табл.П.2.

11. Контролируя температуру образца по дисплею при помощи кнопки T_1 , зафиксируйте моменты времени, соответствующие достижению образцом температур 30, 40, 50, 60 °С, и т.д., и запишите показания секундомера в табл.П.2 отчета. В эти же моменты времени (приблизительно) измеряйте значение напряжения U на нагревателе и силы I тока в нем. Занесите измененные значения в табл. П.2.

Рекомендуемый шаг по температуре: 10 °С в интервале температур 20-90°С и 2°С в диапазоне от 90°С до $T_{кин}$ ($T_{кин}$ – температура нагревателя, при которой вода интенсивно кипит).

Примечание: Встроенный в установку электронный термометр показывает температуру нагревателя, которая при кипении отличается на несколько градусов от температуры воды, вследствие *перепада температуры между печью и водой*.

12. Кипятите воду в течение $\Delta t_{\text{эв}} = 20$ мин. Через каждые 4 минуты после начала интенсивного кипения заносите показания встроенного термометра, значения силы тока в нагревателе и напряжения на нем в табл.П.4 отчета.

13. По окончании измерений выключите прибор в следующем порядке:

А) Регулятор «Нагрев» поверните влево до упора.

Б) Включите вентилятор тумблером «Вент» на панели печи.

В) Контролируйте температуру печи по дисплею (Кнопка T_1) и при снижении температуры до 40 °С выключите вентилятор и тумблер «Сеть».

15. Снимите теплоизолирующий кожух и тигель с оставшейся водой с печи. Взвесьте тигель с оставшейся водой. Рассчитайте m_1 массу выкипевшей воды.

16. Вылейте воду, протрите поверхности тигля и печи, на которые был нанесен глицерин, тряпочкой из ЗИПа прибора, уберите тигель и кабель на место.

5. Порядок выполнения расчетов и обработки результатов эксперимента

1. Рассчитайте интервалы температур ΔT и занесите их в табл.П.3 отчета.
2. Рассчитайте среднюю температуру $\langle T \rangle$ образца в каждом интервале температур и занесите в табл. П.3 отчета.
3. Рассчитайте интервалы времени нагрева Δt до этих температур и занесите в табл.П.3 отчета.
4. Используя значения W' , C_0 из таблицы П.1 и U_H , I_H из таблицы П.2, по формуле (1) рассчитайте теплоемкость C_1 печи с тиглем с водой в каждом интервале температур. Полученные результаты занесите в табл.П.3 отчета.
5. По формуле (2) рассчитайте теплоемкость C воды для каждого интервала температур. Результаты занесите в табл.П.3.
6. По формуле (3) рассчитайте удельную теплоемкость c воды для каждого интервала температур. Результаты занесите в табл.П.3.
7. Постройте экспериментальную зависимость $c = f(\langle T \rangle)$ удельной теплоемкости от температуры образца.

8. Проанализируйте полученную экспериментальную зависимость $c=f(\langle T \rangle)$.
9. По данным табл.П.4., вычислите средние $\langle T_{\text{сдт}} \rangle$ -температуру и $\langle UI \rangle$ -мощность печи, при которых интенсивно кипит вода.
10. Заполните табл.П.4.
11. По формуле (4) рассчитайте удельную теплоту L парообразования воды при кипении.
12. По формуле (5) рассчитайте изменение ΔS энтропии в ходе кипения воды.
13. Рассчитайте погрешности определения значений L и ΔS .
14. Сделайте выводы по работе.

ФОРМА ОТЧЕТА

Титульный лист:

У Г Т У - У П И
кафедра физики

О Т Ч Е Т

по лабораторной работе № 202

« Исследование теплоемкости и теплоты парообразования воды»

Студент _____

Группа _____

Дата _____

На внутренних страницах:

1. Расчетные формулы

Теплоемкость печи с тиглем и водой вычисляется по формуле

$$C_1 = \frac{(UI - W^1)\Delta t}{\Delta T},$$

где W^1 – мощность потерь в данном интервале ΔT температур, I – сила тока в нагревателе, U – напряжение, Δt – время нагрева.

Теплоемкость воды определяется по формуле

$$C = C_1 - C_0,$$

где C_0 – теплоемкость печи с тиглем.

Удельная теплоемкость воды рассчитывается как

$$c = \frac{C}{m},$$

где m – масса налитой в тигель воды.

Удельная теплота парообразования воды при ее кипении рассчитывается по формуле

$$L = \frac{(\langle UI \rangle - W_1^1)\Delta t_{\text{эв}}}{m_1},$$

где $\langle UI \rangle$ - средняя мощность установки в ходе кипения воды, W_1^1 - мощность потерь при температуре кипения, $\Delta t_{\text{кип}}$ - время кипения, m_1 - масса выкипевшей воды.

Изменение энтропии в процессе кипения воды вычисляется по формуле

$$\Delta S = \frac{Lm_1}{T_{\text{кип}}}$$

где $T_{\text{кип}}$ – температура, при которой вода интенсивно кипит.

2. Средства измерений и их характеристики.

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления шкалы	Предел основной погрешности, $\theta_{\text{ин}}$
Секундомер Амперметр Вольтметр Термометр Весы цифровые электронные			

Таблица П.1

3. Характеристики установки.

Интервал температур	W , Вт	C_0 , Дж/К
20-30		
30-40		
40-50		
...		
100-110		
110-120		

4. Результаты измерений.

Масса воды в тигле- _____ г

Таблица П.2

Результаты измерений при нагреве образца

$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{мин} - \text{с}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$
	0		
...			

5. Результаты расчетов.

Таблица П.3

Результаты расчетов.

Интервал температур $\Delta T = T_i - T_{i-1},$ $^\circ\text{C}$	Средняя температура на интервале $\langle T_i \rangle, \text{К}$	Интервал времени $\Delta t = t_i - t_{i-1}, \text{с}$	Теплоемкость печи с тиглем с водой $C_1, \text{Дж/К}$	Теплоемкость воды, $C, \text{Дж/К}$	Удельная теплоемкость $c, \text{Дж/г}\cdot\text{К}$
...					

6. Результаты измерений, проведенных в ходе кипения воды.

Таблица П.4

Результаты измерений.

$T_{\text{кип},i}, ^\circ\text{C}$	$(T_{\text{кип},i} - \langle T_{\text{кип}} \rangle), ^\circ\text{C}$	$(T_{\text{кип},i} - \langle T_{\text{кип}} \rangle)^2, ^\circ\text{C}^2$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$(UI)_i, \text{Вт}$	$((UI)_i - \langle UI \rangle), \text{Вт}$	$((UI)_i - \langle UI \rangle)^2, \text{Вт}^2$
...							

$$\langle T_{\text{кип}} \rangle = \dots ^\circ\text{C} = \dots \text{К}, S_{\langle T_{\text{эв}} \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (T_{\text{эв},i} - \langle T_{\text{эв}} \rangle)^2}{n(n-1)}} = \dots$$

$$\langle UI \rangle = \dots \text{Вт},$$

$$\langle U \rangle = \dots \text{В}$$

$$\langle I \rangle = \dots \text{А}$$

$$S_{\langle U \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (U_i - \langle U \rangle)^2}{n(n-1)}} = \dots \qquad S_{\langle I \rangle} = \sqrt{\frac{\sum (I_i - \langle I \rangle)^2}{n(n-1)}} = \dots$$

7. Расчет удельной теплоты L парообразования воды и изменение ΔS энтропии при кипении.

$$L = \dots$$

$$S = \dots$$

8. Расчет границ погрешностей.

8.1. Расчет границы абсолютной погрешности результата определения средней мощности $\langle UI \rangle$ установки в ходе кипения воды

$$\Delta \langle UI \rangle = \langle UI \rangle \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{\langle I \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{\langle U \rangle}\right)^2} = \dots\dots\dots,$$

где абсолютные границы погрешностей ΔI и ΔU измерения тока и напряжения в процессе кипения вычисляются по формулам

$$\Delta I = \sqrt{\varepsilon_I^2 + \theta_I^2} = \dots\dots\dots, \text{ где}$$

$$\varepsilon_I = t_{p,n} \cdot S_{\langle I \rangle} = \dots\dots\dots \text{ при } P=0,95;$$

$$\Delta U = \sqrt{\varepsilon_U^2 + \theta_U^2} = \dots\dots\dots, \text{ где}$$

$$\varepsilon_U = t_{p,n} \cdot S_{\langle U \rangle} = \dots\dots\dots \text{ при } P=0,95;$$

8.2. Расчет границы абсолютной погрешности результата измерений температуры.

$$\Delta T = \theta_T = \dots$$

8.3. Расчет границы абсолютной погрешности результата измерений массы.

$$\Delta m = \theta_m = \dots$$

8.4. Так как время измеряется с точностью гораздо большей точности измерения силы тока, напряжения, массы и температуры, то погрешностью измерения времени пренебрегаем.

8.5. Расчет границы относительной погрешности результата определения удельной теплоты парообразования воды.

$$\gamma = \frac{\Delta L}{L} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \langle UI \rangle}{\langle UI \rangle - W'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m_1}\right)^2}$$

8.6. Расчет границы абсолютной погрешности результата определения удельной теплоты парообразования воды.

$$\Delta L = \gamma L = \dots$$

8.7. Расчет границы относительной погрешности результата определения изменения энтропии.

$$\gamma = \frac{\Delta(\Delta S)}{\Delta S} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{\langle T_{\text{эв}} \rangle}\right)^2}$$

8.8. Расчет границы абсолютной погрешности результата определения изменения энтропии при кипении воды.

$$\Delta(\Delta S) = \gamma \Delta S = \dots$$

9. Окончательные результаты измерения.

9.1. Удельная теплота парообразования воды при кипении

$$L = \langle L \rangle \pm \Delta L = \dots$$

9.2. Изменение энтропии в ходе кипения воды

$$\Delta S = \langle \Delta S \rangle \pm \Delta(\Delta S) = \dots$$

10. Выводы.

Андреева Анна Григорьевна
Борисова Екатерина Александровна

Исследование теплоемкости и теплоты парообразования воды

Методические указания к лабораторной работе № 202 по курсу «Физика» для студентов всех форм обучения всех направлений подготовки

Редактор *Н.П. Кубыщенко*

Компьютерная верстка *Н.Н.Анохиной*

Подписано в печать	03.06.2009	Формат 60× 84 1/16
Бумага типографская	Плоская печать	Усл.печ.л. 1,0
Уч.-изд. л. 0,82	Тираж 100 экз.	Заказ Цена «С»

Редакционно-издательский отдел УрФУ
620002, Екатеринбург, Мира, 19