

3.7. Лабораторная работа: «Определение коэффициента теплоотдачи при пленочном кипении жидкости на цилиндре»

3.7.1. Введение

В инженерной практике при проведении теплового расчета технического устройства или организуемого технологического процесса необходимо знание коэффициента теплоотдачи используемых теплоносителей. Величина теплоотдачи, при этом, может существенно отличаться в зависимости от гидродинамики и теплообменных процессов теплоносителя. Например, образование пара внутри объема жидкости – кипение, зависит от условий подвода теплоты к греющей стенке и в большом объеме чаще всего реализуется при свободном движении жидкости. В промышленности с технологической точки зрения процесс кипения может являться как необходимым условием, так и нежелательным явлением.

При выполнении работы студенты самостоятельно проведут научное исследование зависимости коэффициента теплоотдачи при кипении воды от температурного напора. Кроме того, студенты закрепят знания теории теплообмена излучением, приобретут навыки проведения и обработки научного эксперимента.

3.7.2. Цели и задачи лабораторной работы

Целью работы является получение навыков экспериментального определения коэффициента теплоотдачи при кипении жидкости.

Задачами исследования являются:

- 1) определение коэффициента теплоотдачи при охлаждении нагретого до 450 °С медного цилиндра в кипящей при атмосферном давлении воде, в условиях плёночного кипения;

- 2) определение температуры предельного перегрева воды при втором кризисе кипения;
- 3) определение второй критической плотности теплового потока;
- 4) составление отчета по выполненной работе.

3.7.3. Основные теоретические сведения

Существует два характерных вида кипения: кипение в большом объеме и кипение при вынужденном движении (кипение жидкости в трубах). В данной работе мы рассматриваем первый случай кипения, при этом в природе существует два режима кипения: пузырьковое и пленочное.

На практике пузырьковое кипение встречается намного чаще, чем пленочное. Пузырьковый режим характеризуется высокими коэффициентами теплоотдачи и соответственно высокой способностью к отводу тепла при малой разнице температур жидкости и стенки. Однако при высоких значениях теплового потока поверхность нагрева уже не способна обеспечивать столь же эффективный отвод тепла, что ведет к отрыву поверхности парообразования от поверхности нагрева и образует между ними слой пара, который и называется паровой пленкой. Теплопроводность пара намного меньше, чем теплопроводность жидкости, потому как при низких давлениях и одинаковой температуре у этих двух фаз существенно различаются плотности. Резкий рост термического сопротивления системы ведет к резкому повышению температуры поверхности нагрева при том же отводимом тепловом потоке.

В данной работе наблюдение за пленочным режимом кипения происходит следующим образом: медная болванка, заключенная в оболочку из нержавеющей стали помещается в печь и греется там до 450–500 °С. Наличие у поверхности изначально высокой температуры, при погружении в воду, приводит к мгновенному образованию вокруг нее паровой пленки. Чтобы тепло не тратилось на подогрев воды до температуры насыщения, близь поверхности, воду, в которую погружают исследуемый образец, предварительно доводят до кипения, т.е. «догревают» до температуры насыщения.

Процесс остывания образца в кипящей жидкости характеризуется тем, что происходит при постоянной температуре охлаждающей среды, а режим пленочного кипения характеризуется постоянным значением коэффициента теплоотдачи, что является граничными условиями для регулярного режима охлаждения первого рода.

В охлаждаемом теле связь между временными и пространственными изменениями температуры в любой точке, где происходит процесс теплопроводности, устанавливается уравнением теплопроводности. Для тела, в котором отсутствуют источники тепла, оно принимает вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t, \quad (3.7.1)$$

Решение задачи об охлаждении тел приводит к понятию темпа охлаждения:

$$\frac{1}{\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = -m, \quad (3.7.2)$$

где $\vartheta = \bar{t} - t_{жс}$; \bar{t} - средняя температура тела в момент времени τ ; $t_{жс}$ - температура окружающей среды.

Левая часть определяет относительную скорость изменения температуры, которая при регулярном режиме не зависит от координат и времени и является постоянной величиной. Можно показать, что

$$m = \psi \frac{\bar{\alpha} F}{C}. \quad (3.7.3)$$

Уравнение (3.7.3) выражает закон сохранения энергии для системы, состоящей из охлаждаемого тела и окружающей среды с постоянной температурой t_c . Это первая теорема Кондратьева:

Темп охлаждения (нагревания) однородного и изотропного тела при конечном значении коэффициента теплоотдачи пропорционален среднему по поверхности тела коэффициенту теплоотдачи α , площади поверхности тела F и обратно пропорционален его полной теплоёмкости C .

Множитель ψ называется коэффициентом неравномерности распределения температуры. Смысл величины ψ состоит в отношении средней температуры поверхности тела к температуре тела, усреднённой по всему объёму

$$\psi = \frac{t_c}{\bar{t}}$$

Соотношения между теплофизическими параметрами при кипении можно представить в графическом виде (Рис. 3.7.1 и Рис. 3.7.2.).

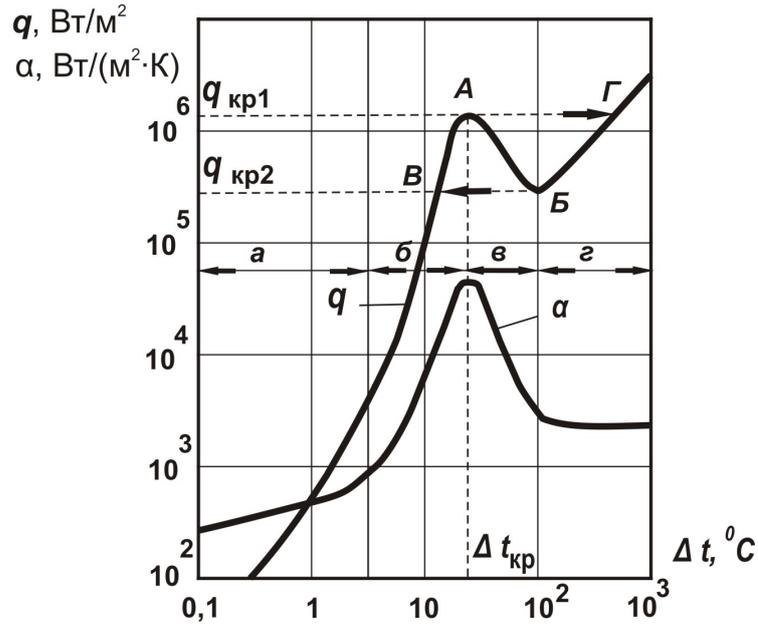


Рис 3.7.1. Плотность теплового потока q и коэффициент теплоотдачи α при кипении в зависимости от перегрева стенки Δt

Процесс охлаждения нагретого медного образца до $(450-500)^\circ\text{C}$ в нагретой до 100°C воде происходит при плёночном кипении воды на его поверхности с постоянным и относительно невысоким коэффициентом теплоотдачи (Рис. 3.7.1 и Рис. 3.7.2). Поэтому величина ψ близка к 1.

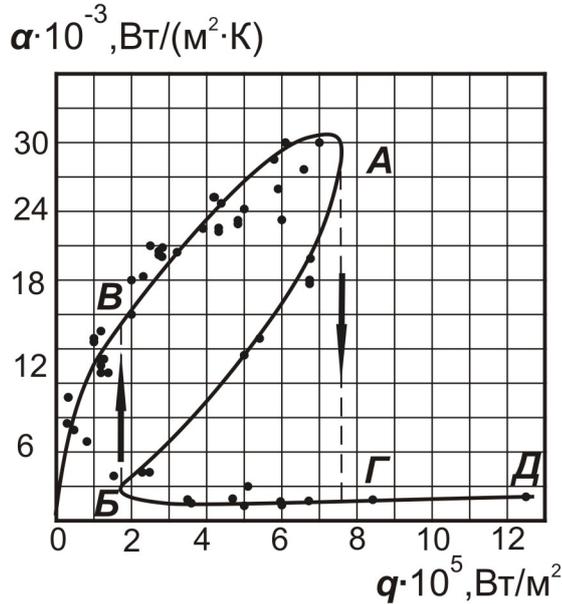


Рис.3.7.2 Коэффициент теплоотдачи α при кипении в зависимости от плотности теплового потока q

При переходном режиме кипения коэффициент теплоотдачи значительно возрастает, что приводит к резкому уменьшению

температуры стенки t_c образца и , следовательно, к увеличению неравномерности температурного поля в образце. При этом $\psi < 1$.

А.В. Лыковым было показано, что регулярный режим определяется не только определёнными температурными полями, возникающими в нагреваемом или охлаждаемом теле, но и потоками тепла через его поверхность.

Поэтому при охлаждении медного образца нет необходимости различать регулярные режимы первого, второго и третьего рода.

В качестве общего свойства теплового регулярного режима можно принять соотношение

$$\frac{d\bar{t}}{d\tau} = m(\bar{t} - t_{ж}), \quad (3.7.4)$$

где \bar{t} - средняя по объёму температура тела; $t_{ж}$ - температура среды.

Для области плёночного кипения из соотношений (3.7.3) и (3.7.4) следует, что коэффициент теплоотдачи можно найти из соотношения

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{F \cdot \psi} \frac{C_{уд} \cdot M}{(\bar{t} - t_{ж})} \frac{d\bar{t}}{d\tau}, \quad (3.7.5)$$

где $C_{уд}$ – удельная теплоёмкость металла; M – масса образца; $\psi = 1$.

При переходе от плёночного кипения к пузырьковому возрастает средний коэффициент теплоотдачи. Это приводит к понижению температуры поверхности образца и, следовательно, коэффициента неравномерности распределения температуры в образце.

Для переходной области из соотношений (3.7.3) и (3.7.4) следует

$$m = \psi \frac{\bar{\alpha} F}{C} = \psi \bar{\alpha} \cdot const. \quad (3.7.6)$$

Если функция $\bar{t} = f(\tau)$ непрерывно убывает, а её производная является так же непрерывной функцией, то в точке перегиба кривой $\bar{t} = f(\tau)$ темп охлаждения равен:

$$m = \psi \bar{\alpha} \cdot const = \max. \quad (3.7.7)$$

Переход от плёночного режима кипения к пузырьковому режиму называют вторым кризисом теплоотдачи при кипении.

Минимальная плотность тепловой потока при плёночном кипении называется второй критической плотностью теплового потока $q_{кр2}$. Соответствующий этой величине температурный напор (точка Б на кривой кипения) называется вторым критическим температурным напором $\Delta t_{кр2}$. (Рис.3.7.1).

Соотношение (3.7.7) можно использовать для определения второй критической плотности теплового потока $q_{кр2}$ и второго критического

температурного напора $\Delta t_{кр2}$, на основе экспериментальных данных $\bar{t} = f(\tau)$. Температура, соответствующая точке перегиба функции $\bar{t} = f(\tau)$ определяет второй критический температурный напор $\Delta t_{кр2}$.

3.7.4. Методика проведения опыта

Из экспериментальных данных определяется величина темпа охлаждения на участке пленочного кипения. Если температура ампулы есть функция времени $t = f(\tau)$, тогда:

$$m = \frac{\ln(\mathcal{G}_{\tau_1}) - \ln(\mathcal{G}_{\tau_2})}{\tau_2 - \tau_1}$$

Где

$$\mathcal{G}_{\tau} = t_{\tau} - t_s \quad (t_s = 100^{\circ}C)$$

t_{τ} – температура ампулы (в градусах Цельсия) в момент времени τ .

Нагретая ампула погружается в кипящую воду на 10 – 35 мм в зависимости от того, какой продолжительности должен быть эксперимент. Величина глубины погружения определяет площадь поверхности теплообмена, а соответственно и интенсивность отвода тепла от образца. Если h – глубина погружения образца, тогда площадь поверхности теплообмена складывается из двух составляющих:

$$F_1 = \pi \cdot d \cdot h, \quad F_2 = 0,25 \cdot \pi \cdot d^2, \quad F = F_1 + F_2,$$

где d – внешний диаметр ампулы (25 мм), индексом «1» обозначена поверхность образованная боковой поверхностью ампулы, погруженной на глубину h , а индекс «2» соответствует поверхности дна ампулы.

На участке пленочного кипения темп охлаждения сохраняется постоянным вне зависимости от выбранных моментов времени τ_1 и τ_2 .

Удельные теплоемкости материалов ампулы равны:

$$Cp_{\text{Медь}} = 390, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \quad Cp_{\text{Сталь}} = 510, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Масса ампулы и ее составляющих равны соответственно:

$$m_{\text{Ампула}} = 275 \text{ грамм};$$

$$m_{\text{Медь}} = 200 \text{ грамм};$$

$$m_{\text{Сталь}} = 75 \text{ грамм}.$$

По этим данным не сложно найти величину средней массовой теплоемкости ампулы:

$$Cp_{\text{Ампула}} = \frac{m_{\text{Медь}}}{m_{\text{Ампула}}} \cdot Cp_{\text{Медь}} + \frac{m_{\text{Сталь}}}{m_{\text{Ампула}}} \cdot Cp_{\text{Сталь}}$$

Экспериментальное значение коэффициента теплоотдачи находится по формуле:

$$\alpha = \frac{m \cdot m_{\text{Ампула}} \cdot Cp_{\text{Ампула}}}{\psi \cdot F},$$

где ψ – коэффициент неравномерности распределения температур в теле и принимает значения от 0 до 1. Поскольку термическое сопротивление пленки пара много больше чем у составляющих ампулы, то можно принять ($\psi = 1$).

Из – за малости рабочего участка, в данной установке, реализуется ламинарное течение паровой пленки.

Базируясь на предположении, что толщина паровой пленки есть толщина пограничного слоя и решая уравнения стационарной теплопроводности, для ламинарного движения пленки Нуссельтом была получена теоретическая формула для нахождения коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = c \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda_{\text{п}}^3 \cdot r \cdot g \cdot (\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{ж}})}{v_{\text{п}} \cdot l_0 \cdot \Delta t}},$$

где: $\lambda_{\text{п}}$ – теплопроводность пара (при $p = 1$ бар: $\lambda_{\text{п}} = 2,372 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К));

$v_{\text{п}}$ – кинематическая вязкость пара (при $p = 1$ бар: $v_{\text{п}} = 20,02 \cdot 10^{-6}$ м²/с);

r – удельная теплота парообразования (при $p = 1$ бар: $r = 2256,8$ кДж/кг);

g – ускорение свободного падения ($9,80665$ м/с²);

$\rho_{\text{п}}$ – плотность насыщенного пара (при $p = 1$ бар: $\rho_{\text{п}} = 0,598$ кг/м³);

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность насыщенной жидкости (при $p = 1$ бар: $\rho_{\text{ж}} = 958,4$ кг/м³);

l_0 – характерный размер поверхности теплообмена (в случае дна $l_0 = d$; в случае боковой поверхности $l_0 = h$).

c – поправочный коэффициент на расположение поверхности (в случае горизонтальной поверхности $c = 0.72$, в случае вертикальной $c = 0.943$)

Δt – разница температур между поверхностью теплообмена и жидкостью в которую она погружена:

$$\Delta t = t_c - t_s$$

где t_c – можно (учитывая малую толщину стенки ампулы) в первом приближении принять равной температуре на её внутренней поверхности.

$$t_c = t_{\text{внеш}}$$

где $t_{\text{внеш}}$ – температура внешней термопары, заключенной между медной болванкой и стальным корпусом.

Чтобы найти средний коэффициент теплоотдачи по всей поверхности ампулы, необходимо сложить теплоотдачи по поверхностям, предварительно соотнося их к долям этих поверхностей от общей поверхности ампулы.

$$\alpha = \alpha_{\text{бок}} \cdot \frac{F_1}{F} + \alpha_{\text{дно}} \cdot \frac{F_2}{F}$$

Получившиеся результаты не должны расходиться более чем на 5%.

Для оценки величины плотности теплового потока используется соотношение:

$$q = \frac{Cp_{\text{Ампулы}} \cdot (t_{\tau_1}^{\text{cp}} - t_{\tau_2}^{\text{cp}}) \cdot m_{\text{Ампулы}}}{(\tau_2 - \tau_1) \cdot F},$$

где среднее изменение температур тела во времени на коротком участке можно описать линейными функциями:

$$t_{\tau}^{\text{cp}} = \frac{t_{\tau}^{\text{внутр}} + t_{\tau}^{\text{внеш}}}{2}$$

Индексы «внутр» и «внеш» соответствуют термопарам заключенным в центре и на поверхности медной болванки.

Вторая критическая плотность теплового потока экспериментально оценивается следующим образом:

$$t_{\text{пр}} = 300 + 0.33 \cdot (p - 1).$$

Сначала по данной формуле находится температура предельного перегрева жидкости, которая как и температура насыщения, является функцией только давления (p – давление в барах). Затем оценивается величина критического температурного напора:

$$\Delta t_{\text{кр2}} = 0,9 \cdot (t_{\text{пп}} - t_s)$$

После чего по закону Ньютона – Рихмана можно записать:

$$q_{\text{кр2}} = \alpha_{\text{кр2}} \cdot \Delta t_{\text{кр2}},$$

где $\alpha_{\text{кр2}}$ соответствует значению коэффициента теплоотдачи полученному в результате эксперимента.

При необходимости полученный результат можно сравнить с теоретическим соотношением полученным С.С. Кутателадзе:

$$q_{\text{кр2}} = 0.14 \cdot r \cdot \rho_{\text{п}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\sigma \cdot g \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}{\rho_{\text{ж}}^2}}$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения (при $p = 1$ бар: $\sigma = 588,6 \cdot 10^{-4}$ Н/м).

3.7.5. Подготовка установки к работе (для лаборанта)

1. Заземлить установку с помощью винта заземления, находящегося на задней панели установки.
2. Залить дистиллированную воду в стеклянную емкость (9), до отметки, обозначенной на стенке емкости, через виниловую трубку (20). (уровень воды в стеклянной емкости должен находиться на расстоянии 4 – 5 сантиметров от верхней крышки емкости).
3. Подключить установку к евrorазетке через евровилку. Проверить заземление установки с помощью тестера.

3.7.6. Программа исследования

3.7.6.1. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис.3.7.3.

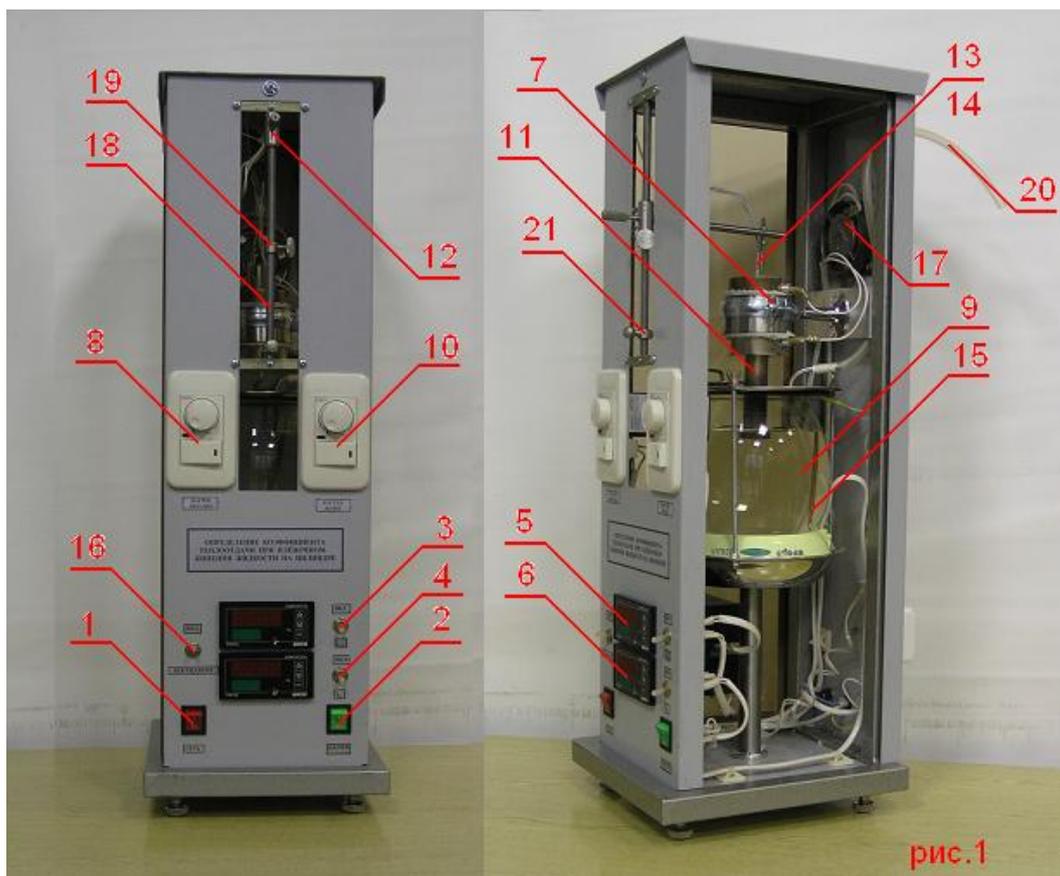


Рис. 3.7.3. Схема установки

На рис. 3.7.3. представлена передняя панель установки, на которой находится:

1. тумблер сеть (1),
2. тумблер включения нагревателей (2),
3. тумблер (3 и 4),
4. включение измерителей температуры ТРМ-200 (5 и 6).

Нагрев цилиндрического образца (11) в печи (7) производится включением диммера (8). Нагрев воды в стеклянной емкости (9) производится включением диммера (10).

Перемещение образца (11) из печи в воду производится ползунком (12). Измерители температуры соединены с хромель–копелевой термопарой (13), размещенной в центре цилиндрического образца и хромель–копелевой термопарой (14), размещенной на его образующей.

Первый канал измерителя температуры (5) подключен к термопаре (13).

Первый канал измерителя температуры (6) подключен к термопаре (14). Температура воды в стеклянной емкости измеряется

термопарой (15), подключенной ко второму каналу, измерителя температуры (6).

Тумблер (16) включает вентилятор (17), расположенный на задней панели установки. Вентилятор служит для вытягивания влажного воздуха из корпуса установки.

На направляющей (18) расположен фиксирующий зажим (19) для фиксации положения цилиндра в стеклянной емкости.

В опыте цилиндр должен быть погружен в воду на 15 – 35 мм. Величина погружения влияет на продолжительность пленочного кипения воды на стенках цилиндра.

На задней панели установки находится виниловая трубка (20) через которую производится заполнение дистиллированной водой стеклянной емкости (9), до уровня, не превышающего отметки на стенке емкости.

В процессе нагрева воды в емкости (9) отверстие в крышке емкости закрывается задвижкой (21).

Цилиндрический образец, (11) представляет собой тонкостенную оболочку из нержавеющей стали, внутри которой запрессован медный цилиндр.

3.7.6.2. Проведение опыта

После ознакомления с описанием экспериментальной установки необходимо заготовить форму протокола для записи наблюдений.

Проведение эксперимента осуществляется по следующей схеме:

4. Записать данные установки, условия опыта.
5. Включить установку тумблером «Сеть» (1).
6. Включить тумблером (2), электропитание диммеров установки.
7. Поместить в электрическую печь (7) образец (11) , с помощью ползунка (12). Нижнее основание цилиндрического образца должно находиться на уровне нижнего основания печи.
8. Включить диммером (10) «Нагрев воды», нагреватель стеклянной емкости (9). (Включение диммера производить в следующем порядке: нажать правую сторону клавиши диммера, при этом должна отключиться неоновая лампочка клавиши, повернуть, со щелчком, круглый регулятор мощности диммера по часовой стрелке.)
9. Включить вентилятор (17) с помощью тумблера (16).
10. Включить электропитание печи (7), с помощью диммера (8) «нагрев образца». (Включение диммера производить в следующем порядке: нажать правую сторону клавиши диммера, при этом

- должна отключиться неоновая лампочка клавиши, повернуть, со щелчком, круглый регулятор мощности диммера по часовой стрелке.)
11. Установить регулятор мощности диммера (10) в среднее положение.
 12. Включить измерители температуры (5 и 6), с помощью тумблеров (3 и 4).
 13. Нагреть воду в емкости (9) до кипения, контролируя её температуру с помощью измерителя (6). При вскипании жидкости в емкости уменьшить мощность нагревателя с помощью диммера (10), поворотом его круглой ручки против часовой стрелки до щелчка. В дальнейшем необходимо поддерживать температуру воды в емкости на уровне $(95 - 98)^{\circ}\text{C}$, периодическим включением диммера поворотом ручки.
 14. Нагреть образец (11) до температуры 450°C контролируя температуру по измерителю температуры (5). (При достижении данной температуры выключить нагреватель печи с помощью диммера (8), поворотом его круглой ручки против часовой стрелки до щелчка.)
 15. С помощью ползунка (12) опустить образец (11) в воду, на глубину установленную с помощью фиксатора (19). Рекомендуемая глубина составляет $(15 - 35)$ мм.
 16. Произвести отсчет показаний термомпар (13 и 14), с помощью измерителя температуры (5) через равные промежутки времени $(2 - 5)$ секунд.
 17. Охладить образец (11) до температуры жидкости в емкости (9).
 18. С помощью клавиш диммеров (8 и 10) отключить нагреватели печи и емкости.
 19. С помощью тумблера (2) отключить электропитание диммеров (8 и 10).
 20. С помощью тумблеров (3 и 4) отключить электропитание измерителей температуры (5 и 6).
 21. С помощью тумблера (1) отключить электропитание установки.

3.7.7. Обработка результатов исследования

Данные установки и таблица результатов измерений:

Диаметр стальной ампулы - 25 мм.

Масса стальной ампулы - 0,075 кг.

Масса медного цилиндра - 0,2 кг.

3.7.8. Требования к содержанию отчета по работе

Рекомендуется следующая структура отчета по лабораторной работе:

15. Титульный лист.
16. Задание к лабораторной работе.
17. Описание схемы экспериментальной установки и методики расчёта.
18. Результаты расчета оформить в виде таблицы .
19. Анализ результатов и выводы по работе.