

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Ивановский государствен-
ный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Кафедра теоретических основ теплотехники

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ

Методические указания по выполнению лабораторной работы
при изучении дисциплины «Тепломассообмен»

Иваново 2013

Составители: В.В. БУХМИРОВ
А.К. ГАСЬКОВ
М.Г. СУЛЕЙМАНОВ

Редактор Т.Е. СОЗИНОВА

Методические указания содержат задание на выполнение работы, основные теоретические сведения об исследуемом процессе, описание экспериментальной установки и оборудования. В методических указаниях также приведены: порядок проведения опытов, алгоритм обработки полученных данных и представления результатов, а также вопросы для подготовки к отчету по работе в целом.

Предназначены для выполнения студентами лабораторной работы «Исследование теплоотдачи при кипении».

Лабораторная работа выполняется в соответствии с рабочими программами курсов «Тепломассообмен», «Теплотехника» и «Теоретические основы теплотехники».

Методические указания утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ

Рецензент

кафедра теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАДАНИЕ	4
ОСНОВЫ ТЕОРИИ	4
Введение	4
1. Теплоотдача при кипении	6
1.1. Уравнение теплоотдачи	6
1.2. Коэффициент теплоотдачи	6
1.3. Режимы кипения (теплоотдачи)	7
1.3.1. Пузырьковый режим	7
1.3.2. Первый кризис кипения. Переходный режим	9
1.3.3. Второй кризис кипения. Пленочный режим	9
2. Построение функциональной модели методом наименьших квадратов	9
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА	12
1. Постановка задачи исследования	12
2. Описание экспериментальной установки	12
3. Меры безопасности	14
4. Порядок проведения опыта	15
5. Обработка опытных данных	16
6. Определение функциональной зависимости $\alpha=f(q)$	17
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	18
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	19

ЗАДАНИЕ

1. Определить коэффициенты теплоотдачи (α) при пузырьковом кипении воды на поверхности горизонтальной медной трубки, обогреваемой электрическим током, при различных тепловых нагрузках (q).
2. Установить зависимость $\alpha=f_1(q)$.
3. Установить зависимость $\alpha=f_2(\Delta T_w)$.
4. Подготовить отчет, включающий схему экспериментальной установки, журнал наблюдений, протокол (таблицу) с результатами обработки данных, график $\alpha=f_1(q)$ с нанесенными опытными точками, выкладки по определению аналитических зависимостей.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ

Введение

Теплообмен – это самопроизвольный необратимый процесс передачи энергии от одного тела к другому или от одной части тела к другой, обусловленный различием их температур.

Существуют следующие элементарные виды теплообмена: **теплопроводность, конвекция теплоты и тепловое излучение.**

Сочетание теплопроводности и конвекции, наблюдаемое в жидкостях, называют **конвективным теплообменом.**

Если конвективный теплообмен происходит между поверхностью и жидкостью, омывающей эту поверхность, то такой вид теплообмена называют **конвективной теплоотдачей.**

В зависимости от фазового состояния жидкости различают теплоотдачу **в однофазной среде** и теплоотдачу **при фазовых превращениях**, например **при конденсации** (переход пара в жидкость) и **кипении** (переход жидкости в пар).

Кипением называется процесс образования пара внутри объема жидкости в виде паровых пузырьков или паровой пленки.

При конвективной теплоотдаче кипение происходит около нагретой поверхности теплообмена (около стенки). Если при этом происходит свободная конвекция жидкости в «неограниченном» пространстве, то процесс называют «теплоотдачей при кипении в большом объеме». Объем считается большим (неограниченным), если изменение его размеров не влияет на процесс теплообмена между жидкостью и стенкой. В противоположность этому процесс называют «теплоотдачей при кипении в ограниченном объеме», например при кипении жидкости в трубах.

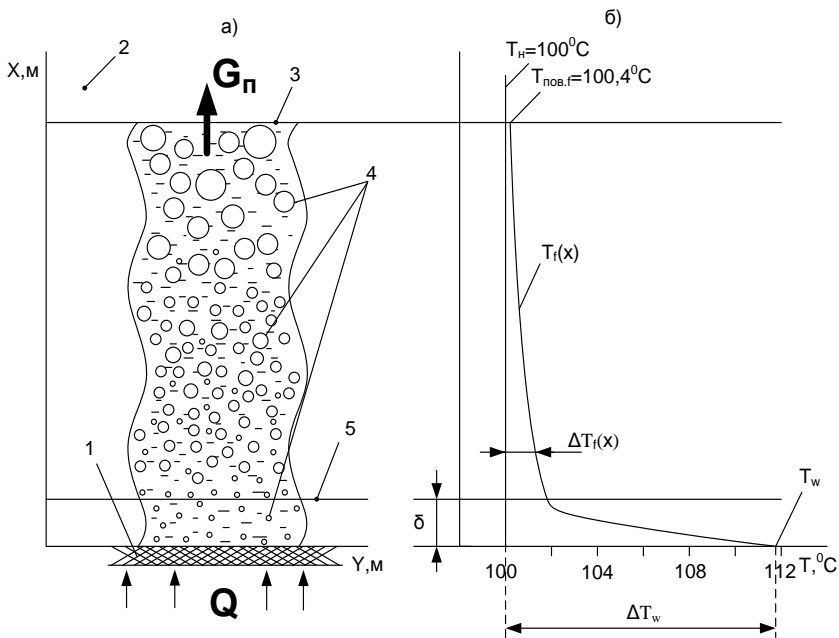


Рис.1. Пример распределения температуры в объеме кипящей воды ($T_w=111,8^\circ C$, $p_n=1$ бар):

а – картина процесса кипения; б – распределение температуры; 1 – поверхность теплообмена (стенка); 2 – насыщенный водяной пар; 3 – поверхность воды; 4 – всплывающие паровые пузыри; 5 – внешняя граница пограничного слоя; $T_{пов.ж}$ – температура поверхности жидкости; T_w – температура поверхности теплообмена (стенки); T_n – температура насыщения жидкости при заданном давлении; p_n – давление насыщения; δ – толщина пограничного слоя; Q – тепловой поток от стенки к воде; G_n – массовый расход образовавшегося пара

В процессе теплоотдачи в кипящей жидкости формируется температурное поле (рис.1,б). При этом жидкость оказывается перегретой выше температуры насыщения, соответствующей давлению в жидкости.

В температурном поле можно выделить две характерные области.

Тепловой пограничный слой – весьма тонкий слой жидкости, прилегающий непосредственно к поверхности стенки, в пределах которого сосредоточено практически все изменение температуры жидкости: от температуры поверхности до температуры в ядре потока (см. рис.1).

Тепловое ядро потока – вся остальная жидкость за пределами теплового пограничного слоя.

1. Теплоотдача при кипении

1.1. Уравнение теплоотдачи

При кипении, как и во всех других процессах теплоотдачи, используют уравнение теплоотдачи (**закон Ньютона**), устанавливающее связь между температурным напором «стенка – жидкость» и тепловым потоком через поверхность теплообмена:

$$Q = \alpha \cdot (T_w - T_n) \cdot F \quad (1)$$

или
$$Q = \alpha \cdot \Delta T_w \cdot F, \quad (2)$$

или
$$q = \alpha \cdot \Delta T_w, \quad (3)$$

где Q – тепловой поток, Вт; $q=Q/F$ – поверхностная плотность теплового потока, Вт/м²; F – поверхность теплообмена (стенки), м²; α – средний по поверхности F коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); T_w – температура поверхности теплообмена (стенки), °С; T_n – температура насыщения жидкости при заданном давлении, °С.

При этом в качестве температурного напора выступает перегрев стенки (см. рис. 1):

$$\Delta T_w = T_{f, \max} = T_w - T_n, \quad (4)$$

где $\Delta T_{f, \max}$ – максимальный перегрев жидкости, °С.

Таким образом, тепловой поток пропорционален площади F поверхности теплообмена и температурному напору ΔT_w между стенкой и жидкостью.

1.2. Коэффициент теплоотдачи

Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м²К), – это коэффициент пропорциональности в законе Ньютона, характеризующий интенсивность теплоотдачи.

Величина коэффициента теплоотдачи при кипении зависит от большого числа различных факторов: а) физических свойств жидкости; б) чистоты жидкости; в) ее температуры и давления; г) геометрической формы, размеров и ориентации в пространстве поверхности теплообмена; д) материала и шероховатости (чистоты обработки) поверхности; е) величины перегрева жидкости и т.п. Поэтому определение коэффициента теплоотдачи при кипении – весьма трудная задача.

Различают локальное (в данной точке поверхности) и среднее по поверхности теплообмена значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta T_w \cdot F}, \quad (5)$$

то есть коэффициент теплоотдачи численно равен тепловому потоку, передаваемому через единицу поверхности теплообмена при температурном напоре в 1°C (1 K).

Выражение (5) позволяет рассчитать коэффициент теплоотдачи на основе экспериментального определения величин Q , F и ΔT_w .

1.3. Режимы кипения (теплоотдачи)

Физический механизм кипения и интенсивность теплоотдачи зависят от величины перегрева стенки (4). Выделяют три основных режима кипения: пузырьковый, переходный и пленочный (рис.2).

1.3.1. Пузырьковый режим

Радиус межфазной поверхности пузырька-зародыша пропорционален размеру образующей его микрошероховатости на поверхности стенки. Поэтому в начале пузырькового режима кипения, при незначительном перегреве жидкости, «работают» лишь крупные центры парообразования, поскольку пузырьки-зародыши малых центров имеют радиус меньше критического. С увеличением перегрева жидкости активизируются более мелкие центры парообразования, поэтому количество образующихся пузырей и частота их отрыва возрастают.

В результате интенсивность теплоотдачи чрезвычайно быстро увеличивается (рис.2, область 2). Коэффициент теплоотдачи (α) достигает десятков и даже сотен тысяч $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{K})$ (при высоких давлениях). Это обусловлено большой удельной теплотой фазового перехода и интенсивным перемешиванием жидкости растущими и отрывающимися пузырьками пара.

Режим пузырькового кипения обеспечивает наиболее эффективную теплоотдачу. Этот режим применяется в парогенераторах тепловых и атомных электростанций, при охлаждении двигателей, элементов конструкции энергетических, металлургических, химических агрегатов, работающих в условиях высоких температур.

Теплоотдача при пузырьковом режиме пропорциональна количеству действующих центров парообразования и частоте отрыва пузырей, которые, в свою очередь, пропорциональны максимальному перегреву

ΔT_w жидкости и давлению p_n . В силу этого средний коэффициент теплоотдачи может быть рассчитан по формуле вида

$$\alpha = C_1 \cdot \Delta T_w^n \cdot p_n^z \quad (6)$$

или после подстановки условия (3) в виде $\Delta T_w = q/\alpha$ получим

$$\alpha = C_2 \cdot q^m \cdot p_n^k \quad (7)$$

где C_1, C_2, k, z, m, n – эмпирические постоянные; ΔT_w – перегрев стенки, $^{\circ}\text{C}$; p_n – давление насыщения (внешнее давление жидкости), бар; q – поверхностная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Формулу (6) используют в расчетах пузырькового кипения при граничных условиях первого рода. В этом случае регулируемой (заданной) величиной является температура стенки и, следовательно, перегрев жидкости (4), а формулу (7) применяют в расчетах кипения при граничных условиях второго рода (регулируемая (заданная) величина – плотность теплового потока (q) на поверхности стенки).

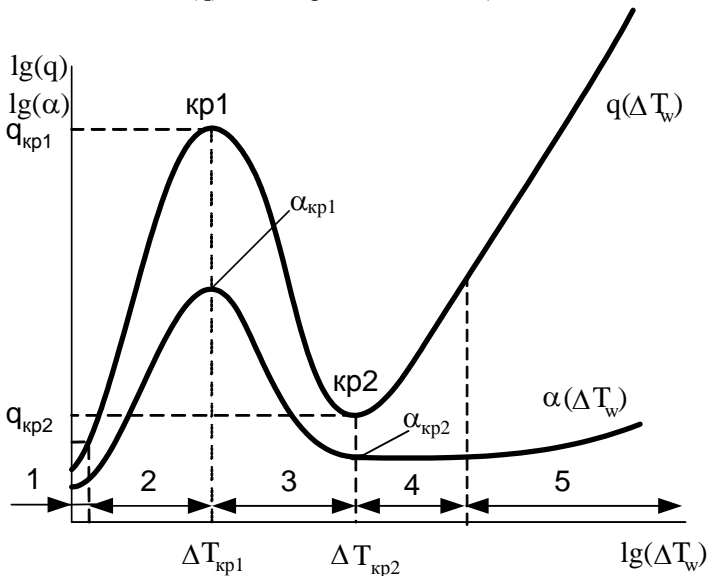


Рис. 2. Кривые теплоотдачи при кипении:

1 – конвективная область без кипения; 2 – область пузырькового кипения; 3 – переходная область; 4 – область пленочного кипения; 5 – участок пленочного кипения со значительной долей передачи тепла излучением; кр1, кр2 – соответственно точки первого и второго кризисов кипения

1.3.2. Первый кризис кипения. Переходный режим

При дальнейшем увеличении перегрева (ΔT_w) интенсивность теплоотдачи, достигнув максимума в критической точке «кр1», начинает снижаться (см. рис.2 область 3) из-за слияния всевозрастающего количества пузырей в паровые пятна. Площадь паровых пятен возрастает по мере увеличения ΔT_w и охватывает в итоге всю стенку, превращаясь в сплошную паровую пленку, плохо проводящую теплоту. Таким образом, происходит постепенный переход от пузырькового режима кипения к пленочному, сопровождающийся снижением интенсивности теплоотдачи.

Начало такого перехода называют **первым кризисом кипения**. Под кризисом понимают коренное изменение механизма кипения и теплоотдачи.

1.3.3. Второй кризис кипения. Пленочный режим

При дальнейшем увеличении перегрева (ΔT_w) интенсивность теплоотдачи, достигнув минимума во второй критической точке «кр2», снова начинает возрастать в области пленочного режима кипения (см. рис.2, области 4 и 5). Такую перемену характера влияния перегрева на теплоотдачу называют **вторым кризисом кипения**.

В пленочном режиме кипения сплошная пленка пара оттесняет жидкость от поверхности и условия теплообмена стабилизируются, а коэффициент теплоотдачи перестает снижаться, оставаясь практически постоянным. Тепловой же поток, согласно закону Ньютона (3), снова начнет увеличиваться из-за возрастания температурного напора ΔT_w .

Интенсивность теплоотдачи в пленочном режиме кипения весьма низка, и это приводит к сильному перегреву поверхности теплообмена.

2. Построение функциональной модели методом наименьших квадратов

При обработке опытных данных необходимо определить функциональную зависимость между измеряемыми величинами.

Пусть имеется N совместных измерений величин $\{x_i, y_i\}$ ($i=1,2,\dots,N$), связанных функциональной зависимостью. Известно также, что это уравнение прямой линии:

$$y = b + k \cdot x, \quad (8)$$

Измерения получены с некоторой погрешностью, поэтому величины x_i и y_i содержат случайную составляющую и точки $\{x_i, y_i\}$ не лежат на одной прямой (рис.3). Поэтому между точками на графике, в принципе, можно провести множество прямых.

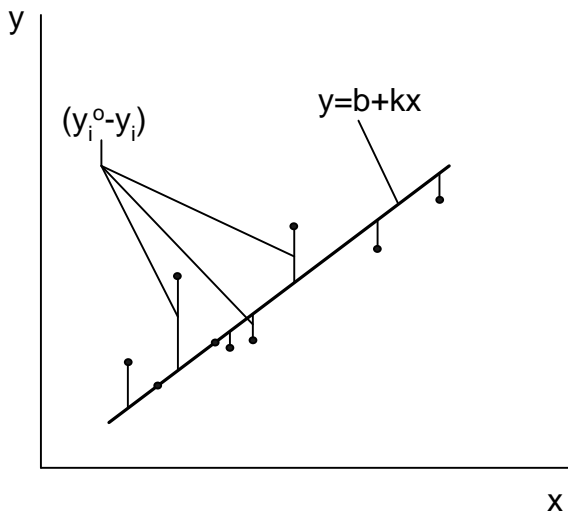


Рис.3. Метод наименьших квадратов (в качестве наилучшей берется прямая, для которой сумма квадратов отклонений минимальна)

Методами математической статистики доказано, что прямая будет наилучшим образом аппроксимировать экспериментальные данные, если сумма квадратов отклонений (рис.3) опытных точек от этой линии будет минимальна:

$$\sum_{i=1}^N (y_i^o - y_i)^2 = \min, \quad (9)$$

где y_i^o — результаты измерений; $y_i=b+k \cdot x_i$ — значение, предсказанное уравнением (9).

Метод нахождения функциональной зависимости на основе условия (9) получил название метода наименьших квадратов (МНК).

Коэффициенты уравнения (8) рассчитывают по следующим формулам:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{cp}) \cdot (y_i - y_{cp})}{\sum_{i=1}^N (x_i - x_{cp})^2} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta x_i \cdot \Delta y_i}{\sum_{i=1}^N (\Delta x_i)^2}; \quad (10)$$

$$b = y_{cp} - k \cdot x_{cp}, \quad (11)$$

где $\Delta x_i = x_i - x_{cp}$, $\Delta y_i = y_i - y_{cp}$, x_{cp} , y_{cp} – среднее арифметическое N результатов измерений величин x_i и y_i соответственно:

$$x_{cp} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i, \quad y_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i. \quad (12)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА

1. Постановка задачи исследования

На основе физических опытов для пузырькового режима кипения воды при атмосферном давлении необходимо установить зависимость коэффициента теплоотдачи от перегрева стенки (6) и от плотности теплового потока (7).

Так как давление в опытах постоянно ($p=p_a=\text{const}$), то зависимости (6) и (7) можно упростить:

$$\alpha = C \cdot \Delta T_w^n; \quad (13)$$

$$\alpha = B \cdot q^m, \quad (14)$$

где C , n , B и m – эмпирические коэффициенты. Величина давления учитывается значениями коэффициентов « C » и « B », следовательно, эти формулы будут применимы только для заданного давления (в данной работе – для атмосферного давления).

Решение задачи включает в себя следующие этапы:

- 1) определение опытным путем для ряда значений тепловой нагрузки « q_i » (плотности теплового потока) и соответствующих значений коэффициентов теплоотдачи « α_i », где $i=1,2,\dots,N$;
- 2) определение таких значений коэффициентов « B » и « m », при которых функция (14) наилучшим образом соответствует опытным точкам на графике $q_i = f(\alpha_i)$;
- 3) определение функции (13) (расчет коэффициентов « C » и « n ») по значениям коэффициентов « B » и « m » путем подстановки выражения (3) в уравнение (14).

2. Описание экспериментальной установки

На передней панели экспериментальной установки (рис. 4) находятся измеритель температуры (2) типа УКТ38, к которому подключены три хромель-копелевые термопары (11), (12) и (13), тумблер электропитания установки (1), разъёмы V (3) для подключения цифрового переносного мультиметра типа МУ67 (5), предназначенного для измерения напряжения. Передняя панель также снабжена смотровым окном для наблюдения за процессом кипения.

Исследуемая поверхность теплообмена (10) – медная тонкостенная трубка ($d = 15$ мм, $L = 50$ мм). Внутри опытной трубки находится нагревательный элемент, соединенный с лабораторным автотрансформато-

ром (7). Изменение теплового потока на поверхности трубки осуществляется поворотом рукоятки лабораторного автотрансформатора.

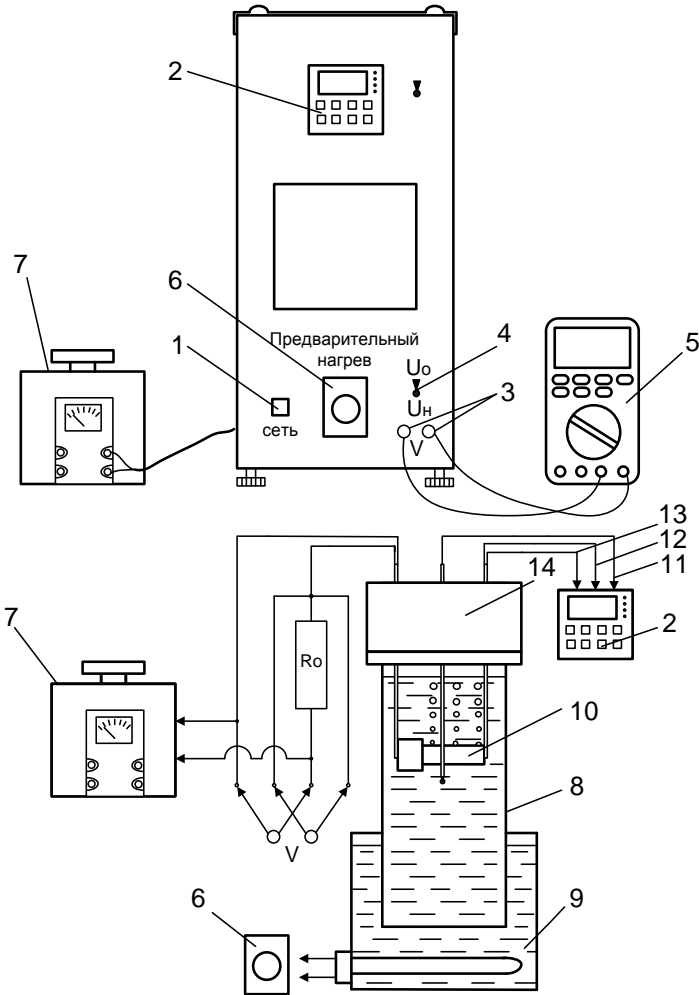


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:

1 – тумблер электропитания установки; 2 – измеритель температуры; 3 – разъемы (V) для подключения мультиметра; 4 – тумблер для переключения мультиметра на измерение напряжения U_0 и напряжения U_n ; 5 – цифровой переносной мультиметр типа МУ67; 6 – регулятор мощности электрического водоподогревателя; 7 – лабораторный автотрансформатор; 8 – цилиндрическая стеклянная ёмкость; 9 – электрический водоподогреватель; 10 – нагреваемая медная трубка; 11 – хромель-копелевая термопара, измеряющая температуру воды; 12, 13 – хромель-копелевые термопары, измеряющие температуру стенки трубки; 14 – конденсатор

Электрическая мощность нагревательного элемента, а значит, и тепловой поток, выделяемый внутри трубки и отводимый от её поверхности к воде, определяется по значению напряжения и силы тока. Величина электрического тока рассчитывается путем измерения падения напряжения на образцовом сопротивлении R_0 , включенном в цепь последовательно с нагревательным элементом. Для переключения мультиметра на измерение падения напряжения на образцовом сопротивлении (U_0) и напряжения на нагревателе опытной трубки (U_n) служит тумблер (4).

Температура поверхности медной трубки измеряется в двух точках хромель-копелевыми термопарами (12) и (13). Для измерения температуры воды в ёмкости (8) вблизи поверхности трубки размещена термопара (11). Термопары подключены к измерительному прибору УТК38 в следующей последовательности:

- 1 канал – термопара (11);
- 2 канал – термопара (12);
- 3 канал – термопара (13).

Медная трубка (10) находится в стеклянной ёмкости (8), помещенной в электрический водоподогреватель (9). Ёмкость (8) закрыта крышкой, на которой смонтирован конденсатор (14), предназначенный для конденсации выделяющегося пара.

Водоподогреватель (9) предназначен для предварительного подогрева воды до температуры 60 ± 70 °С. Мощность дополнительного электронагревателя изменяется регулятором (6).

3. Меры безопасности

1. Перед включением установки инженер (лаборант) проверяет уровень воды в водоподогревателе и в стеклянной ёмкости.
2. Включение стенда производится ИНЖЕНЕРОМ ИЛИ ПРЕПОДАВАТЕЛЕМ, ведущим занятие.
3. Температура воды в установке должна быть на $2 \div 3$ °С ниже температуры кипения (насыщения).
4. Категорически запрещается снимать верхнюю крышку установки и вынимать боковое защитное стекло во избежание касания токопроводящих элементов.
5. Все действия с лабораторным автотрансформатором производить под наблюдением инженера или преподавателя.

4. Порядок проведения опыта

Эксперимент выполняется только в присутствии инженера или преподавателя в следующем порядке.

1. Включить тумблер электропитания установки 1 (см. рис. 4), а также измеритель температуры 2.
2. Включить водоподогреватель 9, повернув ручку регулятора мощности 6 по часовой стрелке на $\frac{1}{2}$ оборота.
3. После нагрева воды в стеклянной ёмкости до температуры $60 \div 70$ °C (через 30÷40 мин.) выключить водоподогреватель. Процесс нагрева воды контролируется по первому каналу измерителя температуры 2, к которому подключена термопара 11.
4. Переключатель мультиметра 5 установить на измерение переменного напряжения. Переключить тумблер 4 на измерение напряжения на нагревательном элементе U_n .
5. Установить выходное напряжение на лабораторном автотрансформаторе 7 около 150 В, пользуясь показаниями мультиметра.
6. Переключить тумблер 4 в положение U_0 и зарегистрировать значение напряжения на образцовом сопротивлении U_0 .
7. Записать в журнал наблюдений (табл. 1):
 - а) показания мультиметра U_n и U_0 ;
 - б) температуру воды (первый канал измерителя температуры) и температуры стенки опытной трубки (второй и третий каналы измерителя температуры).

Таблица 1

Журнал наблюдений

№ п/п	$U_n, \text{В}$	$U_0, \text{В}$	$T_1=T_f, ^\circ\text{C}$	$T_2=T_{w1}, ^\circ\text{C}$	$T_3=T_{w2}, ^\circ\text{C}$
1					
2					
3					
4					

8. Измерение температуры поверхности опытной трубки повторять через каждые 5÷10 мин до достижения стационарного режима теплоотдачи, при котором значения температур стенки практически перестанут изменяться во времени.
9. Во время опыта через смотровое окно наблюдают за интенсивностью образования пузырьков пара на поверхности опытной трубки.
10. Переключить тумблер 4 в положение U_n . Вращая рукоятку лабораторного автотрансформатора, установить следующее значение напряжения в диапазоне 150÷200 В.

11. Повторить опыты, следуя указаниям пунктов 6–10, для 3 или 4 режимов, соответствующих разным значениям U_n .

5. Обработка опытных данных

Для каждого опыта определить и занести в таблицу (табл. 2) следующие величины.

1. Тепловой поток, отводимый от поверхности трубки к воде путем теплоотдачи при кипении, Вт,

$$Q = N_n = I_n \cdot U_n = \frac{U_0}{R_0} \cdot U_n, \quad (15)$$

2. Плотность теплового потока на поверхности трубки, Вт/м²,

$$q = \frac{Q}{F}, \quad (16)$$

где $F = \pi \cdot d \cdot L$ – площадь поверхности теплообмена трубки с жидкостью, м²; d – наружный диаметр трубки, м; L – длина трубки, м.

3. Среднюю температуру поверхности стенки, °С,

$$T_w = \frac{T_2 + T_3}{2}, \quad (17)$$

где T_2 и T_3 – температуры стенки опытной трубки, °С.

4. Температурный напор между стенкой и жидкостью, °С,

$$\Delta T_w = T_w - T_f \quad (18)$$

где T_f – температура насыщения жидкости при заданном давлении, °С.

5. Коэффициент теплоотдачи при кипении, Вт/(м²К),

$$\alpha = \frac{q}{\Delta T_w} \quad (19)$$

6. $\lg(q)$ – логарифм плотности теплового потока.
7. $\lg(\alpha)$ – логарифм коэффициента теплоотдачи.

Затем следует построить систему логарифмических координат $\lg(\alpha)$ - $\lg(q)$ и нанести на ней опытные точки $\{\lg(q)_i; \lg(\alpha)_i\}$.

Таблица 2

Результаты расчета								
№ п/п	Q	q	T _w	T _f	ΔT _w	α	lg(q)	lg(α)
	Вт	Вт/м ²	⁰ С	⁰ С	⁰ С	Вт/(м ²⁰ С)	-	-
1								
2								
3								
4								

6. Определение функциональной зависимости $\alpha=f(q)$

Определяемую нелинейную зависимость (14) удобно представить в логарифмических координатах, где она принимает вид прямой линии:

$$\lg \alpha = \lg B + m \cdot \lg q, \quad (20)$$

что равносильно уравнению (8), где $y = \lg(\alpha)$; $b = \lg(B)$; $k = m$; $x = \lg(q)$.

Это позволяет определить функциональную зависимость $\alpha=f(q)$ методом наименьших квадратов, рассчитав коэффициенты b и k по формулам (10), (11) и (12).

Расчет коэффициентов удобно вести, заполняя таблицу (табл. 3.)

Таблица 3

Определение функциональной зависимости $\alpha=f(q)$

i	x _i = lg(q _i)	Δx _i = x _i -x _{ср}	(Δx _i) ²	y _i = lg(α _i)	Δy _i = y _i -y _{ср}	Δx _i · Δy _i
1						
2						
3						
4						
Σ						
Ср.		-	-		-	-

Определив значения коэффициентов b и k , в системе логарифмических координат $\lg(\alpha)$ - $\lg(q)$ построить прямую линию по найденному уравнению (20), а также восстановить уравнение $\alpha=f(q)$ по выражению (14). Заметим, что коэффициенты « m » и « B » в формуле для расчета коэффициента теплоотдачи (14) определяются как $m = k$, а $B=10^b$.

Уравнение для расчета α при граничных условиях первого рода (13) получают подстановкой выражения (3) в найденное уравнение (14).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение понятий *конвекция, конвективный теплообмен, конвективная теплоотдача*.
2. Чем отличается конвективная теплоотдача при кипении от конвективной теплоотдачи в однофазной среде?
3. Какой вид теплообмена исследуется в данной работе?
4. Дайте определение процесса кипения.
5. Что такое теплоотдача при кипении в большом объеме?
6. Что такое центры парообразования? Назовите стадии парообразования.
7. Что такое критический радиус пузырька?
8. Напишите формулу расчета теплового потока при пузырьковом кипении в большом объеме и поясните входящие в неё величины.
9. Назовите основные факторы, влияющие на величину коэффициента теплоотдачи при кипении.
10. Изобразите кривые кипения $\alpha=f_1(\Delta T_w)$ и $q=f_2(\Delta T_w)$. Укажите режимы кипения и соответствующие им области на графике.
11. Дайте характеристику пузырькового режима кипения. Укажите соответствующую область на кривой кипения.
12. Дайте характеристику 1-го кризиса кипения и переходного режима кипения. Укажите соответствующую область на кривой кипения.
13. Дайте характеристику 2-го кризиса кипения и пленочного режима кипения. Укажите соответствующую область на кривой кипения. Какие две подобласти характерны для пленочного кипения?
14. Что такое кризисы кипения? Дайте характеристику первого и второго кризисов кипения. Изобразите на графике особенности смены режимов кипения при граничных условиях первого и второго рода.
15. Поясните принцип работы лабораторного стенда и назначение элементов по схеме экспериментальной установки.
16. Опишите порядок проведения опыта и заполнения таблицы наблюдений.
17. Как получить уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи при граничных условиях 1-го рода?
18. Для какого режима кипения могут быть использованы полученные вами уравнения?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Исаченко, В.П.** Теплопередача/В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. **Бухмиров, В.В.** Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен»/В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, Ю.С. Солнышкова. – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2009.- 102 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ

Методические указания по выполнению лабораторной работы
при изучении дисциплины «Тепломассообмен»

Составители: Бухмиров Вячеслав Викторович
Гаськов Александр Константинович
Сулейманов Муса Гусейнович

Редактор Т.В. Соловьева

Подписано в печать Формат 60x84¹/₁₆
Печать плоская. Усл.печ.л.1,16 Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»
153003, г.Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ