

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО ТЕПЛОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ  
В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
УСТАНОВКАХ**

*Рекомендовано УМО "Ядерные физика и технологии"  
в качестве учебного пособия для студентов  
высших учебных заведений*

МОСКВА 2008

УДК 621.039.51(076.5)  
ББК 31.46я7  
Л12

**Лабораторный практикум по тепловым измерениям в энергетических установках:** *Учебное пособие* /В.В. Архипов, И.С. Быков, В.А. Корсун, К.В. Куценко, Ю.Е. Похвалов, М.Б. Шарифьянов. М.: МИФИ, 2008. – 104 с.

Учебное пособие является руководством для выполнения лабораторных работ по тепловым измерениям в энергетических установках на кафедре теплофизики МИФИ. Оно включает описание лабораторных работ, порядок их выполнения, требования к оформлению отчета и необходимые справочные данные.

Учебное пособие предназначено для студентов, специализирующихся в области теплофизики ядерных реакторов по специальности 140305 «Ядерные реакторы и энергетические установки».

Пособие подготовлено в рамках Инновационной образовательной программы МИФИ

Рецензент: кандидат физ. -мат. наук, доцент Г.В. Тихомиров

ISBN 978–5–7262–1026–1 © Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет), 2008

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	4
<b>Часть 1. Тепловые измерения в энергетических установках</b> .....	6
<i>Работа 1.</i> Статические характеристики датчиков температуры.....	6
<i>Работа 2.</i> Динамические характеристики контактных и бесконтактных датчиков температуры.....	15
<i>Работа 3.</i> Элементы гидродинамики двухфазного потока. Резистивный датчик истинного газосодержания.....	29
<i>Работа 4.</i> Градуировка оптического пирометра бесконтактного датчика высоких температур.....	45
<i>Работа 5.</i> Теплоотдача при вынужденном движении воды в трубе.....	65
<i>Работа 6.</i> Исследование теплопередачи в теплообменнике «труба в трубе».....	76
<b>Часть 2. Теплофизические измерения в ЯЭУ</b> .....	86
2.1. Особенности измерений в реакторных условиях.....	86
2.2. Роль теплофизических методов в контроле ядерного реактора.....	87
2.3. Теплотехнические датчики.....	88
2.3.1. Датчики теплотехнического контроля параметров первого и второго контуров.....	88
2.3.2. Датчики для внутризонных измерений температуры.....	89
2.3.3. Датчики температуры для внезонных измерений в первом контуре.....	92
2.4. Определение давления и расхода.....	93
2.5. Калориметры.....	94
2.6. Комплексное использование тепловых методов.....	98

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Теплотехнические процессы характеризуются большим числом величин: температура, давление, расход, состав жидких и газообразных сред и др. Для управления энергетической установкой используются сотни измерительных датчиков – первых звеньев в цепи сбора и обработки информации. Контрольно-измерительная аппаратура способствует обеспечению безопасности и повышению эффективности ЯЭУ. Студенты должны знать основные характеристики датчиков, их конструкции, уметь проводить градуировки и оценивать погрешности измерений. Лабораторный практикум является учебным пособием для выполнения лабораторных работ студентами 5 семестра по курсу «Тепловые измерения в энергетических установках».

Первая часть практикума содержит описание комплекса лабораторных работ, в которых рассматриваются принципы действия, конструктивные схемы, различные характеристики датчиков. Работа датчиков иллюстрируется рядом методик, разработанных на кафедре теплофизики МИФИ (датчик газосодержания, метод неразрушающего контроля тепловых свойств штатных твэлов).

Во второй части практикума рассматриваются датчики теплотехнического контроля ядерного реактора и особенности внутриреакторных теплофизических измерений.

Руководства по выполнению лабораторных работ составлены по единой схеме и дополняют теоретический материал лекционного курса. Описание каждой лабораторной работы начинается с определения цели исследования, далее следует краткое изложение основных физических закономерностей, положенных в основу экспериментального метода исследования. Затем описывается экспериментальная установка и схема измерений. Указывается порядок проведения опыта и обработки результатов измерений, контрольные вопросы.

Предполагается, что перед началом лабораторных занятий проводится тестирование каждого студента по теоретической части, по методу и порядку проведения эксперимента. В связи с этим перед началом занятий в учебной лаборатории студент должен проработать необходимый материал, используя конспект лекций или литературу, список которой дан в конце описания каждой лабораторной работы.

Отчет по каждой лабораторной работе должен содержать схему установки, оформленный в рекомендованной табличной форме протокол измерений, результаты обработки экспериментальных данных и их анализ, включая оценку погрешности измерений, а также необходимые графики экспериментальных зависимостей.

---

## Часть 1. Тепловые измерения в энергетических установках

---

### Работа 1

## СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

**Цель:** изучение сравнительной методики градуировки термопар; получение аналитической зависимости термоЭДС термопары от температуры.

### 1.1. Термопары и их статическая характеристика

Термоэлектрические термометры – термопары широко используются в научных исследованиях, современной энергетике и технике. При исследовании процессов теплообмена в области средних температур (0 – 1000 °С) термопара является основным рабочим инструментом. В диапазоне температур от точки плавления сурьмы (630,74 °С) до точки плавления золота (1064,43 °С) платиноводород – платиновая термопара высокой чистоты (с отношением электросопротивления при 100 и 0 °С  $R_{100}/R_0 = 1,392$ ) служит для воспроизведения Международной практической температурной шкалы.

Термоэлектрический метод измерения температуры основан на возникновении электродвижущей силы (ЭДС) в цепи, составленной из разнородных проводников при неравенстве температур в местах соединения проводников.

Возникающая результирующая ЭДС зависит от двух температур  $t$  и  $t_0$ . Чтобы поставить термоЭДС в зависимость только от одной температуры (например,  $t$ ), необходимо температуру  $t_0$  поддерживать постоянной. Если известны результаты градуировки  $E(t, t_0 = 0^0 \text{C})$ , а в результате опыта измерена термоЭДС  $E(t, t_0 > 0^0 \text{C})$ , то для определения температуры  $t$  можно воспользоваться равенством  $E(t, 0) = E(t, t_0) + E(t_0, 0)$ , где  $E(t_0, 0)$  известная величина из той же градуировки.

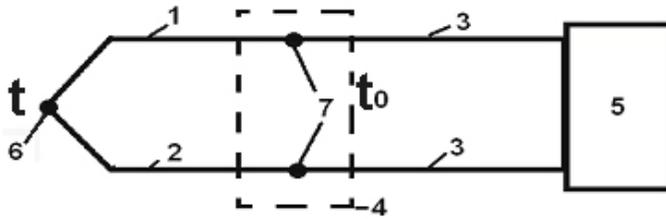


Рис. 1.1. Термоэлектрический метод измерения температуры: 1 – проводник №1; 2 – проводник №2; 3 – медные потенциальные провода, 4 – термостат, 5 – измерительный прибор, 6 – горячий спай (температура  $t$ ), 7 – холодный спай (температура  $t_0$ )

Типичная термопара состоит из двух проволок разных металлов (рис. 1.1.), помещенных в электрически изолированную оболочку (на рисунке не показана). С одного конца 6 (называемого горячим или рабочим спаем) проволоки свариваются между собой, а другими концами 7 (называемыми холодными спаями) подсоединяются к медным проводам. Холодные спаи термопар обычно помещаются в термостат со льдом ( $t_0 = 0$ ) или транзисторный нуль – термостат, а другие концы медных проводов соединяются с прибором, измеряющим ЭДС термопары (цифровой вольтметр, самописец, прецизионный потенциометр).

При соответствующем выборе материалов термопары могут обеспечить измерения в широком диапазоне температур от 2 до 3000 К. Термопары могут одновременно обеспечить высокую точность (до  $\pm 0,01$  К) и высокую чувствительность (до 100 мкВ/К для металлических и нескольких мВ/К для полупроводниковых).

Статическая характеристика реального датчика может быть представлена следующим образом:

$$Y = f(X, z_1, z_2 \dots z_n), \quad (1.1)$$

где  $Y$  – выходная величина датчика (для термопары – термоЭДС),  $X$  – преобразуемая величина (для термопары – температура),  $z_i$  – влияющие факторы. Такая характеристика находится обычно экспериментально в условиях отсутствия влияния шумов на датчик.

При описании статической характеристики используются коэффициент преобразования  $K = Y/X$  и дифференциальный коэффициент преобразования  $S = dy/dx$ . В случае линейной статической ха-

раактеристики коэффициент преобразования остается постоянным во всем диапазоне изменения входной величины.

Рассмотрим факторы, влияющие на статическую характеристику термопар.

1. Неоднородность структуры материалов термоэлектродов, связанная с технологией изготовления. Искажающее влияние возникает, если термоэлектроды находятся в градиенте температуры. В литературе есть ссылки на то, что погрешность измерения температуры может достигать  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , поэтому при точных измерениях рекомендуется отжигать термоэлектроды и проводить индивидуальную градуировку термопары.

2. Изменения статической характеристики, связанные с пластической деформацией термоэлектродов (растяжение, кручение), а также с эффектами Томсона и Джоуля не превышают  $1\%$ .

3. Погрешности, вызванные электрическими и магнитными наводками, превышают  $\sim 1\%$  лишь при высоких значениях напряженностей электрического (более  $10^5\text{ В/м}$ ) и магнитного (более  $1\text{ Тл}$ ) полей. Для исключения влияния этих наводок необходимо экранировать термоэлектроды.

4. Наиболее существенное влияние на изменение статической характеристики оказывает ядерное излучение (см. часть 2).

5. Стабилизировать во времени параметры датчиков работающих в сложных эксплуатационных условиях, можно повышая качество их изготовления и воздействуя различными факторами (температура, электрический ток, ионизирующее излучение). Для оценки временной нестабильности параметров датчика также приходится пользоваться данными эксперимента.

## **1.2. Методика градуировки**

Термопары можно градуировать при нескольких температурах в выбранном интервале, методом сравнения показаний их термоЭДС с показаниями эталонной (обычно платинородий-платиновой) термопары. Затем подбирают соответствующие уравнения (обычно в виде полинома) зависимости термоЭДС термопары от температуры, наилучшим образом удовлетворяющие данным градуировки.

На практике часто используется и другой метод, называемый методом стандартных градуировочных таблиц. Сущность этого ме-

года заключается в том, что тщательная градуировка проводится лишь для нескольких термопар данного типа. Принимается, что соответствующим образом усредненные данные этих градуировок справедливы для всех термопар этого типа и их используют для составления стандартной градуировочной таблицы. Стандартные градуировочные таблицы имеются для всех применяемых типов термопар.

Наиболее совершенная градуировка термопар по реперным точкам в широком интервале температур сопряжена с большими трудностями, так как необходимо иметь достаточное число реперных точек, что не всегда осуществимо в лабораторных условиях.

В данной работе градуировка термопар осуществляется сравнительным методом, в условиях медленного изменения температуры электрической печи (1 – 2 °С в минуту).

Горячие спаи градуируемой и эталонной термопары, располагаются вместе в металлическом блоке, который затем устанавливается в электрическую печь. Холодные спаи обеих термопар помещаются в термостат с температурой 0 °С. ТермоЭДС градуируемой термопары измеряется цифровым вольтметром, а температура эталонной термопары определяется автоматически цифровым термометром непосредственно в °С.

В условиях эксперимента, учитывая быстроедействие современной измерительной аппаратуры (несколько измерений в секунду), максимальная погрешность температуры отнесения для градуируемой термопары не превысит 0,05 °С.

Полученные результаты позволяют определить аналитическую зависимость термоЭДС градуируемой термопары от температуры. Условием наилучшей аппроксимации экспериментальных данных (в интервале температур 0 – 600 °С) полиномом второй степени:

$$E = at + bt^2 + \varepsilon \quad (1.2)$$

будет, в соответствии с методом наименьших квадратов, минимизация суммы:

$$S(a, b) = \sum_i \varepsilon_i^2 = \sum_i \left( E_i - at_i - bt_i^2 \right)^2 \rightarrow \min, \quad (1.3)$$

где  $E_i$  – экспериментальное значение термоЭДС градуируемой термомпары при температуре  $t_i$ ;  $i = 1 \div n$  – число экспериментальных значений температур и термоЭДС;  $\varepsilon_i = E_i - E_{i \text{ mod}}$  – разница между наблюдаемыми значениями  $E_i$  и модельными  $E_{i \text{ mod}} = at_i + bt_i^2$  для каждого опыта.

Наличие случайного члена  $\varepsilon_i$  связано с действием на зависимую переменную  $E_i$  неучтённых в модели факторов и с возможным неправильным выбором аппроксимирующей функции.

Минимум достигается для значений  $a, b$  при которых соответствующие частные производные равны нулю, т.е.:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial b} = 0. \quad (1.4)$$

Из системы уравнений (1.4) после преобразований получим систему нормальных уравнений для определения оптимальных (по методу наименьших квадратов) коэффициентов  $a$  и  $b$ :

$$\sum_i E_i t_i = a \sum_i t_i^2 + b \sum_i t_i^3, \quad (1.5)$$

$$\sum_i E_i t_i^2 = a \sum_i t_i^3 + b \sum_i t_i^4. \quad (1.6)$$

Решая её методом определителей, получим:

$$a = \frac{\sum_i E_i t_i^2 \cdot \sum_i t_i^4 - \sum_i E_i t_i^2 \cdot \sum_i t_i^3}{\sum_i t_i^2 \cdot \sum_i t_i^4 - \sum_i t_i^3 \cdot \sum_i t_i^3}, \quad (1.7)$$

$$b = \frac{\sum_i E_i t_i^2 \cdot \sum_i t_i^2 - \sum_i t_i^3 \cdot \sum_i E_i t_i}{\sum_i t_i^2 \cdot \sum_i t_i^4 - \sum_i t_i^3 \cdot \sum_i t_i^3}. \quad (1.8)$$

При интерпретации опытных данных функциональной зависимостью (1.2) значение аргумента  $t_i$  следует считать точными ( $\sigma_t = 0$ ), так как неточность регистрации  $t_i$  увеличивает дисперсию измеряемых  $E_i$  и представлена в дисперсиях коэффициентов  $a$  и  $b$ .

Стандартная ошибка регрессии  $\sigma_E$ , которая служит мерой разброса зависимой переменной  $E$  вокруг линии регрессии, рассчитывается по формуле:

$$\sigma_E = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \left( E_i - E_{i \text{ mod}} \right)^2. \quad (1.9)$$

Из двух моделей лучшая считается та, для которой величина  $\sigma_E$  меньше.

Средняя ошибка аппроксимации (модели) рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{E_i - E_{i \text{ mod}}}{E_i} \right) \cdot 100\% \quad (1.10)$$

Ошибка аппроксимации в пределах (5 – 7) % свидетельствует о хорошем подборе модели к исходным данным.

### 1.3. Описание экспериментальной установки

Электрическая блок-схема лабораторного стенда изображена на рис. 1.2. Потенциальные провода эталонной термопары  $T_3$  и градуируемой  $T_r$  подключены к измерительным приборам: цифровому термометру ЦТ и цифровому вольтметру ЦВ. Холодные спаи тер-

мопар погружены в термостат Т (сосуд Дьюара со льдом) и имеют температуру  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а горячие помещены в электрическую печь ЭП с температурой  $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Питание печи осуществляется от электросети переменного тока с помощью блока питания БП. Температурный уровень в печи, а соответственно и потребляемую мощность устанавливают и контролируют с помощью амперметра А и вольтметра V (мультиметр). Включение электропечи осуществляется ключом  $K_1$  установленным на лицевой панели стенда. На лицевой панели стенда также расположены мультиметр, блок питания и переключатель  $K_2$ .

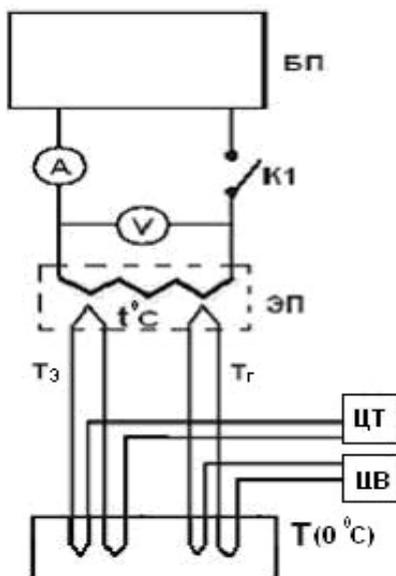


Рис. 1.2. Блок-схема лабораторного стенда

## 1.4. Порядок выполнения работы

**Внимание!** Включать установку разрешается только в присутствии преподавателя или лаборанта!

1. Горячие спаи эталонной и градуируемой термомпар поместить в печь, а холодные спаи в сосуд Дьюара с тающим льдом.

2. Потенциальные выводы эталонной термопары подключить к ЦТ, а градуируемой – к ЦВ.

3. Включить питание печи ключом К1.

4. Интервал температур, в котором должна быть произведена градуировка термопары, задается преподавателем. Различная температура в печи устанавливается путем изменения выходного напряжения блока питания. Установить по мультиметру требуемое выходное напряжение на блоке питания БП.

5. По показаниям эталонной термопары следить за изменением температуры в электрической печи. Когда скорость изменения температуры будет  $\sim (1 - 2) \text{ }^\circ\text{C/мин}$ , можно приступать к измерениям.

6. Записать показания ЦТ и ЦВ в таблицу. Повторить измерения не менее трёх раз для каждой термопары.

7. Повысить температуру печи на  $(20 - 25) \text{ }^\circ\text{C}$  путём увеличения напряжения на блоке питания.

8. Убедившись, что скорость изменения температуры печи не превышает  $(1 - 2) \text{ }^\circ\text{C/мин}$  повторить не менее трёх раз измерения показаний градуируемой и эталонной термопар, чередуя последовательность записи.

9. Измерения провести для десяти различных температурных уровней в печи.

## 1.5. Обработка результатов измерений

1. По результатам измерений заполнить протокол градуировки (табл. 1.1). Нанести эти данные на график.

Таблица 1.1

Показания эталонной термопар	$t \text{ }^\circ\text{C}$					
Показания градуируемой термопары	$E_i, \text{ мВ}$					

2. Представить зависимость термоЭДС градуируемой термопары в виде полинома второй степени. Рассчитать коэффициенты полинома по формулам (1.7) и (1.8).

3. Рассчитать стандартную ошибку регрессии  $\sigma_E$  по формуле (1.9) и среднюю ошибку модели  $A$  по формуле (1.10). Сделать вывод о качестве модели.

## **1.6. Оформление отчета**

В отчете необходимо представить:

1. Электроизмерительную блок-схему лабораторного стенда;
2. График зависимости термоЭДС градуируемой термопары от температуры с нанесённой на него аппроксимирующей зависимостью;
3. Оценку среднеквадратической погрешности измерений термоЭДС;
4. Расчет средней ошибки аппроксимации.

## **Список литературы**

1. Кулаков М.В., Макаров Б.И. Измерение поверхности твердых тел. М.: Энергия, 1979.
2. Семенов В.С. Датчики тепловых величин в АСУТП, М.: МИФИ, 1982.
3. Чистяков С.Ф., Радун Д.В. Теплотехнические измерения и приборы, М.: Высшая школа, 1972.

## **Контрольные вопросы**

1. Какие факторы могут приводить к искажению статической характеристики термопары?
2. Каковы принципы работы термопары и схема подключения к измерительному прибору?
3. Какие способы крепления термопар к поверхности твёрдого тела вы знаете?
4. Какой метод градуирования термопары используется в настоящей лабораторной работе?
5. В чём сущность метода наименьших квадратов?

## Работа 2

# ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТНЫХ И БЕСКОНТАКТНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

**Цель:** измерение инерционности датчиков нестационарных температур; освоение импульсного метода неразрушающего контроля тепловых свойств твэлов.

## 2.1. Динамические характеристики датчиков температуры

Полные динамические характеристики датчиков однозначно определяют изменения его выходного сигнала при любом изменении во времени информативного входного параметра. К ним относятся дифференциальные уравнения, импульсная и переходная характеристики, передаточная функция, амплитудно- и фазочастотные характеристики. Задачи экспериментального и теоретического определения полных динамических характеристик решаются методами теории автоматического управления. К частным динамическим характеристикам относится, например, время затухания переходного процесса.

Термическая инерция датчика температуры – свойство изменять выходной сигнал под воздействием переменной температуры объекта не мгновенно, а по истечении некоторого промежутка времени. Тепловая инерция присуща всем физическим телам (а значит и всем датчикам температуры), и является источником динамической погрешности. Динамическая погрешность датчика должна учитываться или (на практике) применяемые датчики должны иметь «постоянную» тепловой инерции много меньшую, чем регистрируемые в опыте характерные времена переходных процессов. Постоянная тепловой инерции – это время, необходимое для того, чтобы при внесении термодатчика в среду с постоянной температурой разность температур среды и любой точки внесенного термодатчика стала равной 0,37 от величины, которую она имела в момент наступления регулярного теплового режима (во всех точках термо-

датчика изменение температуры происходит по экспоненциальному закону).

Серийные термоэлектрические термометры выпускают в защитных чехлах с разной глубиной погружения в измеряемую среду как с обычной (постоянная времени десятки секунд), так и с уменьшенной (постоянная времени единицы секунд)

В общем случае величина запаздывания зависит от многих факторов (конструкция термометрического тела, способа и места его установки, от свойств среды) и не может считаться универсальной.

Точность динамических методов исследования теплофизических свойств материалов во многом определяется точностью измерения нестационарных температур. Измеритель температуры должен быть малоинерционен и иметь достаточную чувствительность. Из контактных измерителей температуры поверхности образцов наибольшее распространение получили термопары ввиду их простоты, малых размеров и возможности измерять температуру практически в точке. На рис. 2.1 представлены несколько используемых типов термопар.

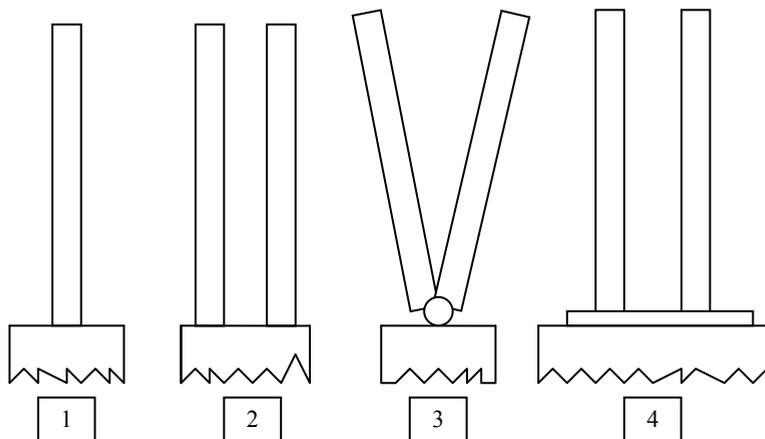


Рис. 2.1. Термопары для измерения температуры поверхности твердых тел: 1 – одноэлектродная, 2 – двухэлектродная без спая, 3 – двухэлектродная со спаем, 4 – пяточковая

В одноэлектродной термопаре вторым термоэлектродом является само электропроводящее тело. Термоэлектроды могут привариваться контактной или конденсаторной сваркой.

Инерционность термодатчика характеризуют также временем установления  $\tau_{уст.}$  по истечении, которого термодатчик, быстро перенесенный из среды с температурой  $t_1$  в среду с температурой  $t_2$  будет иметь температуру, отличающуюся от  $t_2$  на  $\Delta t$ . Значение  $\Delta t$  может составлять, например, 5% от перепада ( $t_2 - t_1$ ). В работе [2] получена оценка  $\tau_{уст.} = \tau_{95\%}$  – времени, необходимого бескорольковой термопаре для достижения 95% от значения термоЭДС стационарного состояния:

$$\tau_{95\%} = \frac{25}{\pi} \cdot \frac{d^2}{a} \cdot \frac{\lambda_T}{\lambda}, \quad (2.1)$$

где  $d$  – диаметр термопарного провода,  $a$  – температуропроводность исследуемого материала,  $\frac{\lambda_T}{\lambda}$  – отношение коэффициентов

теплопроводности термоэлектродов и исследуемого материала. Для хромель-копелевой термопары с диаметром термоэлектродов в рабочей части 0,07 – 0,09 мм имеем оценку  $\tau_{95\%} = 0,03$  с. Эта величина запаздывания, по видимому, близка к предельной при работе с термопарами. Кроме того, следует иметь в виду, что применение приварных термопар не допустимо при массовом тепловом контроле штатных изделий, а инерционность различного рода прижимных термопар существенно выше.

По принципу действия бесконтактные приемники инфракрасного излучения делят на две большие группы: тепловые и фотонные. Фотонные приемники основаны на изменении свойств их чувствительных элементов под воздействием падающего лучистого потока, независимо от его спектрального состава. Различают следующие виды тепловых приемников: болометры, термоэлементы, пироэлектрические приемники, оптико-акустические приемники.

В фотонных приемниках имеет место прямое взаимодействие между падающими фотонами и электронами материала чувствительного элемента. Типы фотонных приемников следующие: фотоэлементы и фотоумножители, фоторезисторы, фотодиоды, вентильные фотоэлементы, фототранзисторы.

Основными требованиями, предъявляемыми к приемникам излучения для работы в инфракрасной области, являются:

- определенный спектральный диапазон чувствительности, соответствующий характеристикам теплового излучения объектов;
- низкий порог чувствительности;
- малый уровень собственных шумов;
- линейная зависимость выходного сигнала от величины падающего лучистого потока;
- слабая зависимость внутреннего сопротивления от температуры;
- одинаковая чувствительность по всей рабочей площадке.

Анализ параметров приемников отечественного производства показывает, что в области температур (20÷100) °С наиболее пригодными являются фоторезисторы с применением устройств для глубокого охлаждения (жидким азотом). В качестве датчика нестационарной температуры в данной лабораторной работе используется охлаждаемый фоторезистор на основе германия, легированного золотом. Его основные характеристики приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Параметр	Значение параметра
Размеры приемной площадки, мм	3x3
Напряжение в фоточувствительном слое, В	30
Сопротивление нагрузки, МОм	0,25
Темновое сопротивление, МОм	0,25
Вольтовая чувствительность, В/Вт	1020
Расход жидкого азота, л/ч	0,3

Измерения «постоянной» времени бескорольковой термопары и фотосопротивления проводились на установке, основные элементы которой показаны на рис. 2.2.

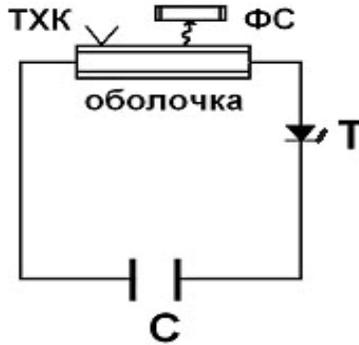


Рис. 2.2. Блок-схема установки для измерения тепловой инерции датчиков температуры

Ступенчатый разогрев оболочки из нержавеющей стали к которой приваривалась бескорольковая термопара, осуществляется разрядом батареи конденсаторов С, подключенных к оболочке через тиристор Т. Характерные измеряемые времена запаздывания сигнала термопары показаны на рис. 2.3.

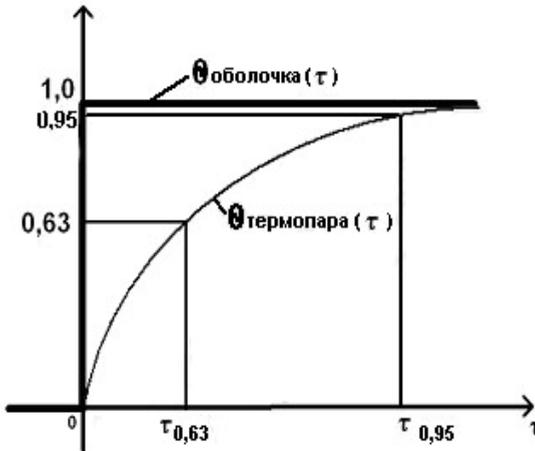


Рис 2.3. Характерные времена запаздывания сигнала термопары

Для оценки постоянной времени фотосопротивления (паспортное значение 0.00001 с) используется начальная стадия разогрева оболочки.

Нестационарное уравнение теплопроводности для оболочки записывается в виде:

$$C_0 \rho_0 \frac{dt_{об}}{d\tau} = q_V(\tau) = \frac{U_c^2(\tau)}{R_{об} V_{об}}, \quad (2.2)$$

где  $C_0$ ,  $\rho_0$ ,  $V_{об}$  – соответственно объемная теплоемкость, плотность, и объем оболочки;  $R_{об}$  – электрическое сопротивление оболочки;  $q_V(\tau)$  – объемное тепловыделение оболочки.

Предполагается, что все тепло, выделяемое в оболочке, идет на увеличение ее температуры, а теплоотдачей с поверхности оболочки и осевой теплопроводностью можно пренебречь. Кроме того, можно пренебречь изменением электросопротивления оболочки за счет разогрева, т.к.:

$$\frac{\Delta R_{об}}{R_{об}} = \frac{\Delta \rho_{об}}{\rho_{об}} = \beta \Delta t_{об}^{\max} = 0,02, \quad (2.3)$$

где  $\beta = 2 \cdot 10^{-3}$  – температурный коэффициент электропроводности оболочки из нержавеющей стали, а  $\Delta t_{об}^{\max} = 10 - 15$  °C – подогрев оболочки.

В этих условиях:

$$U_c(\tau) = U_c^{\max} \cdot e^{-\frac{\tau}{R_{об} \cdot C}}, \quad (2.4)$$

где  $U_c^{\max}$  – напряжение зарядки батареи конденсаторов, а  $C$  – электрическая емкость батареи конденсаторов.

Решение уравнения (2.2) с разделяющимися переменными имеет вид:

$$t_{об}(\tau) = \frac{C(U_c^{\max})^2}{2C_0 \rho_0 V_{об}} \cdot (1 - e^{-\frac{2\tau}{R_{об} \cdot C}}) = \Delta t_{об}^{\max} \cdot (1 - e^{-\frac{2\tau}{R_{об} \cdot C}}). \quad (2.5)$$

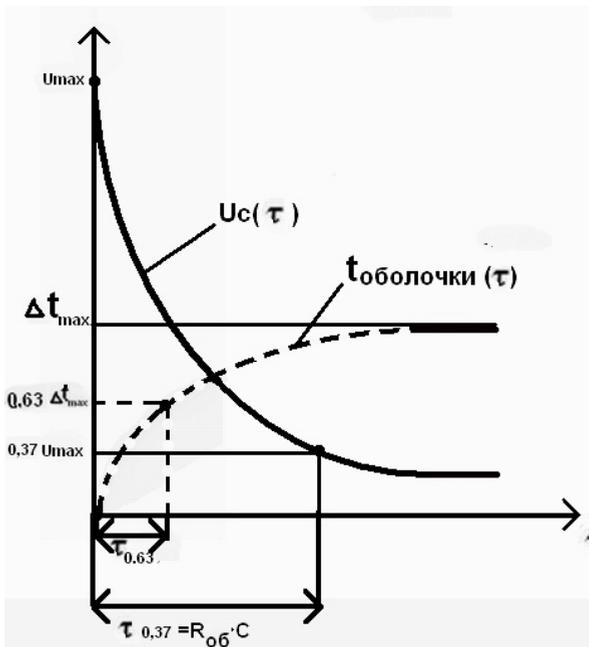


Рис 2.4. Временные зависимости напряжения на обкладках батареи конденсаторов  $U_c(\tau)$  и избыточной температуры оболочки  $t_{об}(\tau)$  после импульсного тепловыделения в ней

На рис.2.4 представлены временные зависимости напряжения на обкладках батареи конденсаторов  $U_c(\tau)$  и избыточной температуры оболочки  $t_{об}(\tau)$  после импульсного выделения в ней.

Анализ решения (2.5) показывает, что интервал времени, за который избыточная температура оболочки (пунктирная кривая) возрастает до 0,63 своего максимального значения  $\tau_{0,63}$  в два раза меньше, чем время уменьшения напряжения на батарее конденсаторов в  $e$  раз  $\tau_{0,37} = R_{об}C \leq 0.001$  с.

Если эксперимент с фотосопротивлением в качестве датчика нестационарной температуры оболочки подтвердит это соотношение то, можно считать, что постоянная времени ФС в несколько раз меньше величины 0.001 с, т.е. не менее 0.0001 с.

Более точно постоянную времени фотосопротивления можно измерить с помощью высокочастотных модуляторов излучения образца.

## 2.2. Описание экспериментальной установки

Блок-схема экспериментальной установки для измерения постоянной времени контактных (бескорольковой термопары) и бесконтактных датчиков температуры приведена на рис.2.5.

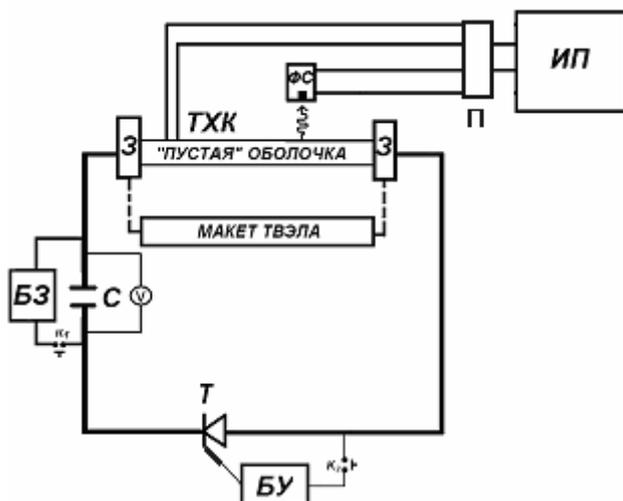


Рис.2.5. Схема экспериментальной установки

«Пустая» (без сердечника) оболочка из нержавеющей стали длиной 0,3 м (наружный диаметр 7 мм толщиной стенки 0,3 мм) закрепляется в зажимах З, к которым подсоединяется мощная батарея конденсаторов С через управляемый ключ – силовой тиристор Т. Тепловой импульс осуществляется пропуском импульса электрического тока по оболочке при разряде батареи конденсаторов, предварительно заряженной с помощью блока зарядки БЗ. В результате импульса температура оболочки скачкообразно (постоянная RC цепи менее 0,001 с) возрастает на  $\Delta T_{\max} = 10 - 15$  К, что регистрирует приваренная к оболочке бескорольковая термопара ХК (диаметр электродов 0,07 – 0,09 мм) или охлаждаемое жидким азотом фотосоппротивление ФС. Сигналы с датчиков поступают через переключатель П на измерительный прибор ИП (сигнал с термопары – напрямую, а сигнал с ФС по мостовой схеме). В качестве измерительного прибора используется цифровой запоминающий осциллограф. Обработка термограмм позволяет оценить «по-

стоянные» тепловой инерции датчиков. На переднюю панель лабораторного стенда выведены мультиметр, показывающий напряжение  $V$  на обкладках заряженного конденсатора и кнопки блоков зарядки К1 и управления К2.

### **2.3. Порядок измерения «постоянной» времени датчиков температуры**

**Внимание!** Включать установку разрешается только в присутствии преподавателя или лаборанта!

1. Надежно закрепить «пустую» оболочку с приваренной термопарой в зажимах З.
2. Подготовить к работе блоки зарядки БЗ, управления БУ и измерительный прибор ИП.
3. Залить жидкий азот в сосуд Дьюара фотосопротивления ФС.
4. Кнопкой К1 зарядить батарею конденсаторов до напряжения (120 – 150) В.
5. С помощью кнопки К2 открыть тиристор, обеспечив импульсный подогрев оболочки на величину  $\Delta T_{\max} = (10 - 15) \text{ }^\circ\text{C}$ .
6. Временную зависимость сигналов термопары и ФС зарегистрировать и обработать с помощью измерительного прибора.
7. Провести по три измерения на каждом датчике.

### **2.4. Импульсный метод неразрушающего контроля тепловых свойств твэлов и пэлов**

Описанная выше установка и датчики температуры могут быть использованы без изменений при реализации импульсного метода, разработанного на кафедре теплофизики МИФИ. Твэл (пэл) представляют собой тонкостенную металлическую оболочку, заполненную неэлектропроводным сердечником (таблеточным или порошкообразным). Тепловой импульс осуществляется пропусканием импульса электрического тока по оболочке при разряде мощной батареи конденсаторов. Благодаря кратковременности импульс тока нагревает только оболочку, которая затем остывает, отдавая тепло сердечнику. Анализируя особенности изменения избыточной температуры оболочки (метод двух температурно-временных ин-

тервалов), в частности, регистрируя времена спада относительной избыточной температуры оболочки на 1/8 и 1/2 части первоначальной величины (соответственно  $\tau_{1/8}$  и  $\tau_{1/2}$ ), можно рассчитать теплопроводность сердечника и контактное термическое сопротивление (к.т.с.) между сердечником и оболочкой (см. рис.2.6.).

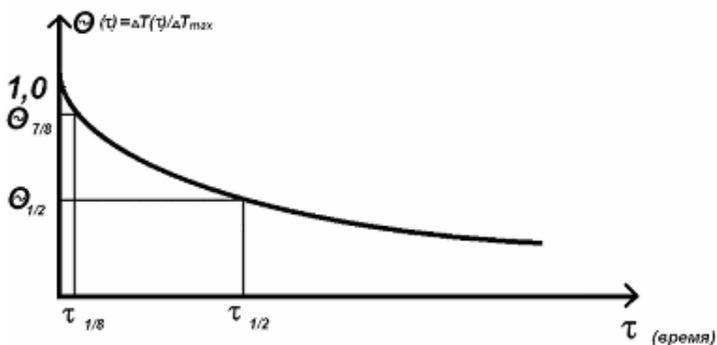


Рис. 2.6. Временная зависимость относительной избыточной температуры оболочки

Временная зависимость относительной избыточной температуры оболочки после импульсного тепловыделения ней определяется системой безразмерных уравнений (2.6 – 2.11):

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \Delta \theta ; \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = Bi(\theta_0 - \theta_{R=P}) ; \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} |_{R=P} = 0 ; \quad (2.8)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial R} = Bi(\theta_0 - \theta_{R=P}) ; \quad (2.9)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = Bi(\theta_0 - \theta_{R=P}) ; \quad (2.10)$$

$$\theta(Fo = 0) = 0 ; \dots \dots \theta(Fo = 0) = 1 , \quad (2.11)$$

где  $\theta = \frac{T(\text{Fo}) - T(0)}{\Delta T_{0\text{max}}}$  – относительная избыточная температура

сердечника;  $\theta_0 = \frac{T_0(\text{Fo}) - T_0(0)}{\Delta T_{0\text{max}}}$  – относительная избыточная тем-

пература оболочки;  $\Delta T_{0\text{max}}$  – подогрев оболочки в импульсе;

$$R = \frac{r}{\delta_{\text{эф}}} \cdot \frac{C_V}{C_0}; \quad L = \frac{r_c}{r_0}; \quad \text{Fo} = \frac{\varepsilon^2 \tau}{(c_0 \delta_{\text{эф}})^2}; \quad P = \frac{r_0}{\delta_{\text{эф}}} \cdot \frac{C_V}{C_0}; \quad \text{Bi} = \frac{C_0 \delta_{\text{эф}}}{\varepsilon^2 R_k};$$

$\lambda$  и  $C_V$  – коэффициент теплопроводности и объемная теплоемкость сердечника соответственно,  $C_0$  – объемная теплоемкость оболочки;  $R_k$  – контактное термическое сопротивление между сердечником и оболочкой,  $\varepsilon = \sqrt{\lambda \cdot C_V}$  – тепловая активность сердечника,  $r$  –

текущий радиус,  $\tau$  – время,  $\delta_{\text{эф}} = \frac{S_0}{2\pi r_0}$  – эффективная толщина

оболочки,  $S_0$  – ее сечение,  $r_0$  и  $r_c$  – соответственно радиусы контактирующей с оболочкой поверхности сердечника и внутреннего отверстия ( $r_c = 0$  для сердечника без центрального отверстия).

При этом предполагается что:

– перетечки тепла в осевом направлении  $Z$  малы;

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial \theta_0}{\partial z} = 0;$$

– время импульсного тепловыделения существенно меньше характерных времен процесса остывания оболочки ( $\tau_{\text{имп}} \ll \tau_{1/8}$ );

– перепад температуры по толщине оболочки мал  $\left(\frac{\partial \theta_0}{\partial R}\right) = 0$ ;

– потери тепла с поверхности оболочки за время измерений  $\tau_{1/2}$  малы.

Для решения задачи использовался операционный метод Лапласа с последующими расчетами на ЭВМ.

Анализ решения показал, что для значений  $\text{Bi} \geq 1,0$  зависимости  $\text{Fo}_i$  от  $1/\text{Bi}$  с погрешностью менее 1 % линейны, что приводит к простым расчетным соотношениям для к.т.с.  $R_k$  и коэффициента теплопроводности сердечника  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{m_1(P)}{\tau_{1/2} - m_2(P)\tau_{1/8}} \cdot \frac{(C_0 \delta_{\text{эф}})^2}{C_V}, \quad (2.12)$$

$$R_k = \frac{m_3(P)}{C_0 \delta_{\text{эф}}} (\tau_{1/8} - m_4(P)\tau_{1/2}). \quad (2.13)$$

Численные значения коэффициентов  $m_i(P)$  ( $i=1,2,3,4$ ) представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

$m_i(P)$	$P$			
	3,0	4,0	5,0	8,0
$m_1(P)$	0,724	0,609	0,572	0,536
$m_2(P)$	6,803	6,446	6,274	6,051
$m_3(P)$	7,747	7,918	7,980	8,024
$m_4(P)$	0,0261	0,0303	0,0332	0,0341

## 2.5. Порядок выполнения работы

**Внимание!** Включать установку разрешается только в присутствии преподавателя или лаборанта!

1. Вместо пустой оболочке надежно закрепить в зажимах 3 макет твэла.

2 – 6. Данные этапы повторяют соответствующие этапы из раздела 2.3.

7. Опыты по измерению характерных времен процесса остывания оболочки макета твэла  $\tau_{1/2}$  и  $\tau_{1/8}$  повторить три раза.

## 2.6. Обработка результатов измерений

1. Экспериментальные данные по тепловой инерции датчиков свести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

	Датчик			
	Бескорольковая термопара		ФС	Потенциальные зонды
№ опыта	$\tau_{0,63,C}$	$\tau_{0,95,C}$	$\tau_{0,63,C}$	$\tau_{0,37}=R_{об}\cdot C$
1				
2				
3				
Среднее значение				

Справочные данные для расчета  $\tau_{0,95}$ :

- теплопроводность материала оболочки – 15 Вт/(м·К);
- теплопроводность материала термоэлектродов – 40 Вт/(м·К);

- температуропроводность оболочки –  $4,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

2. Сравнить среднее значение  $\tau_{0,95}$  (экспериментальное) с расчетным значением  $\tau_{0,95}$ .

Сделать вывод о возможных причинах различий.

3. Сравнить измеренное фотосопротивлением значение  $\tau_{0,63,C}$  измеренным с помощью потенциальных зондов значение  $\tau_{0,63} = R_{об}\cdot C/2$ .

4. По полученным экспериментальным данным  $\tau_{1/2}$  и  $\tau_{1/8}$  используя табличные данные по геометрии и свойствам и оболочки и сердечника рассчитать теплопроводность сердечника и к.т.с.

## 2.7. Оформление отчета

В отчете необходимо представить:

1. краткое описание методики и схемы измерения тепловой инерции датчиков;
2. результаты измерений, расчетов и сравнений с известными данными;
3. постановку краевой задачи импульсного метода;
4. результаты измерений коэффициента теплопроводности и к.т.с. для макета твэла;
5. оценку погрешностей измерений коэффициента теплопроводности сердечника.

## **Список литературы**

1. Кулаков М.В., Макаров Б.И. Измерение температуры поверхности твердых тел, М.: Энергия, 1979;
2. Maglis K.D., Marcicanin B.S. Factors affecting the accuracy of transient response of intrinsic thermocouples in thermal diffusivity measurement// High Temperatures – High Pressures, 1973, v.5, p.105–110;
3. Киселев Н.П., Корсун В.А., Макас В.И., Петровичев В.И.// Импульсный метод измерения коэффициента теплопроводности неэлектропроводных порошкообразных материалов. Вопросы теплофизики ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1981. Вып.10, С. 93–99.

## **Контрольные вопросы**

1. Каким показателем характеризуется динамическая характеристика датчика температуры?
2. Каковы основные конструктивные схемы малоинерционных термопар?
3. В чем суть импульсного метода неразрушающего контроля твэлов и пэлов?
4. Назовите основные предпосылки импульсного метода.

## Работа 3

# ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОДИНАМИКИ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА. РЕЗИСТИВНЫЙ ДАТЧИК ИСТИННОГО ГАЗСОДЕРЖАНИЯ

**Цель:** опытное исследование параметров двухфазного потока в снаряжном режиме течения при барботаже воздуха в воде; изучение методики определения характеристик газожидкостного потока с помощью резистивного датчика паросодержания; определение значений истинного объемного паросодержания и истинной плотности двухфазной среды.

### 3.1. Основные характеристики двухфазного потока

Особенности движения двухфазного потока в трубах связаны главным образом с гидромеханическим взаимодействием фаз друг с другом и стенкой канала. Большое значение имеют изменения, вносимые в гидродинамику потока фазовыми переходами в случае, когда рассматривается движение парожидкостной среды.

Как показано в литературе [1, 2], движение парожидкостных потоков можно с достаточной точностью моделировать с помощью газожидкостных течений, в частности, посредством наиболее просто реализуемого водовоздушного потока. Тем не менее, целесообразно основные характеристики двухфазных течений рассматривать на основе параметров парожидкостного потока.

При движении парожидкостного потока реальные или истинные скорости паровой и жидкой фаз различны. Учитывая это обстоятельство, данных по расходам отдельных фаз, физических свойств пара и жидкости и геометрии канала явно недостаточно для описания гидродинамики потока в целом. Поэтому для выявления закономерностей движения как парожидкостных, так и газожидкостных потоков используют два типа величин. Параметры, которые рассчитываются по уравнениям материального и теплового баланса, называют расходными параметрами, а величины, характеризующие

движение каждой из фаз в отдельности (с учетом особенностей движения отдельных фаз) – истинными параметрами [3].

Расходными параметрами двухфазного потока, применяемыми при обработке опытных данных, являются: приведенные скорости жидкости и пара  $W_0'$  и  $W_0''$  соответственно; скорость циркуляции  $W_0$ ; массовая скорость  $\rho W$ ; массовое, рассчитанное по уравнению теплового баланса, паросодержание  $x$ ; объемное расходное паросодержание  $\beta$ .

Приведенные скорости и скорость циркуляции определяются из соотношений

$$\begin{aligned} W_0' &= V' / f, \\ W_0'' &= V'' / f, \\ W_0 &= G / (\rho' f), \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $V'$  и  $V''$  – объемные расходы жидкости и пара, м<sup>3</sup>/с;  $G$  – полный массовый расход, кг/с;  $f$  – сечение канала, м<sup>2</sup>;  $\rho'$  – плотность жидкости на линии насыщения, кг/м<sup>3</sup>. Полные объемный  $V$  и массовый расходы  $G$  рассчитываются как

$$\begin{aligned} V &= V' + V'', \\ G &= G' + G''. \end{aligned} \quad (3.2)$$

В соотношениях (3.2)  $V'$  и  $V''$  – объемные расходы жидкости и пара соответственно, м<sup>3</sup>/с; а  $G'$  и  $G''$  – массовые расходы жидкости и пара, кг/с.

Движение двухфазной среды часто характеризуют с помощью массовой скорости  $\rho W$ , которая представляет собой отношение полного массового расхода  $G$  к сечению канала  $f$ . Данная величина при неизменной геометрии канала, так же как и скорость циркуляции  $W_0$ , остается постоянной и не зависит от фазовых превращений. Таким образом, массовая скорость  $\rho W$  рассчитывается по формуле:

$$\rho W = G / f, \quad (3.3)$$

где обозначения те же, что в соотношениях (3.1) и (3.2).

Массовое и объемное расходные паросодержания определяются в соответствии с формулами:

$$\begin{aligned} x &= \frac{G''}{G' + G''} = \frac{G''}{G}, \\ \beta &= \frac{V''}{V' + V''} = \frac{V''}{V}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Следует отметить, что между массовым и объемным расходными паросодержаниями (см. формулу 3.4) можно установить однозначную связь, а именно:

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{\rho''}{\rho'} \cdot \frac{(1-x)}{x}}, \quad (3.5)$$

где  $\rho''$  – плотность пара на линии насыщения,  $\rho'$  – плотность жидкости там же.

Определение истинных параметров потока является достаточно сложной теплофизической задачей [4], так как для этого необходимо знать доли сечения канала, занимаемые той или иной фазой. Так, истинное объемное паросодержание определяют как:

$$\varphi = f'' / f, \quad (3.6)$$

где  $f''$  – сечение канала, занимаемое паром,  $f$  – сечение канала.

Значение истинного объемного паросодержания дает возможность определить истинные скорости пара  $W''$  и жидкости  $W_0'$  а именно:

$$\begin{aligned} W'' &= W_0'' / \varphi, \\ W' &= W_0' / \varphi. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Разность между истинными скоростями движения фаз называют обычно относительной скоростью (или скоростью скольжения) [3,5]:

$$W_{\text{отн}} = W'' - W'. \quad (3.8)$$

Скольжение фаз  $s$  [5] определяют как:

$$s = \frac{W''}{W'}. \quad (3.9)$$

Эта величина дает возможность однозначно связать расходные параметры потока истинными параметрами, например:

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{\rho''}{\rho'} \frac{W''}{W'} \frac{(1-x)}{x}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho''}{\rho'} s \frac{(1-x)}{x}}, \quad (3.10)$$

где обозначения те же, что и в предыдущих формулах.

Соотношение (3.10) с учетом зависимости (3.5) может быть представлено в виде [5]:

$$\varphi = \frac{1}{1 + s \frac{(1-\beta)}{\beta}} \quad (3.11)$$

или наоборот,

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{1}{s} \frac{(1-\varphi)}{\varphi}}. \quad (3.12)$$

Часто для описания двухфазных течений в технических расчетах используют соотношения, основанные на предположении, что двухфазный поток является гомогенной смесью. В этом случае скорость смеси  $W_{см}$  определяется формулой:

$$W_{см} = W_0 \left[ 1 + x \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right]. \quad (3.13)$$

Значения средней расходной плотности смеси могут быть установлены из соотношений:

$$\rho_{см} = \rho'' \beta + \rho' (1 - \beta) \quad (3.14)$$

или

$$\frac{1}{\rho_{см}} = \frac{x}{\rho''} + \frac{1-x}{\rho'}. \quad (3.15)$$

Истинное значение плотности двухфазной среды может значительно отличаться от расходной плотности  $\rho_{см}$ , так как эта величина может быть определена только тогда, когда известны истинные параметры двухфазного потока, например,  $\varphi$ . В этом случае:

$$\rho_{ист} = \rho'' \varphi + \rho' (1 - \varphi). \quad (3.16)$$

Зависимости (3.7) – (3.15) показывают, что, если истинные скорости фаз равны между собой (скольжение фаз  $s$  равно 1),  $\varphi = \beta$ , а значит,  $\rho_{ист} = \rho_{см}$ .

### 3.2. Методика исследования и описание экспериментальной установки

Для измерения истинного объемного паросодержания и, следовательно, других истинных параметров двухфазного потока используют методы, основанные на различной зависимости физических характеристик пара (газа), жидкости и смеси в целом от кон-

центрации фаз. Применение того или иного метода обусловлено особенностями процесса и конкретными задачами исследования. Паро- или газожидкостный поток представляет собой ярко выраженную гетерогенную, случайную и неопределенную систему, которая характеризуется внутренней нестационарностью распределения фаз по сечению канала, а также, в случае парожидкостного потока, их взаимодействием (в том числе за счет фазовых переходов, переноса теплоты и т.д.).

Одним из возможных методов, позволяющих производить измерения истинного объемного паросодержания, является резистивный метод [4]. Суть данного метода состоит в том, что используется связь активной электропроводности двухфазной среды в контрольном объеме кондуктометрической ячейки, содержащей два электрода цилиндрической (измерение истинного объемного паросодержания обычно производится в трубах) конфигурации, с истинным газо(паро)содержанием. Данный метод не уступает, а по ряду параметров и превосходит широко известные методы гидродинамического взвешивания, отсечки, гамма – просвечивания и т.д. Основными преимуществами резистивного метода являются экологическая чистота (в отличие от методов  $\beta$ - и  $\gamma$ -просвечивания), возможности локализации измерений  $\varphi$  по длине канала (в отличие от методов гидродинамического взвешивания и отсечки) и малоинерционность. Схема резистивного датчика приведена на рис. 3.1. Данный датчик представляет собой двухэлектродную ячейку с поперечным электрическим полем, в которой два сегментных электрода  $I$  расположены в соответствующих вырезах диэлектрических вкладышей  $2$ . Эта конструкция датчика не создает дополнительного гидравлического сопротивления и не вызывает возмущений, способных изменить структуру потока. Показанные на рис. 3.1 геометрические параметры кондуктометрической ячейки  $B$ ,  $D$ ,  $L$  и  $\varnothing$  являются конкретными характеристиками данного резистивного датчика и выбираются с учетом условий эксперимента и целей, которые необходимо в нем достигнуть ( $B$  – длина вкладышей, служащих для закрепления и центрирования сегментных электродов  $I$ ).

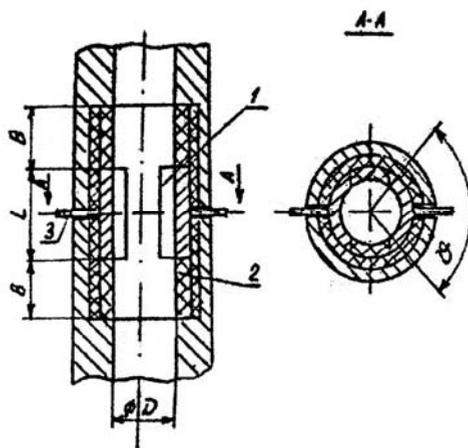


Рис. 3.1. Схема резистивного датчика газосодержания: 1 – сегментные электроды; 2 – диэлектрические вкладыши; 3 – вводы электродов

В данном случае основным параметром, используемым в лабораторной работе, является внутренний диаметр канала  $D = 18,5$ . При снарядном режиме течения около электродов датчика попеременно присутствуют, то пробки с пузырьковой структурой (с газосодержанием  $\varphi_{пр}$ ), то снаряды газа с кольцевой структурой жидкости на стенках канала и газосодержанием  $\varphi_{сн}$ . Среднее газосодержание по времени и сечению канала (при снарядном режиме истинное объемное паросодержание и сопротивление датчика являются нестационарными величинами) можно представить как сумму средних вкладов снарядов  $\varphi_{сн} \psi$  и пробок  $\varphi_{пр} (1 - \psi)$  [4] т.е.

$$\bar{\varphi} = \varphi_{сн} \psi + \varphi_{пр} (1 - \psi), \quad (3.17)$$

где  $\psi$  – средняя доля времени, в течение которого межэлектродное пространство в датчике занято снарядами.

Обычно для измерения сопротивления датчика используется неравновесный мост, одним из плеч которого является резистивный датчик. Принципиальная схема моста приведена на рис. 3.2. Неравновесный мост питается от генератора ГЗ-109, подающего синусоидальное напряжение с частотой  $\nu = 1$  кГц. Предусмотрена воз-

возможность изменения соотношения плеч моста (отношение  $R_1 / R_2$ ) – 1:2; 1:1; 9:1; 99:1. Мост уравнивается по нулевому сигналу с диагонали моста при условии заполнения кондуктометрической ячейки одной жидкостью ( $\varphi = 0$ ). Верхний предел (максимальный измеряемый сигнал  $U_{\max}$ ) подбирается регулировкой напряжения, выдаваемого генератором при  $\varphi = 1$  ( $R_{\text{датч}} \approx \infty$ ).

Балансировка моста осуществляется с помощью переменного компенсационного сопротивления  $R_{\text{комп}}$  (магазин сопротивлений Р-32). Для балансировки по реактивным составляющим параллельно с  $R_{\text{комп}}$  устанавливают магазин емкостей  $C_{\text{комп}}$ .

Сигнал  $U$  с диагонали моста подается либо на шлейфовый осциллограф НО.21.2, либо на осциллограф С8-13 и зависит от степени отклонения сопротивления датчика  $R_{\text{датч}}$  от его равновесного значения  $R_0$  при заполнении кондуктометрической ячейки одной жидкостью ( $\varphi = 0$ ). Таким образом,

$$\frac{U}{U_{\max}} = f_1\left(\frac{R_{\text{датч}}}{R_0}, n\right), \quad (3.18)$$

где  $U$  – напряжение выхода моста, когда датчик заполнен двухфазной средой, ( $U_{\max}$  – максимальный сигнал моста (датчик заполнен газом,  $R_{\text{датч}} \approx \infty$ , а  $\varphi = 0$ ),  $n = R_1 / R_2$  – соотношение плеч моста, от которого зависит вид функции  $f_1$ ).

Относительное активное сопротивление датчика  $R_{\text{датч}} / R_0$  определяется истинным объемным паросодержанием среды и может быть представлено для пробки и снаряда в виде:

$$\frac{R_{\text{проб}}}{R_0} = f_2(\varphi_{\text{пр}}) \quad \text{и} \quad \frac{R_{\text{снар}}}{R_0} = f_3(\varphi_{\text{сн}}). \quad (3.19)$$

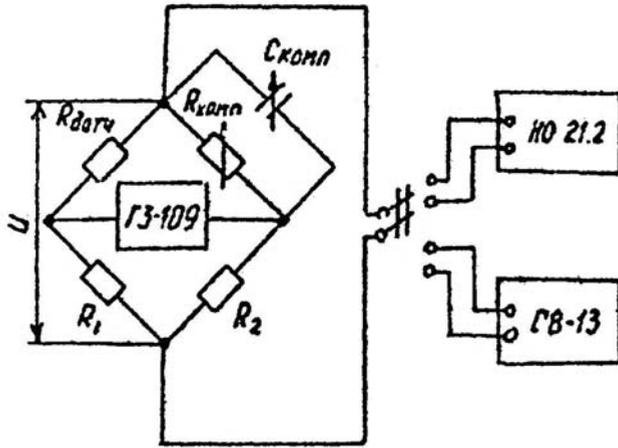


Рис. 3.2. Схема измерительного моста:  $R_{\text{датч}}$  – сопротивление датчика;  $R_{\text{комп}}$  – компенсационное сопротивление, уравнивающее сопротивление датчика;  $C_{\text{комп}}$  – компенсационная емкость;  $R_1, R_2$  – сопротивления плеч моста ( $R_1 = 540 \text{ Ом}$ ,  $R_2 > 60 \text{ Ом}$ ); ГЗ-109 – генератор ( $v_2 = 1 \text{ кГц}$ ); HO.21.2 – светолучевой осциллограф; С8-13 – осциллограф

В соотношениях (3.19)  $R_{\text{проб}}$ ,  $R_{\text{снар}}$  – сопротивление датчика при прохождении через кондуктометрическую ячейку пробки или снаряда;  $\varphi_{\text{пр}}$ ,  $\varphi_{\text{сн}}$  – истинное объемное паросодержание пробки и снаряда соответственно. Подставив соотношения (3.19) в формулу (3.18), в общем случае получим, что:

$$\left( \frac{U}{U_{\text{max}}} \right)_{\text{снар}} = f_4(\varphi_{\text{сн}}, n) \text{ и } \left( \frac{U}{U_{\text{max}}} \right)_{\text{проб}} = f_5(\varphi_{\text{пр}}, n), \quad (3.20)$$

где функции  $f_4$ ,  $f_5$  зависят не только от паросодержания и соотношения плеч моста, но и от характеристики датчика при конкретной форме двухфазного течения.

При снаряжном режиме течения средний по времени сигнал моста  $\frac{\bar{U}}{U_{\max}}$  можно представить как сумму вкладов средних сигналов, поступающих на измерительную аппаратуру в моменты прохождения через датчик пробок  $\left(\frac{U}{U_{\max}}\right)_{\text{проб}} \cdot (1 - \psi)$  и снарядов  $\left(\frac{U}{U_{\max}}\right)_{\text{снар}} \cdot \psi$ , то есть:

$$\frac{\bar{U}}{U_{\max}} = \left(\frac{U}{U_{\max}}\right)_{\text{проб}} \cdot (1 - \psi) + \left(\frac{U}{U_{\max}}\right)_{\text{снар}} \cdot \psi \quad (3.21)$$

или

$$\frac{\bar{U}}{U_{\max}} = f_5(\varphi_{\text{пр}}, n) \cdot (1 - \psi) + f_4(\varphi_{\text{сна}}, n) \cdot \psi. \quad (3.22)$$

Как видно из (3.22), для того, чтобы переводить значения  $\bar{U} / \bar{U}_{\max}$  в  $\bar{\varphi}$ , достаточно обеспечить линейность функций  $f_4$  и  $f_5$ . Действительно, предположив, что  $f_5(\varphi_{\text{пр}}, n) = C_1 \varphi_{\text{пр}}$  и  $f_4(\varphi_{\text{сна}}, n) = C_2 \varphi_{\text{сна}}$ , из выражения (3.22) с точностью до коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$  правая часть его равна правой части соотношения (3.17). Полное соответствие этих соотношений, т.е. одновременное обращение  $C_1$  и  $C_2$  в единицы, взаимопротиворечиво [4]. Тем не менее, если учесть малый вклад пробок в общее газосодержание ( $\sim 5\%$ ), очевидно, что для получения реальных результатов по истинному объемному паросодержанию важно обеспечить условие  $C_2 = 1$ . Линейзация функции  $f_4$  достигается подбором соотношения плеч неравновесного моста п. В литературе [4] отмечено, что при соотношении  $R_1/R_2 = 9:1$ ,  $C_2 = 1$ , а погрешности, возникающие при таком подходе, невелики.

Таким образом, расчет среднего истинного объемного паросодержания двухфазного потока при измерении его значения с по-

мощью резистивного датчика следует проводить в соответствии с соотношением:

$$\bar{\varphi} = \left( \frac{U}{U_{\max}} \right)_{\text{проб}} \cdot (1 - \Psi) + \left( \frac{U}{U_{\max}} \right)_{\text{снар}} \Psi, \quad (3.23)$$

где  $\bar{\varphi}$  – среднее истинное объемное паросодержание,  $\left( \frac{U}{U_{\max}} \right)_{\text{проб}}$  – относительное значение сигнала моста при прохождении кондуктометрической ячейки датчика пробкой,  $\left( \frac{U}{U_{\max}} \right)_{\text{снар}}$  – относительное значение сигнала моста при прохождении кондуктометрической ячейки снарядом,  $\Psi$  – средняя доля времени, в течение которого межэлектродное пространство в датчике занято снарядом.

Регистрирующие сигнал резистивного датчика приборы (см. рис. 3.2) интерпретируют полученные результаты по схеме, которая приведена на рис. 3.3. Реальная форма сигнала (заштрихованная поверхность) отражает переходные процессы, имеющие место при прохождении двухфазной средой межэлектродного пространства датчика. Как видно из рис. 3.3, сначала амплитуда сигнала постепенно нарастает до некоторого значения  $U = U_{\text{снар}}$ , а затем уменьшается до значения  $U = U_{\text{проб}}$  (мгновенное газосодержание в данной структуре колеблется от 0,02 до 0,9).

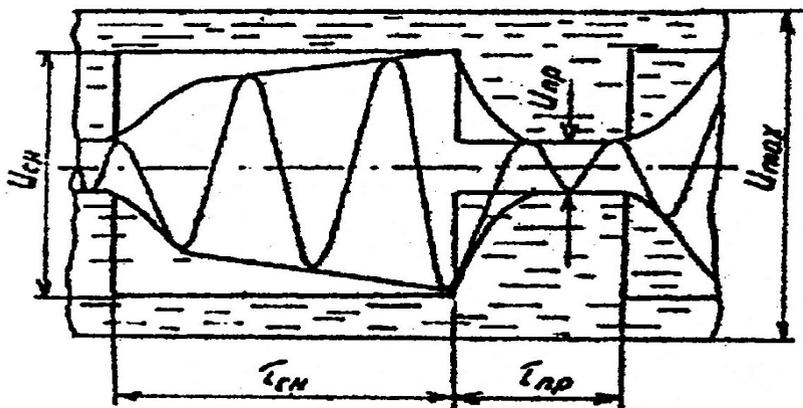


Рис. 3.3. Снарядный режим на регистрирующих приборах:  $\tau_{\text{сна}}$ ,  $\tau_{\text{пр}}$  – время прохождения снарядом (пробкой) кондуктометрической ячейки;  $U_{\text{снар}}$ ,  $U_{\text{проб}}$  – сигнал моста при прохождении кондуктометрической ячейки снарядом (пробкой);  $U_{\text{max}}$  – максимальное значение сигнала моста, прохождения снаряда  $\tau_{\text{сна}}$  и пробки  $U_{\text{проб}}$  через кондуктометрическую ячейку

Усреднение по времени, как показывают результаты исследований [4, 5], необходимо проводить в соответствии с рис. 3.3, на котором отмечены временные интервалы. Таким образом, учитывая обозначения рис. 3.3, соотношение для определения среднего значения истинного объемного паросодержания можно записать как:

$$\bar{\varphi} = \frac{U_{\text{проб}}}{U_{\text{max}}} \cdot \frac{\tau_{\text{пр}}}{(\tau_{\text{сна}} + \tau_{\text{пр}})} + \frac{U_{\text{снар}}}{U_{\text{max}}} \cdot \frac{\tau_{\text{сна}}}{(\tau_{\text{сна}} + \tau_{\text{пр}})}. \quad (3.24)$$

Схема установки, на которой определяются параметры снарядного режима течения, представлена на рис. 3.4.

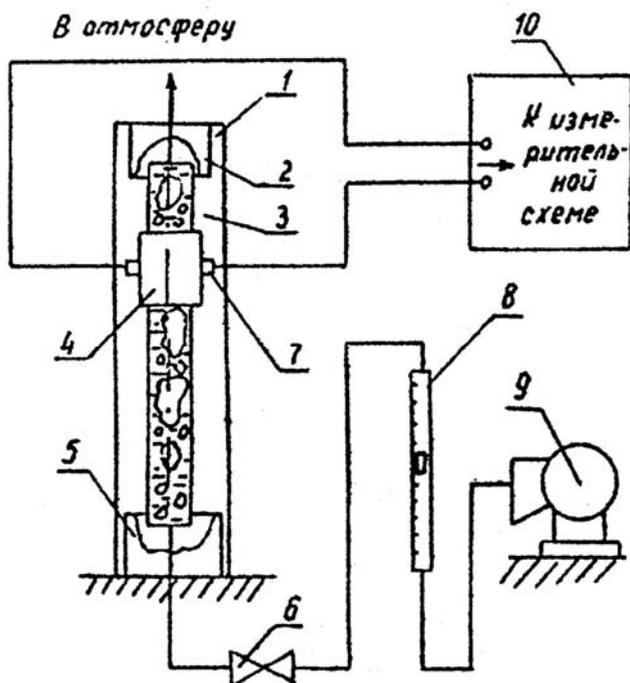


Рис. 3.4. Схема барботажной установки: 1 – корпус; 2 – верхнее концевое устройство; 3 – барботажная труба; 4 – резистивный датчик; 5 – нижнее концевое устройство; 6 – регулировочный вентиль; 7 – ввод сегментного электрода; 8 – ротаметр; 9 – компрессор; 10 – измерительная схема

Установка представляет собой барботажный столб с нулевым расходом жидкости (воды). При барботаже воздуха через воду в кварцевой трубке 3 образуется газожидкостная структура, которую в зависимости от значения создаваемого компрессором 9 расхода воздуха можно использовать для моделирования режимов течения двухфазного потока, в том числе и снарядного режима течения. Воздух подается компрессором 9 через ротаметр 8, измеряющий расход воздуха, в прозрачную, выполненную из кварцевого стекла, барботажную трубку 3. На трубке закреплен резистивный датчик паросодержания 4, имеющий два электропровода 7. Вводы датчика подсоединены в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3.2. Для регулирования расхода воздуха предусмотрены регулировочные вентили 6. Кварцевая трубка закреплена в двух концевых устройствах (верхнем – 2 и нижнем – 5) корпуса 1 барботажного стол-

ба. Для улучшения визуализации процесса барботажа воздуха в воде предусмотрена система подсветки, установленная в корпусе 1.

### 3.3. Порядок выполнения работы

**Внимание!** Включать установку разрешается только в присутствии преподавателя или лаборанта!

1. Подготовить к работе измерительные приборы в соответствии с их описаниями.

2. Обеспечить питание неравновесного моста, установив выходную частоту генератора ГЗ-109, равную 1 кГц.

3. Уравновесить мост посредством изменения значений  $R_{\text{комп}}$  магазина сопротивлений Р-32 и значений  $C_{\text{комп}}$  магазина емкостей при  $\varphi = 0$  {в кондуктометрической ячейке резистивного датчика находится одна жидкость}.

4. Определить максимальное значение выходного сигнала моста  $U_{\text{max}}$  при  $\varphi = 1$  ( $R_{\text{датч}} \approx \infty$ ). Для этого при включенных измерительных приборах разорвать электрическую цепь моста, отсоединив от датчика один из электродов.

5. Включить компрессор и, регулируя вентилем расход воздуха через барботажный столб, установить в барботажной трубке снарядный режим течения воздуха.

6. Выбрав три снаряда близкой друг к другу конфигурации, произвести измерение в относительных единицах  $U_{\text{снар}}$ ,  $U_{\text{проб}}$ ,  $\tau_{\text{сн}}$ ,  $\tau_{\text{пр}}$ . Значения измеряемых параметров выбирать в соответствии с рис. 3.3.

### 3.4. Обработка результатов измерений

Обработка опытных данных заключается в расчете истинного объемного паросодержания и истинной плотности двухфазного потока.

1. Определить относительные значения сигналов датчика при прохождении кондуктометрической ячейки снарядом  $U_{\text{снар}}/U_{\text{max}}$  и пробкой  $U_{\text{проб}}/U_{\text{max}}$  и относительные доли времени, в течение которого межэлектродное пространство занято снарядом  $\psi$  и пробкой

$(1 - \psi)$ , для всех изучаемых в лабораторной работе случаев. Расчет долей времени проводится по формулам:

$$\begin{aligned}\psi &= \frac{\tau_{\text{сн}}}{\tau_{\text{сн}} + \tau_{\text{пр}}}, \\ 1 - \psi &= \frac{\tau_{\text{пр}}}{\tau_{\text{сн}} + \tau_{\text{пр}}}.\end{aligned}\tag{3.25}$$

В соотношениях (3.25) обозначения параметров и переменных такие же, как и в формулах (3.17), (3.24).

2. В соответствии с формулой (3.24) рассчитать значения истинного объемного паросодержания в отдельном случае измерений.

3. Определить среднее значение истинного объемного паросодержания  $\bar{\varphi}$  в соответствии с соотношением:

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \bar{\varphi}_i,\tag{3.26}$$

где  $i$  – индекс, соответствующий измерению,  $N$  – количество проведенных измерений.

4. В соответствии с формулой (3.16) определить значение истинной плотности двухфазной среды  $\rho_{\text{ист}}$ .

5. Рассчитать относительную и абсолютную погрешности проведенных измерений.

### 3.5. Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. схему неравновесного моста и краткое описание резистивного метода измерения паросодержания;
2. основные расчетные соотношения;
3. результаты измерений и расчетов, сведенные в табл. 3.1;
4. оценку погрешностей проведенных измерений.

Таблица 3.1

№ п/п	$U_{сн}$	$U_{пр}$	$\tau_{сн}$	$\tau_{пр}$	$\bar{\varphi}_i$	$\bar{\varphi}$	$\bar{\rho}_{ист}$	Примечание
1								
2								
3								

## Список литературы

1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Машгиз, 1962.
2. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Теплообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1977.
3. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М: Высшая школа, 1977.
4. Резистивный и емкостной методы измерения паросодержания/ В.И. Субботин, Ю.Е. Похвалов, Л.Б. Михайлов и др. // Теплоэнергетика. 1974. № 6. С. 63–68.
5. Похвалов Ю.Е., Деев В.И., Корсун А.С. Истинное равновесное паро-, газосодержание при течении в каналах: Учебное пособие. М.: МИФИ, 1991.

## Контрольные вопросы

1. Объясните причины неравенства объемных расходных и истинных паросодержаний двухфазного потока в трубе.
2. Когда наблюдается автомодельность истинного паросодержания от скорости смеси двухфазного потока?
3. В чем суть интегрального и локального проскальзывания двухфазных потоков?
4. Опишите соотношение вкладов в истинное газосодержание чередующихся пузырьковой и кольцевой структур снарядного потока.
5. Объясните влияние давления в двухфазном потоке на истинное паросодержание.

## Работа 4

# ГРАДУИРОВКА ОПТИЧЕСКОГО ПИРОМЕТРА – БЕСКОНТАКТНОГО ДАТЧИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

**Цель:** изучение основных положений оптической пирометрии; изучение принципа работы, устройства и технических характеристик оптических пирометров ЭОП-66 и ОППИР-017; проведение поверки нижней шкалы оптического пирометра ОППИР-017 по температурной лампе СИ-8-200; определение величины пирометрического ослабления поглощающего стекла пирометра и проведение поверки верхней шкалы пирометра ОППИР-017.

### 4.1. Основные положения оптической пирометрии

Температура может быть измерена при помощи различных термометрических устройств. Отсчет температуры производится по шкале температур. Шкала температур устанавливается путем деления разности показаний различных термометрических устройств в двух произвольно выбранных постоянных точках на некоторое число равных частей, называемых градусами [1], [3].

Существуют две температурные шкалы: международная термодинамическая шкала и международная практическая температурная шкала (МПТШ). МПТШ основывается на шести реперных точках с фиксированными значениями температур: точка кипения кислорода, тройная точка воды, точки кипения воды и серы, точки затвердевания серебра и золота. Единицами измерения температуры по МПТШ являются международный практический градус Цельсия ( $t$  °С) и международный практический градус Кельвина (ТК).

Тепловое излучение нагретых тел является основным источником информации об их температуре в области температур выше 1000 °С [3].

В соответствии с международным соглашением Международная практическая шкала температур (МПШТ) выше точки затвердева-

ния золота (1063 °С) определяется по излучению "абсолютно черного тела".

Для абсолютно черного тела спектральная плотность равновесного излучения (спектральная энергетическая светимость в интервале от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ ) для длины волны  $\lambda$  описывается законом Планка:

$$r_0(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}, \quad (4.1)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $T$  – абсолютная температура;  $C_1 = 2\pi h c^2 = 3,7413 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>;  $C_2 = hc/k = 1,4388 \cdot 10^{-2}$  м·К;  $h$  – постоянная Планка;  $k$  – постоянная Больцмана;  $c$  – скорость света в вакууме.

При температурах  $T < 4000$  °С в области длин волн  $\lambda = 0,4 \div 0,7$  мкм уравнение Планка с погрешностью 0,4 % может быть заменено более простым соотношением (формулой Вина) [1]:

$$r_0(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}. \quad (4.2)$$

Интегрируя формулу (4.1) по всем длинам волн, получим закон Стефана-Больцмана, связывающий интегральную плотность излучения  $r_0(T)$  с абсолютной температурой  $T$ :

$$r_0(T) = \int_0^{\infty} r_0(\lambda, T) \cdot d\lambda = \sigma_0 T^4, \quad (4.3)$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана.

Для характеристики излучения по направлению вводится понятие яркости светящейся поверхности. Полная энергетическая яркость  $B$  [4] определяется как отношение количества энергии (светового потока  $\Phi$ ), приходящейся на единицу телесного угла  $\Omega$ , распространяющейся в данном направлении  $\alpha$  ( $\alpha$  – угол между выбранным направлением и нормалью к излучающей поверхности) и отнесенной к единице проекции излучающей поверхности  $F_a$ , на

плоскость, ортогональную направлению  $\alpha$  (т.е. к единице видимой поверхности по направлению  $\alpha$ ):

$$B(T) = \frac{d\Phi(T)}{dF_a d\Omega}. \quad (4.4)$$

Аналогично определяется монохроматическая яркость:

$$B(\lambda, T) = \frac{d\Phi(\lambda, T)}{dF_a d\Omega}. \quad (4.5)$$

Если яркость не зависит от направления, т.е. находится в соответствии с законом Ламберта, то наблюдатель видит излучающее тело одинаково ярким независимо от его формы. В этом случае энергетическая светимость и яркость связаны между собой соотношениями:

$$r_0(T) = \pi B_0(T); \quad r_0(\lambda, T) = \pi B_0(\lambda, T). \quad (4.6)$$

Строго говоря, таким излучателем является только абсолютно черное тело.

Все реальные тела по степени поглощения ими лучистой энергии отличаются от черного тела. Излучательная способность реальных (серых) тел также отличается от лучеиспускательной способности черного тела и может быть характеризована степенью черноты полной или спектральной, которые определяются как:

$$\epsilon_T = \frac{B(T)}{B_0(T)}; \quad \epsilon_\lambda = \frac{B(\lambda, T)}{B_0(\lambda, T)}, \quad (4.7)$$

где  $B_0$  и  $B$  – интегральные и монохроматические яркости черного и реального тел соответственно.

Если яркость зависит от направления излучения, то для характеристики излучения по данному направлению необходимо вводить понятие степени черноты, зависящей от направления. Величины  $\epsilon_T$  и  $\epsilon_\lambda$  называются полусферическими, если проведено усредне-

ние по всей полусфере (по телесному углу  $2\pi$ ) [5]. В оптической пирометрии большое значение имеет излучение, распространяющееся по нормали к излучающей поверхности ( $\alpha = 0$ ). Степень черноты в этом случае называют нормальной степенью черноты и используют те же обозначения, что и для полусферического излучения, т.е.  $\varepsilon_T$  и  $\varepsilon_\lambda$ .

По закону Кирхгофа степень черноты тел непосредственно связана с поглощающей способностью  $\alpha_T$  или  $\alpha_\lambda$  [3]:

$$\varepsilon_T = \alpha_T; \quad \varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda \quad (4.8)$$

Поглощающая способность определяется как отношение поглощенной лучистой энергии к падающей, т.е. поглощающая способность всегда меньше единицы. По этой причине для любых серых тел:

$$0 < \varepsilon_T < 1; \quad 0 < \varepsilon_\lambda < 1. \quad (4.9)$$

В случае измерения температуры оптическим яркостным пирометром сравнивается монохроматическая яркость светящегося тела с яркостью другого тела, например, нити накаливания, встроенной в пирометр и предварительно проградуированной по абсолютно черному телу. В этом случае измеряется так называемая яркостная температура  $T_j$ , которая характеризует абсолютно черное тело и отличается от истинной температуры  $T$ . Из определения яркости (4.4) и соотношения Вина (4.2) следует, что истинная температура  $T$  связана с яркостной температурой  $T_j$  соотношением:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_j} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon_\lambda + \frac{\lambda}{C_2} \ln \tau, \quad (4.10)$$

где  $\tau$  – коэффициент пропускания света окружающей средой на пути от излучающего тела до оптического пирометра.

Градуировка наиболее точных (прецизионных) оптических пирометров начинается с градуировки по реперной точке МПТШ – температуре затвердевания золота. Для градуировки на более вы-

сокие температуры используется модель абсолютно черного тела с регулируемой температурой и различные поглотители. При этом наиболее надежным поглотителем, обеспечивающим неселективное ослабление яркости с заданным коэффициентом пропускания  $\tau$ , является вращающийся диск с вырезанными в нем секторами. Коэффициент пропускания такого устройства определяется по формуле:

$$\tau = \frac{\varphi}{2\pi}, \quad (4.11)$$

где  $\varphi$  – сумма раскрытия углов диска.

Если яркость абсолютно черного тела, рассматриваемого через поглотитель равна яркости черного тела при температуре затвердевания золота  $T_{Au}$  без поглотителя, то из соотношения Вина (4.2):

$$C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{\frac{C_2}{\lambda T_{Au}}} = \tau_\lambda \cdot C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{\frac{C_2}{\lambda T}}. \quad (4.12)$$

Последнее равенство позволяет рассчитывать истинную температуру абсолютно черного тела:

$$T = \left( -\frac{1}{T_{Au}} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\tau_\lambda} \right)^{-1} = \left( -\frac{1}{T_{Au}} - A \right)^{-1}. \quad (4.13)$$

Величина  $A$  называется пирометрическим ослаблением поглотителя и измеряется в "пиро" (1 пиро =  $10^{-6}$  1/град).

Используя формулу (4.13) и имея одно опорное значение температуры  $T_{Au}$ , можно осуществить экстраполяцию до практически неограниченных значений температур  $T$ . Подобным образом первоначально градуируются эталонные оптические пирометры. По этим пирометрам градуируются образцовые оптические пирометры и образцовые температурные лампы.

Температурные лампы служат эталоном яркостной температуры и используются для градуировки лабораторных и технических оптических пирометров [2]. Они представляют собой лампы накали-

вания с телом накаливания из вольфрамовой нити (шириной 2 – 3 мм), градуированные на яркостные температуры в зависимости от силы тока, протекающего через лампу. Свойства температурной лампы, а именно яркость, изменяются при изменении ее нагрева. В этой связи непосредственная градуировка пирометров по температурным лампам производится только до температуры 1500 °С (вакуумные лампы) или до 2000 °С (газонаполненные лампы).

Градуировка и проверка оптических пирометров [2] в области более высоких температур в большинстве случаев осуществляется расчетным путем с использованием поглощающих стекол с различным пирометрическим ослаблением. При введении поглотителя с пирометрическим ослаблением  $A$  значения яркостной температуры  $T_1$ , отсчитанные по нижней (отградуированной без поглотителя) шкале пирометра будут соответствовать истинным температурам излучателя  $T_2$ :

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = A. \quad (4.14)$$

Из последнего соотношения следует, что верхняя шкала прибора ( $T_1$ ) непосредственно рассчитывается по нижней шкале ( $T_2$ ). Соотношение (4.14) используется также и для определения пирометрического ослабления  $A$ . В последнем случае яркостные температуры излучателя с поглотителем и без поглотителя ( $T_1$  и  $T_2$ ) определяются независимо. В частности, при использовании температурных ламп  $T_2$  определяется по току, текущему через лампы, а  $T_1$  непосредственно измеряется по нижней шкале оптического пирометра.

Градуировка пирометра по температурным лампам позволяет исключить практически все систематические ошибки, за исключением неточностей, связанных с невозпроизводимостью МПШТ температурной лампой (вследствие ошибок ее градуировки и других причин). Специально проведенные исследования показали, что средняя квадратичная погрешность воспроизведения МПШТ образцовой лампой 2-го разряда может быть охарактеризована сле-

дующими значениями: при  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $\sigma_{\text{л}} = \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; при  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $\sigma_{\text{л}} = \pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Наиболее вероятная случайная ошибка пирометра  $\sigma_{\text{в}}$ , обусловленная как ошибкой в уравнивании яркости изображения светящегося объекта и нити пирометрической лампы, так и ошибками отсчета температур и др., может быть определена непосредственно для данного прибора путем многократного измерения  $t_i$ , излучателя постоянной температуры [3]:

$$\sigma_{\text{в}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1}}, \quad (4.15)$$

где  $\bar{t}$  – среднее арифметическое значение  $t_i$ . При этом вариации показаний  $v$  (наибольшая разница между двумя любыми значениями  $t_i$ ) должны укладываться с вероятностью 95 % в пределы:

$$v = 2\sigma_{\text{в}} - (-2\sigma_{\text{в}}) = 4\sigma_{\text{в}}. \quad (4.16)$$

При поверке нижней шкалы оптического пирометра по температурной лампе показание оптического пирометра определяется как среднее арифметическое шести независимых показаний. В этой связи наиболее вероятная ошибка данного значения составляет  $\sigma_{\text{в}} / \sqrt{5}$ . Общее значение ошибки градуировки нижней шкалы оптического пирометра  $\sigma_1$  определяется величинами  $\sigma_{\text{л}}$  и  $\sigma_{\text{в}} / \sqrt{5}$ :

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_{\text{л}}^2 + \frac{1}{5}\sigma_{\text{в}}^2}. \quad (4.17)$$

Предельная погрешность градуировки нижней шкалы оптического пирометра (с вероятностью 95%) равна  $\Delta t_{\text{ш1}} = 2\sigma_1$ .

Основная погрешность измерения температуры оптическим пирометром по нижней шкале  $\Delta t_1$  должна складываться из ошибки градуировки и предельной случайной ошибки  $2\sigma_1$  т.е.

$$\Delta t_1 = 2\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_B^2} = 2\sqrt{\sigma_{Л}^2 + 1,2\sigma_B^2} \quad (4.18)$$

Так как верхняя шкала пирометра определяется расчетным путем с помощью соотношения (4.14), то наиболее вероятная ошибка ее градуировки рассчитывается как

$$\sigma_2 = \sqrt{(\sigma_1 \frac{T_2^2}{T_1^2})^2 + (\sigma_A T_2^2)^2}, \quad (4.19)$$

где  $T_1$  – значение температуры по нижней шкале (яркостная температура при введении поглощающего стекла);  $T_2$  – проверяемая температура верхней шкалы (истинная яркостная температура);  $\sigma_A$  – наиболее вероятная ошибка определения величины пирометрического ослабления (формула (4.19)).

В связи с тем, что пирометрическое ослабление как среднее из шести независимых измерений значений  $T_1'$  с последующим усреднением по  $m = 3$  не зависит от полученных значений  $A$ , то

$$\sigma_A = \sqrt{(\frac{\sigma_1}{(T_1')^2})^2 + (\frac{\sigma_2}{(T_2')^2})^2} \frac{1}{\sqrt{m-1}}, \quad (4.20)$$

где наиболее вероятная погрешность определения температуры лампы  $T_2$  определяется ее градуировкой и равна  $\sigma_{Л}$ . Окончательно

$$\sigma_2 = \sqrt{\sigma_1^2 (\frac{T_1}{T_2})^2 + \frac{\sigma_1^2}{2} (\frac{T_2^2}{T_1^2})^2 + \frac{\sigma_{Л}^2}{2} (\frac{T_2^2}{T_1^2})^2}. \quad (4.21)$$

Наиболее вероятная случайная ошибка верхней шкалы  $\sigma_1^3$  определяется так же, как и для нижней шкалы по формуле (15). Эта погрешность рассчитывается таким образом, что с вероятностью 96% основная ошибка единичного измерения

$$\Delta t_2 = 2\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_2^2}, \quad (4.22)$$

а вариация показаний составляет  $v = 4\sigma_B$ .

## 4.2. Оптические пирометры ОППИР-017 и ЭОП-66

Рассматриваемые оптические пирометры являются яркостными [1], [3].

Оптический пирометр ОППИР-017 со встроенным показывающим прибором предназначен для измерения яркостной температуры светящихся тел в монохроматическом излучении (длина волны  $\lambda = 0,66$  мкм). Работа пирометра основана на одном из основных принципов любой оптической системы: яркость излучающего тела равна яркости его оптического изображения, рассматриваемого в направлении оптической оси системы.

На рис. 4.1 представлена принципиальная схема пирометра. Изображение накаливаемого объекта 1 с помощью объектива 2 создается в плоскости  $L$ . В этой же плоскости устанавливается нить лампочки накаливания пирометра 4. Наблюдатель, рассматривая с помощью окулярной линзы 6 изображение нити лампочки, видит его проектирующимся на изображение объекта. Между пирометрической лампочкой и объективом по мере надобности вводится поглощающее стекло 3, а между лампочкой и глазом наблюдателя – светофильтр 5. Как известно, красный светофильтр поглощает световые волны с длиной волны, меньшей  $\lambda = 0,6$  мкм, а человеческий глаз может регистрировать свет только в интервале длин волн  $\lambda = 0,4 - 0,7$  мкм. Таким образом, через окуляр и красный светофильтр регистрируется только монохроматическое излучение с длиной волны  $\lambda = 0,65$  мкм.

Питание пирометрической лампы 4 осуществляется источником питания через выключатель 12. Реостат 11 и показывающий прибор

9 служат для регулировки и измерения силы тока, текущего через лампу 4.

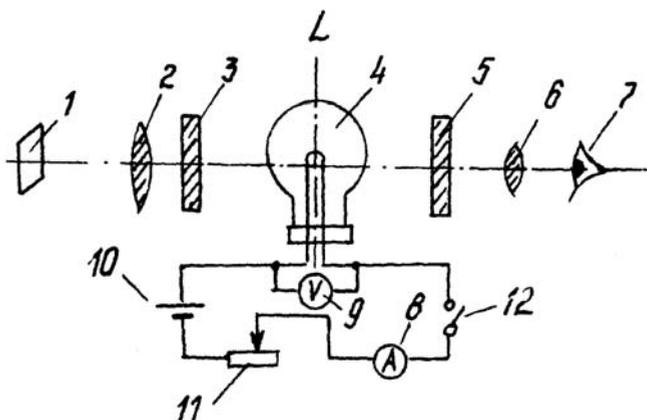


Рис. 4.1. Принципиальная схема оптического пирометра: 1 – изображение объекта; 2 – объектив; 3 – поглощающее стекло; 4 – лампочка накаливания пирометра; 5 – светофильтр; 6 – окулярная линза; 7 – наблюдатель; 8 – амперметр; 9 – показывающий прибор; 10 – источник питания; 11 – реостат; 12 – выключатель

Процесс измерения яркостной температуры объекта сводится к тому, что, измеряя силу тока накала в пирометрической лампе, добиваются, чтобы ее видимая на глаз яркость стала равной яркости изображения объекта. В этом случае глаз наблюдателя перестает различать нить на фоне изображения объекта и она, как говорят, "исчезает". Зная зависимость яркостной температуры нити лампочки от силы тока накала для данного прибора, и измерив величину тока в момент исчезновения нити, определяют яркостную температуру объекта.

Внешний вид пирометра ОППИР-017 представлен на рис. 4.2. В корпусе 1, укрепленном на штативе 2, размещается подвижный тубус 3 с объективом и тубус 4 с окуляром, а также шкала 5 со стрелочным указателем. Рукоятка 6 служит для введения одного из двух поглощающих стекол между объективом и пирометрической лампой накаливания, встроенной в пирометр. Когда белая указательная точка на рукоятке 6 совпадает с голубой точкой на корпусе 1, то отсчет показаний нужно производить по нижней измерительной шкале. В случае совпадения белой точки на рукоятке с красной точкой на корпусе – отсчет производится по верхней измеритель-

ной шкале. Кольцо реостата 7 служит для изменения тока в цепи лампы пирометра и, следовательно, для изменения яркости.

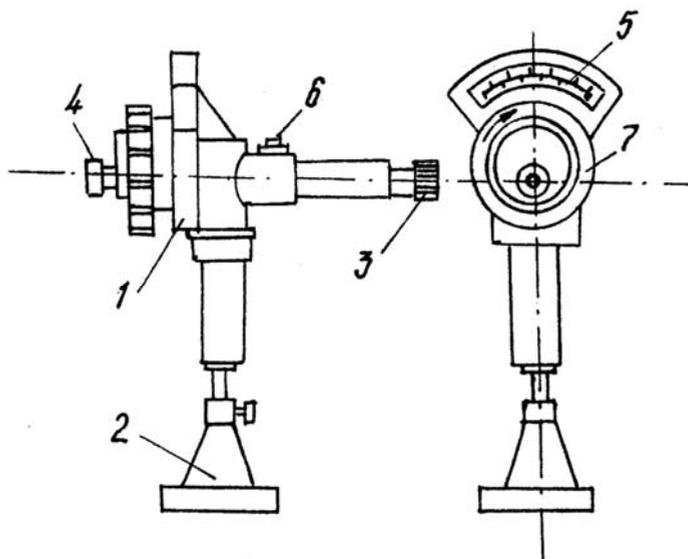


Рис. 4.2. Пирометр ОППИР-017: 1 – корпус; 2 – штатив; 3 – подвижный тубус; 4 – окуляр; 5 – шкала со стрелочным указателем; 6 – рукоятка; 7 – кольцо реостата

Прецизионный оптический пирометр ЭОП-66 с исчезающей нитью предназначен как для эталонных работ по воспроизведению шкалы температур, так и для измерения температур при различных научных исследованиях. Прибор отличается большой светосилой (1:3) и, благодаря этому, может использоваться для измерения яркостных температур в красной области спектра, начиная уже с  $800^{\circ}\text{C}$ . Окуляр прибора служит микроскоп с 40-кратным увеличением. Цилиндрические нити пирометрической лампочки со стороны наблюдателя ошлифованы до половины диаметра, что способствует улучшению исчезновения нити при большом угле входа прибора. Прибор снабжен реостатом для регулирования силы тока в лампочке. Пределы измерения температуры с помощью данного прибора  $900 - 10000^{\circ}\text{C}$ .

### 4.3. Описание экспериментальной установки

Согласно установленным стандартам технические оптические пирометры поверяются по светоизмерительным лампам 2-го разряда. На описываемом стенде поверяются и градуируются ниточные пирометры типа ОППИР по температурной лампе СИ-8-200. Принципиальная электрическая схема стенда приведена на рис. 4.3.

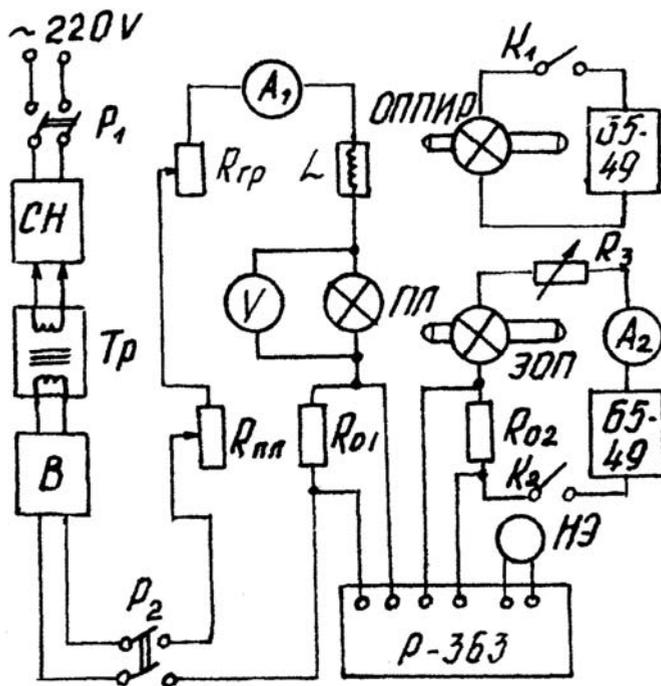


Рис. 4.3. Электрическая схема стенда:  $P_1, P_2$  – пакетные выключатели; СН – стабилизатор напряжения;  $T_p$  – понижающий трансформатор; В – выпрямитель;  $L$  – индуктивность;  $R_{гр}$  – реостат грубой регулировки;  $R_{пл}$  – реостат плавной регулировки;  $R_{01}$  – образцовая катушка сопротивления ( $R = 0,001$  Ом);  $R_{02}$  – образцовая катушка сопротивления ( $R = 0,01$  Ом); P-363 – потенциометр; ПЛ – пирометрическая температурная лампа;  $K_1, K_2$  – тумблеры; Б5-49 – источник питания; ОППИР – поверяемый пирометр; ЭОП – прецизионный (эталонный) оптический пирометр;  $R_3$  – регулятор;  $A_1, A_2$  – амперметры;  $V$  – вольтметр; НЭ – нормальный элемент

Сетевое напряжение через пакетный выключатель  $P_1$  и стабилизатор напряжения СН подается на понижающий трансформатор Тр и затем на двухполупериодный диодный выпрямитель  $B$ . Постоянное напряжение с выпрямителя (12 В) через пакетный выключатель  $P_2$  подается на пирометрическую лампу ПЛ, последовательно с которой соединена сглаживающая индуктивность  $L$  (обмотка регулятора РНО-10), два ступенчатых реостата для грубой и плавной регулировок тока  $R_{гр}$ ,  $R_{пл}$  и образцовая катушка сопротивления (0,001 Ом) –  $R_{01}$ .

Ток и падение напряжения на лампе контролируются щитовыми приборами: амперметром  $A_1$  и вольтметром  $V$ . Точное значение величины тока, проходящего через лампу, определяется по величине падения напряжения на катушке сопротивления  $R_{01}$ , которое измеряется потенциометром Р-363.

На рис. 4.3 представлены также цепь питания пирометра типа ОППИР и цепь питания эталонного оптического пирометра ЭОП (ЭОП-66): источник питания Б5-49, регулятор  $R_3$ , образцовая катушка  $R_{02}$  ( $R = 0,01$  Ом) и тумблер  $K_2$ . Последняя цепь предназначена для градуировки лампы ПЛ и реализована на этом же стенде.

#### 4.4. Порядок выполнения работы

**Внимание!** Включать установку разрешается только в присутствии преподавателя или лаборанта!

1. Подготовить к измерениям оптические пирометры ОППИР-017, ЭОП-66 и потенциометр Р-363:

а) вывести до предела (против часовой стрелки) реостат пирометра ОППИР-017, установить требуемый (нижний) предел измерения, включить  $K_1$  питания пирометра, постепенно немного повернуть реостат пирометра по часовой стрелке и, убедившись, что стрелка показывающего прибора начинает отклоняться, вывести реостат;

б) вывести до предела (против часовой стрелки) регулятор пирометра ЭОП-66, включить тумблер  $K_2$  питания прибора, постепенно повернуть регулятор по часовой стрелке и убедиться, что нить лампочки пирометра накаляется;

в) подготовить в соответствии с описанием прибора потенциометр Р-363.

2. Вывести полностью реостаты плавной ( $R_{пл}$ ) и грубой ( $R_{гр}$ ) регулировок тока лампы СИ-8-200 (против часовой стрелки до предела).

3. Включить питание лампы ПЛ (СИ-8-200) контакторами  $P_1$  и  $P_2$ , расположенными на щите электропитания. Вывести реостаты плавной ( $R_{пл}$ ) и грубой ( $R_{гр}$ ) регулировок тока лампы СИ-8-200 немного по часовой стрелке.

4. Провести проверку нижней шкалы пирометра ОППИР-017:

а) установить необходимое значение тока накала лампы СИ-8-200;

б) с помощью регулятора прибора ЭОП-66 изменять накал нити лампочки в пирометре до тех пор, пока яркости нити лампочки ЭОП-66 и ленты лампы СИ-8-200 не выровняются;

в) определить значения напряжения на образцовой катушке сопротивления  $R_{02}$  ( $R = 0,01$  Ом) с помощью потенциометра Р-363 и рассчитать величину тока, текущего в лампочке ЭОП-66, по градуировочной таблице найти истинную температуру  $t_{ист}$  ленты лампы СИ-8-200 и занести ее в табл. 4.1;

г) при том же накале лампы СИ-8-200 провести измерения температуры с помощью пирометра ОППИР. Для этого с помощью регулировочного реостата изменять накал лампочки поверяемого пирометра до тех пор, пока яркость визируемого участка нити лампочки и ленты лампы не выровняются (нить "исчезнет" на фоне изображения ленты). По показывающему отсчету пирометра произвести отсчет температуры  $t_{изм}$  и занести его в табл. 4.1;

д) изменить накал лампы СИ-8-200 и провести измерения вновь, т.е. повторить операции, указанные в подпунктах 4а – 4г (каждое измерение проводить два - три раза).

5. Определить пирометрическое ослабление  $A$  поглощающего стекла пирометра, проделав следующие операции: для трех значений температур вблизи верхнего предела градуировки лампы СИ-8-200 (для температур порядка 1200, 1300 и 1400 °С) по нижней (отградуированной) шкале пирометра ОППИР произвести измерения

температуры без поглощающего стекла ( $t_{1\text{изм}}$ ) и с поглощающим стеклом ( $t_{2\text{изм}}$ ), и занести эти значения в табл. 4.2.

## 4.5. Обработка результатов измерений

Обработка результатов измерений заключается в расчетах истинной температуры пирометрической лампы, поправок к показаниям пирометра ОППИР, истинного пирометрического ослабления  $A_{\text{ист}}$  и проведении поверки верхней шкалы пирометра ОППИР-017 расчетным путем [2].

1. Вычислить и занести в табл. 4.1 среднеарифметические значения температуры  $\bar{t}_{\text{изм}}$ .

2. Вычислить и занести в табл. 4.1 поправки к значениям показаний пирометра ОППИР-017. Расчет поправок производится по формуле:

$$\Delta t = t_{\text{ист}} - \bar{t}_{\text{изм}}. \quad (4.23)$$

3. Вычислить и занести в табл. 4.2 пирометрическое ослабление пирометра ОППИР для трех выбранных значений температуры с помощью соотношения:

$$A = \frac{1}{t_{2\text{изм}} + 273} - \frac{1}{t_{1\text{изм}} + 273}. \quad (4.24)$$

4. Рассчитать среднеарифметическое значение пирометрического ослабления  $\bar{A}$ .

5. Рассчитать истинное значение пирометрического ослабления  $A_{\text{ист}}$  по формуле:

$$A_{\text{ист}} = k \cdot \bar{A}, \quad (4.25)$$

где  $k = 1,02$  – цветовой коэффициент поглощающего стекла пирометров типа ОППИР.

6. Провести поверку верхней шкалы пирометра расчетным путем:

а) для расчетных температур  $\theta$  (от 1200 до 2000 °С через каждые 100 °С) вычислить соответствующие им значения яркостных температур при введении поглощающего стекла пирометра в соответствии с соотношением

$$\theta_1 = \frac{1}{\frac{1}{\theta + 273} + A_{\text{ист}}} - 273; \quad (4.26)$$

б) по данным табл. 4.1 определить поправки  $\Delta t$ , соответствующие температурам  $\theta_1$  и значения  $\theta'_1 = \theta_1 - \Delta t$ , которые будут фиксироваться пирометром ОППИР при их измерениях;

в) установить стрелку показывающего прибора пирометра ОППИР с помощью реостата на значения  $\theta'_1$  по нижней шкале и произвести отсчет значений  $t_2$  по шкале верхнего предела измерений;

г) рассчитать поправки  $k$  по показаниям пирометра при измерениях по шкале верхнего предела в соответствии с соотношением

$$\Delta t = \theta - t_2; \quad (4.27)$$

д) все расчетные значения  $\theta$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta'_1$ ,  $t_2$ ,  $\Delta t$  занести в табл. 4.3.

7. Определить основную погрешность пирометра ОППИР на обеих шкалах:

а) по данным  $t_{\text{изм}}$  табл. 4.1 для трех указанных преподавателем значений  $t_{\text{изм}}$  и по данным  $t_{1 \text{ изм}}$  табл. 4.2 рассчитать наиболее вероятную случайную погрешность измерений на обеих шкалах пирометра ( $\sigma_{\text{в}}$  и  $\sigma'_{\text{в}}$ ), используя соотношение (4.15) и вариации показаний  $v$  и  $v'$ ;

б) для трех заданных значений  $\bar{t}_{\text{изм}}$ , используя соотношения (4.17) и (4.18), рассчитать наиболее вероятную ошибку градуировки нижней шкалы пирометра и основную погрешность  $\Delta t_1$

в) используя значения, занесенные в табл. 4.2,  $\theta$  и  $\theta_1$  табл. 4.3 рассчитать наиболее вероятную ошибку градуировки верхней шкалы пирометра  $\sigma_2$  и основную погрешность  $\Delta t_2$  (для расчетов использовать формулы (4.21) и (4.22)).

## 4.6. Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Электрическую схему стенда и принципиальную схему оптического пирометра;
2. Основные расчетные соотношения;
3. Результаты измерений и расчетов, сведенные в таблицы (табл. 4.1; 4.2; 4.3);
4. Оценку погрешностей проведенных измерений.

Таблица 4.1

Результаты поверки нижнего предела шкалы пирометра

ОППИР-017			ЭОП-66			
№ п/п	$t_{изм}, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{изм}, ^\circ\text{C}$	$I_{л}, \text{A}$	$\bar{I}_{эл}, \text{A}$	$\bar{t}_{ист}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$

Таблица 4.2

Определение пирометрического ослабления поглощающего стекла пирометра  
ОППИР

№ п/п	$T_{1изм}, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{1изм}, ^\circ\text{C}$	$T_{2изм}, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{2изм}, ^\circ\text{C}$	$A, 1/^\circ\text{C}$

Таблица 4.3

Градуировка верхней шкалы пирометра

№п/п	$\theta, ^\circ\text{C}$	$\theta_1, ^\circ\text{C}$	$\theta'_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$

## Список литературы

1. Бошняк Л.Л. Измерения при теплотехнических исследованиях. Л.: Машиностроение (Ленинградское отделение), 1974.
2. ГОСТ 14301-69. Пирометры оптические промышленные с исчезающей нитью накала. М.: Изд. стандартов, 1969.
3. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 3. М.: Наука, 1971.
5. Справочник по теплообменникам: В 2 т. Т. 1/ Пер. с англ. под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. Физическая энциклопедия / Под ред. А.М. Прохорова, т. 1, 1988; т. 2, 1989. М.: Сов. энциклопедия.

## Контрольные вопросы

1. Какие законы теплового излучения Вы знаете?
2. В чём сущность методики градуировки яркостных пирометров?
3. Каковы основные элементы оптической системы пирометра?
4. Что такое пирометрическое ослабление?

Зависимость температуры нити лампы от силы тока пирометра ЭОП-66

Температура, °С	Сила тока, А	Температура, °С	Сила тока, А
Без поглотителя. Положение обоймы – ", "		Без поглотителя. Положение обоймы – ", "	
900	0,2810	1160	0,3583
910	0,2893	1170	0,3616
920	0,2915	1180	0,3649
930	0,2938	1190	0,3681
940	0,2961	1200	0,3715
950	0,2984	1210	0,3750
960	0,3008	1220	0,3781
970	0,3032	1230	0,3823
980	0,3056	1240	0,3861
990	0,3081	1250	0,3901
1000	0,3106	1260	0,3942
1010	0,3131	1270	0,3984
1020	0,3157	1280	0,4026
1030	0,3184	1290	0,4070
1040	0,3211	1300	0,4114
1050	0,3238	1310	0,4158
1060	0,3266	1320	0,4202
1070	0,3295	1330	0,4246
1080	0,3325	1340	0,4291
1190	0,3356	1350	0,4337
1200	0,3386	1360	0,4384
1110	0,3417	1370	0,4432
1120	0,3449	1380	0,4481
1130	0,3482	1390	0,4530
1140	0,3516	1400	0,4579
1150	0,3550		

Таблица П 4.2

Зависимость температуры нити лампы от силы тока пирометра ЭОП-66

Температура, °С	Сила тока, А	Температура, °С	Сила тока, А
При использовании первого поглощающего стекла. Положение обоймы – ".."		При использовании первого поглощающего стекла. Положение обоймы – ".."	
1400	0,3097	1660	0,3539
1410	0,3112	1670	0,3558
1420	0,3126	1680	0,3576
1430	0,3140	1690	0,3594
1440	0,3155	1700	0,3612
1450	0,3170	1710	0,3631
1460	0,3185	1720	0,3650
1470	0,3200	1730	0,3669
1480	0,3216	1740	0,3687
1490	0,3233	1750	0,3765
1500	0,3250	1760	0,3724
1510	0,3267	1770	0,3743
1520	0,3284	1780	0,3763
1530	0,3301	1790	0,3782
1540	0,3318	1800	0,3802
1550	0,3336	1810	0,3822
1560	0,3354	1820	0,3842
1570	0,3372	1830	0,3862
1580	0,3390	1840	0,3882
1590	0,3408	1850	0,3901
1600	0,3427	1860	0,3920
1610	0,3446	3870	0,3940
1620	0,3464	1880	0,3960
1630	0,3483	1890	0,3980
1640	0,3501	1900	0,4000
1650	0,3520	1910	0,4021

## Работа 5

# ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ВОДЫ В ТРУБЕ

**Цель:** освоение метода экспериментального определения коэффициента теплоотдачи при вынужденном движении жидкости в канале; определение среднего коэффициента теплоотдачи к потоку воды при различных скоростях течения и мощностях тепловыделения в трубе; сравнение полученных экспериментальных данных с результатами расчета формулам Диттуса-Белтера и Петухова-Кириллова.

### 5.1. Понятие среднего коэффициента теплоотдачи

Средний коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  является важной характеристикой процесса теплообмена, который учитывает его особенности, а именно, теплофизические свойства жидкости, режимные и геометрические факторы. Использование средних коэффициентов теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  удобно при инженерных расчетах теплообменных аппаратов. Средний коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{q}}{t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}}, \quad (5.1)$$

где  $\bar{t}_{\text{ст}}$ ,  $\bar{t}_{\text{ж}}$  и  $\bar{q}$  – средние значения температуры стенки, окружающей жидкости и плотности теплового потока по длине трубы соответственно. Средняя температура окружающей жидкости определяется как среднее арифметическое из значений температуры жидкости на входе и выходе на входе трубы:

$$\bar{t}_{\text{ж}} = \frac{1}{2}(t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}). \quad (5.2)$$

В практических расчетах часто применяют эмпирические зависимости, соответствующие экспериментальным данным или результатам численных расчетов процессов теплообмена. Наиболее распространена эмпирическая зависимость Диттуса-Белтера, которая может быть рекомендована для определения коэффициента теплоотдачи на стабилизированном участке теплообмена ( $l/d > 50$ ) при числах  $Pr$  ( $0,5 \leq Pr \leq 2,5$ ) и  $Re$  ( $10^3 \leq Re \leq 10^6$ )

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} . \quad (5.3)$$

Все теплофизические свойства жидкости определяются при средней температуре жидкости  $\bar{t}_{ж}$ .

Результаты численного расчета процесса теплообмена при турбулентном течении жидкости в трубах хорошо описываются формулой Петухова-Кириллова при числах  $Pr$  ( $0,5 \leq Pr \leq 200$ ) и  $Re$  ( $5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$ ):

$$Nu = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \cdot Re \cdot Pr}{1 + \frac{900}{Re} + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} , \quad (5.4)$$

где  $\xi = (1,82 \cdot \lg Re - 1,64)^{-2}$ .

## 5.2. Описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 5.1. Опытный участок представляет собой массивный алюминиевый корпус, состоящий из двух склеенных плит. Жидкость протекает по цилиндрическому каналу (трубе) на оси корпуса, образованному полуцилиндрическими пазами в плитах. Эффективная длина трубы, на которой происходит теплообмен  $l = 420$  мм, диаметр трубы  $d = 6$  мм. Обогрев трубки осуществляется тепловыделяющим элементом за счет джоулева тепловыделения с тремя возможными значениями мощности. Температура воды на входе и выходе из трубы определяются при помощи резистивных платиновых термо-

метров сопротивления Д5 и Д3 фирмы Honeywell (HEL-700-U-1-A). Электрическое сопротивление датчика  $R = 1000 \pm 1$  Ом при температуре  $0^\circ\text{C}$  и линейно растет при увеличении температуры. Коэффициент относительной чувствительности датчика составляет  $3,75 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$ . Для измерения температуры по рабочему элементу термометра пропускается постоянный ток (около 1 мА), по изменению напряжения на датчике определяется его электрическое сопротивление по значению которого находится температура. Средняя температура стенки определяется аналогичными термометрами Д1 и Д2.

Вода поступает в контур из БАКА при помощи помпы «ПОМПА 1», затем через штуцер П1, кран К1, реометр Р1 вода попадает в теплообменник «ЖИДКОСТЬ-ТРУБА». Подогретая вода через слив «С2» возвращается соответственно в РЕЗЕРВУАР. Пополнение воды в БАКЕ происходит через трубу, соединяющую БАК с РЕЗЕРВУАРОМ.

Объемный расход жидкости измеряется при помощи реометра Р1, состоящего из дифманометра и дросселя. Основным элементом дросселя являются откалиброванные отверстия в валу диаметрами 1,4 и 2,2 мм. На рукоятки вала нанесены две риски: широкая риска параллельно оси большого отверстия и узкая риска параллельно оси отверстия меньшего диаметра.

Действие реометра основано на измерении перепада давления в дросселирующем (сужающем сечение потока) устройстве (диафрагме, капилляре), установленном в трубопроводе, по которому поступает жидкость или газ. Перепад давления, связан однозначной зависимостью с расходом газа и измеряется дифманометром.

Дифманометр фирмы Motorola (MPX5050DP) содержит мембрану, деформируемую измеряемым давлением и тензомост, который преобразует деформацию в электрический сигнал. Выходное напряжение линейно зависит от разности давлений. В установке датчики откалиброваны на коэффициент  $100 \text{ мВ}/\text{кПа}$  при пределе измерения  $50 \text{ кПа}$ . Измеритель давления дает отсчеты с разрешением  $0,01$  или  $0,1 \text{ кПа}$  (соответственно  $1$  или  $10 \text{ мВ}$ ). Разрешение устанавливается тумблером «кПа» на передней панели установки. В положении «0,01» разрешение соответствует  $0,01 \text{ кПа}$ , а в положении «0,1» –  $0,1 \text{ кПа}$ . Показания перепада давления выводятся на цифровой дисплей на панели установки. Блок «К1» обеспечивает плавную регулировку расхода жидкости в контуре.



Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки

Основные параметры установки представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Параметр	Значение или диапазон значений	
Допустимые значения мощности, Вт	400, 800, 1200	
Допустимые значения расхода, мл/с	3-75	
Допустимый диапазон температур, °С	20-90	
Длина участка обогреваемой трубы, м	0,42	
Калиброванные отверстия дросселя, мм	1,4 / 2,2	
Диапазон измерений манометров, кПа	1 – 50	
Начальное смещение давления $P_{см}$ , кПа	0,08	
Калибровочный коэффициент $k$ , мл/с·(кПа) <sup>0,5</sup>		
Канал 1	1,4 мм	$k = 2,04$
	2,2 мм	$k = 5,39$
Канал 2	1,4 мм	$k = 2,11$
	2,2 мм	$k = 5,00$

Возможные виды измерений:

1. Мощность нагревателя, Вт
2. Сила тока, А
3. Напряжение, В
4. Давление в дросселе, кПа
5. Температура, °С

Объем резервуара с водой – 50 л.

На переднюю панель ИСТ вынесены следующие элементы схемы и органы управления (рис.5.2):



Рис.5.2. Передняя панель ИСТ

«СЕТЬ» – тумблер включения сети.

«ТОК/НАПРЯЖЕНИЕ/ДАВЛЕНИЕ» – 4-разрядный цифровой дисплей. Его свечение свидетельствует о включении питания прибора. Интерпретация показаний определяется положением рукоятки переключателя:

«I1» – ток питания нагревателя в амперах с разрешением 0,01 А;

«U1» – напряжение питания нагревателя в вольтах с разрешением 1 В;

«P1 – P4» – давление в датчиках давления в кПа.

Разрешение манометров устанавливается тумблером «кПа». В положении «0,01» разрешение манометров равно 0,01 кПа, в положении «0,1» разрешение равно 0,1 кПа.

**ВНИМАНИЕ!** При измерении токов и напряжений тумблер «кПа» должен быть в положении «0,01»!

«ТЕМПЕРАТУРА» – 4-разрядный цифровой дисплей 8-канального термометра. На дисплей выводится температура T1 – T8 соответственно одного из датчиков температуры D1 – D8, вы-

бранного переключателем входов термометра. Точность измерения температуры составляет 0,1 °С.

«Т1 – Т8» – переключатель входов термометра.

«ПОМПА 1» – тумблер включения «Помпы 1» насосной станции.

«НАГРЕВ» – тумблер включения питания нагревателей.

«400», «800» – тумблеры установки мощности нагревателя.

«ПОМПА 2» – тумблер включения «Помпы 2» насосной станции.

«Т1 – Т3» – установка максимальных температур датчиков Д1 – Д3 в диапазоне 30 – 90 °С

«Т4» – установка минимальной температуры датчика Д4 в диапазоне 10 – 40 °С.

Если к системе подключены все три датчика Д1 – Д3, и температуры датчиков ниже, чем установленные терморегуляторами «Т1 – Т3» максимально допустимые значения температур, то система разрешает включение нагревателей теплообменника «жидкость – труба». При этом на панели светятся зеленые индикаторы терморегуляторов. Для включения нагревателей нужно установить требуемую мощность тумблерами «400 – 800» и включить тумблер «НАГРЕВ». Мощность нагрева (в ваттах) примерно равна сумме показаний включенных тумблеров «400 – 800». Таким образом, можно установить мощности 400, 800, 1200 Вт.

Если температура хотя бы одного из датчиков Д1 – Д3 станет выше установленных соответствующим регулятором значений «Т1 – Т3», то питание нагревателя отключается, загорается красный индикатор соответствующего регулятора. Нагрев снова включится при остывании объекта и отключится при перегреве объекта.

При отсутствии сигналов с датчиков Д1 – Д3 или обрыве в цепи система отключает нагрев.

Для термостатирования выбранного объекта нужно установить требуемую температуру соответствующим выбранному объекту терморегулятором, а остальные терморегуляторы поставить на максимальную температуру (90 °С). При периодических включениях и выключениях нагрева температура объекта будет колебаться вблизи установленного значения. Амплитуда колебаний будет малой, если установленная мощность нагревателя ненамного превышает мощность, достаточную для поддержания заданной температуры объекта. Объектами термостатирования могут быть левый конец трубы-нагревателя (датчик Д1), правый конец трубы-

нагревателя (датчик Д2) и вытекающая из этой трубы жидкость (датчик Д3).

При отключенном нагреве (тумблеры НАГРЕВ – 400 – 800) индикаторы терморегуляторов сигнализируют о соотношении установленных и фактических температур.

Датчики Д5 – Д8 служат только для измерения температуры, включением каких-либо элементов системы они не управляют.

### 5.3. Подготовка установки к работе

**Внимание!** Включать установку разрешается только в присутствии преподавателя или лаборанта!

1. Проверить уровень воды в резервуаре. Резервуар должен быть заполнен не менее, чем на 3/4 своего объема;

2. Проверить все гидравлические соединения и замкнутость контура установки (особенно соединение Д3 – С2);

3. Проверить включение насосной помпы в сеть и соединения её с контуром установки;

4. Проверить работоспособность основных элементов и блоков лабораторного комплекса:

реометр – в положении Р1 показывает значение, не превышающее 0,08 кПа;

термометры – во всех положениях тумблера Т1 – Т8 на передней панели установки цифровой дисплей показывает значения температур близких к комнатному значению;

**ВНИМАНИЕ!** Запрещается включать блок нагревателей при отключенных или неисправных датчиках температуры.

Блок нагревателей – при включении тумблера «НАГРЕВ» и одновременно одного или нескольких тумблеров подачи мощности нагревателя «400» и «800» в положении «I1» переключателя видов измерений цифровое табло показывает наличие тока нагрева, при этом температуры, показываемые датчиками Д1 и Д2, начинают расти;

**ВНИМАНИЕ!** Прибор показывает верные значения токов и напряжений на нагревателе только если переключатель диапазонов манометров стоит в положении «0,01».

Блок реле ограничителей температур «Т1 – Т4» должен срабатывать при достижении датчиками температур Д1 – Д3 значений, которые установлены регуляторами «Т1 – Т3» блока реле. При

этом происходит отключение питания нагревателя и на панели загораются красные индикаторы.

5. Терморегуляторы Т1 – Т3 необходимо выставить на максимальное значение 90 °С. При выполнении работы необходимо следить за тем, чтобы блок нагревателей был постоянно включен (при этом должны гореть зеленые индикаторы терморегуляторов).

## 5.4. Порядок выполнения работы

1. Закройте кран «К1» канала 1 (сильно не затягивать!). Установите режим измерения «Р1» (расход жидкости в канале 1). Включите тумблер «ПОМПА 1». Убедитесь в отсутствии протечек воды. Медленно открывая кран «К1», наблюдайте прохождение воды в гидросистеме и наличие показаний расходомера «Р1».

2. Включите тумблеры Т1, Т2, Т3 на 90 градусов и тумблер «НАГРЕВ».

3. Включите тумблеры 400-800 на заданные преподавателем значения мощности нагрева. Провести измерения при примерных значениях электрической мощности нагревателя 400, 800, 1200 Вт.

4. После примерно 3 – 5 минут работы установки в режиме нагрева, когда показания термодатчиков Д1 – Д3 перестанут существенно меняться, необходимо произвести измерения значений (температуры, расхода, силы тока и напряжения).

5. Выключение установки производится в следующей последовательности: выключите тумблер «НАГРЕВ» и тумблеры «400», «800». Через 1 – 2 мин перекройте кран «К1» и выключите тумблер «ПОМПА 1».

## 5.5. Обработка результатов измерений

На первом этапе обработки результатов измерений следует определить объемный расход воды  $V$  через канал по значениям перепада давления на дросселирующей шайбе  $\Delta P$  (кПа):

$$V = k\sqrt{\Delta P - \Delta P_{\text{см}}}, \quad (5.5)$$

где  $k$  – калибровочный коэффициент, значения которого для диаметров дросселирующей шайбы 1,4 и 2,2 мм соответственно равны 2,04 и 5,39 мл/(с·кПа<sup>0,5</sup>),  $\Delta P_{\text{см}} = 0,08$  кПа – начальное смещение дав-

ления. Далее по падению напряжения  $U$  и току в нагревателе  $I$  определяется средняя тепловая нагрузка на опытном канале:

$$\bar{q} = \frac{U \cdot I}{\pi \cdot d \cdot l}. \quad (5.6)$$

По формуле (5.2) необходимо найти среднюю температуру жидкости  $\bar{t}_j$ . По данным измерений температуры стенки канала определяется средняя арифметическая температура стенки канала  $\bar{t}_{ст}$ . Далее рассчитывается средний температурный напор между теплоотдающей поверхностью и жидкостью  $\Delta\bar{t}$ :

$$\Delta\bar{t} = \bar{t}_{ст} - \bar{t}_j. \quad (5.7)$$

Затем находится определяющая температура  $\bar{t}$ , по которой из таблиц (см. Приложение) выбираются теплофизические свойства воды:

$$\bar{t} = \frac{1}{2}(\bar{t}_j + \bar{t}_{ст}). \quad (5.8)$$

Наконец, по формуле (5.1) определяется средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , и вычисляется число  $Nu$ , при определяющей температуре.

На третьем этапе расчетов полученные экспериментальные данные сравниваются с зависимостями Диттуса-Белтера (5.3) и Петухова-Кириллова (5.4). Для этого необходимо вычислить числа  $Re = ud/\nu$ , где  $u = 4V/\pi d^2$  – скорость течения воды в канале и число  $Pt$  при определяющей температуре  $\bar{t}$ , затем по зависимостям (5.3) и (5.4) рассчитываются числа  $Nu_p$  и коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_p$ , после расчета необходимо найти относительное отклонение полученных экспериментальных данных  $\Delta\alpha = (\alpha_s - \alpha_p) / \alpha_p, \%$ .

## 5.5. Оформление отчета

В отчете необходимо представить:

1. схему экспериментальной установки;
2. основные расчетные соотношения;
3. результаты измерений и расчетов, сведенных в таблицы: табл. 5.2 и 5.3;
4. оценку погрешности измерений;
5. графики зависимостей  $Nu_3(Re)$  и  $Nu_r(Re)$  для трех значений мощности нагрева.

Таблица 5.2

Результаты измерений								
$t_{\text{ствх}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ствых}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вых}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta P, \text{кПа}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$\bar{t}_{\text{ст}}, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_{\text{ж}}, ^\circ\text{C}$

Таблица 5.3

Результаты расчетов							
$q, \text{Вт/м}^2$	$\Delta \bar{t}, ^\circ\text{C}$	$V, \text{мл/с}$	Re	$\alpha_3, \text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$	$\alpha_p, \text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ (по ф-ле 5.3)	$\alpha_p, \text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ (по ф-ле 5.4)	$\Delta \alpha$

## Список литературы

1. Деев В.И. Теплопередача в ЯЭУ. М.: МИФИ 2004.
2. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. М.: Энергоатомиздат, 1990.

## Контрольные вопросы

1. Что такое средний коэффициент теплоотдачи?
2. Каковы принципы работы термометра сопротивления и реометра?
3. Какими причинами обусловлено различие между расчетными и экспериментальными значениями коэффициента теплоотдачи в данной работе?
4. Как влияют утечки тепла в окружающую среду на экспериментальное значение коэффициента теплоотдачи?

## Физические свойства воды при атмосферном давлении

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\text{Pr}$
20	998,2	4184,8	59,95	1,003	6,991
22	997,8	4183,5	60,29	0,956	6,624
24	997,3	4182,4	60,59	0,913	6,286
26	996,8	4181,5	60,91	0,873	5,974
28	996,2	4180,7	61,21	0,836	5,686
30	995,6	4180,0	61,50	0,801	5,419
32	995,0	4179,5	61,79	0,768	5,172
34	994,3	4179,1	62,06	0,738	4,942
36	993,7	4178,8	62,34	0,709	4,727
38	993,0	4178,6	62,60	0,683	4,527
40	992,3	4178,6	62,86	0,658	4,341
42	991,5	4178,6	63,11	0,635	4,166
44	990,6	4178,7	63,36	0,613	4,002
46	989,8	4178,9	63,60	0,592	3,848
48	988,9	4179,2	63,82	0,572	3,704
50	988,0	4179,6	64,05	0,553	3,568
52	987,2	4180,0	64,27	0,536	3,441
54	986,2	4180,6	64,48	0,519	3,320
56	985,2	4181,2	64,69	0,504	3,207
58	984,3	4182,0	64,89	0,489	3,099
60	983,2	4182,8	65,08	0,474	2,998
62	982,1	4183,7	65,27	0,461	2,902
64	981,1	4184,6	65,45	0,448	2,811
66	980,0	4185,7	65,63	0,436	2,724
68	978,9	4186,9	65,80	0,424	2,642
70	977,8	4188,1	65,96	0,413	2,565
72	976,7	4189,4	66,12	0,402	2,491
74	975,4	4190,8	66,27	0,392	2,420
76	974,3	4192,3	66,42	0,383	2,353
78	973,0	4193,9	66,56	0,373	2,290
80	971,8	4195,5	66,70	0,365	2,229

## Работа 6

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТЕПЛООБМЕННИКЕ «ТРУБА В ТРУБЕ»

**Цель:** экспериментальное определение величины коэффициента теплопередачи  $k$  для двух схем движения воды в теплообменнике типа «труба в трубе»: прямотока и противотока. Для двух выбранных режимов (прямоточный и противоточный), провести сравнение полученных коэффициентов теплопередачи с рассчитанными теоретическими значениями.

### 6.1. Понятие о коэффициенте теплопередачи

Процессы теплообмена в теплоэнергетическом оборудовании (паровые котлы, теплообменники и т.д.) описываются двумя основными уравнениями: уравнением теплового баланса и уравнением теплопередачи. Основное уравнение процесса теплопередачи в стационарном режиме можно описать соотношением:

$$Q = k\Delta t_{cp} F . \quad (6.1)$$

Здесь  $Q$  – передаваемый через стенку тепловой поток, Вт;  $\Delta t_{cp}$  – среднелогарифмический температурный напор;  $F$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К), который является важнейшей характеристикой теплообменного оборудования и определяет его эффективность и качество.

Величину передаваемого теплового потока  $Q$  от горячего теплоносителя к холодному можно определить, записав уравнение теплового баланса:

$$Q = Q_1 = Q_2 + Q_2^{\text{пот}} , \quad (6.2)$$

где  $Q_1$  – количество тепла, переданное от горячего теплоносителя в стенку,  $Q_2$  – количество тепла, полученное холодным теплоносителем от стенки,  $Q_2^{\text{пот}}$  – тепловые потери от наружной поверхности теплообменника в окружающую среду. Для определения вели-

чин  $Q_1$  и  $Q_2$  достаточно измерить расходы теплоносителей и их температуры на входе и выходе теплообменника:

$$Q_1 = \rho_1 V_1 c_{p1} (t_{11} - t_{12}), \quad (6.3)$$

$$Q_2 = \rho_2 V_2 c_{p2} (t_{21} - t_{22}), \quad (6.4)$$

где  $V_1, V_2$  – объемные расходы горячего и холодного теплоносителей;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности теплоносителей;  $c_{p1}$  и  $c_{p2}$  – удельные теплоемкости теплоносителей;  $t_{11}$  и  $t_{21}$  – температуры горячего и холодного теплоносителей на входе в теплообменник;  $t_{12}$  и  $t_{22}$  – температуры горячего и холодного теплоносителей на выходе из теплообменника.

## **6.2. Описание экспериментальной установки и методики измерений**

Схема установки и гидравлических соединений в режимах прямотока и противотока представлены на рис. 6.1 и 6.2.

Насос «ПОМПА 1» снабжает водой горячий контур теплообмена, обозначенный на панели модулей как «КАНАЛ 1». Вода поступает в помпу из БАКА, затем через штуцер П1, кран К1, реометр Р1 вода поступает в теплообменник «ЖИДКОСТЬ-ТРУБА». Подогрев воды в этом теплообменнике осуществляется при помощи тепловыделяющих элементов за счет джоулева нагрева с тремя возможными значениями подводимой мощности 400, 800 и 1200 Вт. В режиме прямотока температуры горячего теплоносителя на входе и выходе в теплообменник «ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ» измеряются датчиками Д6 и Д4, а противотока Д4 и Д6 соответственно. После прохождения теплообменника горячая вода через «СЛИВ 1» возвращается в БАК.

Насос «ПОМПА 2» снабжает водой холодный контур теплообмена, обозначенный на панели модулей как «КАНАЛ 2». Вода поступает в помпу из РЕЗЕРВУАРА, затем через штуцер П2, кран К2, реометр Р2 и датчик температуры Д7 вода поступает во внешнюю трубу теплообменника «ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ». Температура выходящей из теплообменника жидкости измеряется датчиком Д8.

Отработанная жидкость через «СЛИВ 2» возвращается в РЕЗЕРВУАР.

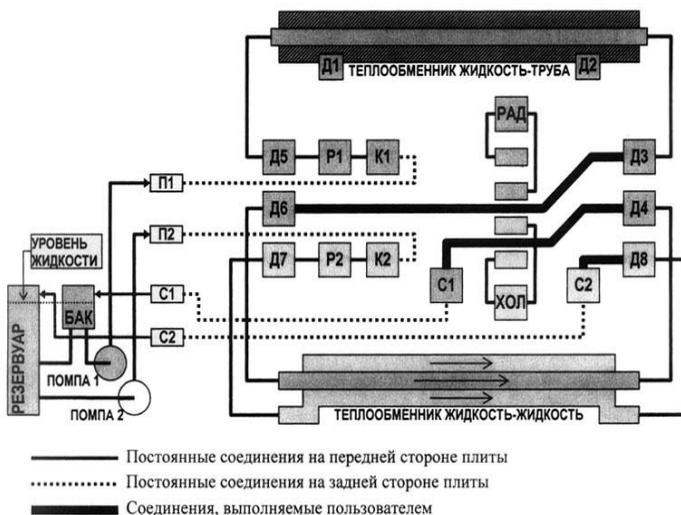


Рис. 6.1. Схема гидравлических соединений при однонаправленном течении жидкостей



Рис. 6.2. Схема гидравлических соединений при встречном течении жидкостей

Реометры P1 и P2 измеряют перепад давления на дросселирующих шайбах и дают отсчеты с разрешением 0,01 или 0,1 кПа. Разрешение устанавливается тумблером «кПа» на передней панели установки. В положении «0,01» разрешение соответствует 0,01 кПа, а в положении «0,1» – 0,1 кПа. Показания перепада давления выводятся на цифровой дисплей панели установки. Основным элементом дросселя являются откалиброванные отверстия в валу диаметрами 1,4 и 2,2 мм. На рукоятки вала нанесены две риски: широкая риска параллельно оси большого отверстия и узкая риска параллельно оси отверстия меньшего диаметра.

Блоки кранов K1 и K2 обеспечивают плавную регулировку расхода жидкости в горячем и холодном контурах.

Основные параметры установки и геометрические размеры теплообменника представлены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Основные параметры установки и геометрические размеры теплообменника

Параметр		Значение или диапазон значений
Допустимые значения мощности		400, 800, 1200 Вт
Допустимые значения расхода в каналах		3 – 75 мл/с
Допустимый диапазон температур		20 – 90 °С
<b>Параметры теплообменника «Жидкость-Жидкость»</b>		
Длина общей части труб, мм		360 мм
Внутренний диаметр внутренней трубы $d_1$ , мм		4,0 мм
Наружный диаметр внутренней трубы $d_2$ , мм		6,0 мм
Внутренний диаметр наружной трубы $d_3$ , мм		13,0 мм
Наружный диаметр наружной трубы $d_4$ , мм		15,0 мм
Калиброванные отверстия в валу дросселя, мм		1,4 / 2,2 мм
Диапазон измерений манометров, кПа		1 – 50 кПа
Начальное смещение давления $P_{см}$ , кПа		0,08 кПа
Калибровочный коэффициент $k$ , мл/с·(кПа) <sup>0,5</sup>		
Канал 1	1,4 мм	$k = 2,04$
	2,2 мм	$k = 5,39$
Канал 2	1,4 мм	$k = 2,11$
	2,2 мм	$k = 5,00$

Возможные виды измерений:

1. Мощность нагревателя, Вт
2. Сила тока, А
3. Напряжение, В
4. Давление в дросселе, кПа
5. Температура, °С

Объем резервуара с водой – 50 л.

На переднюю панель установки вынесены следующие элементы схемы и органы управления (рис.5.2, работа 5):

«СЕТЬ» – тумблер включения сети.

«ТОК/НАПРЯЖЕНИЕ/ДАВЛЕНИЕ» – 4-разрядный цифровой дисплей. Его свечение свидетельствует о включении питания прибора. Интерпретация показаний определяется положением рукоятки переключателя:

«I» – ток питания нагревателя в амперах с разрешением 0,01 А;

«U» – напряжение питания нагревателя в вольтах с разрешением 1 В;

«P1 – P4» – давление в датчиках давления в кПа.

Разрешение манометров устанавливается тумблером «кПа». В положении «0,01» разрешение манометров равно 0,01 кПа, в положении «0,1» разрешение равно 0,1 кПа.

**ВНИМАНИЕ!** При измерении токов и напряжений тумблер «кПа» должен быть в положении «0,01»!

«ТЕМПЕРАТУРА» – 4-разрядный цифровой дисплей 8-канального термометра. На дисплей выводится температура T1 – T8 соответственно одного из датчиков температуры D1 – D8, выбранного переключателем входов термометра. Точность измерения температуры составляет 0,1 °С.

«T1 – T8» – переключатель входов термометра.

«ПОМПА 1» – тумблер включения «Помпы 1» насосной станции.

«НАГРЕВ» – тумблер включения питания нагревателей.

«400», «800» – тумблеры установки мощности нагревателя.

«ПОМПА 2» – тумблер включения «Помпы 2» насосной станции.

«T1 – T3» – установка максимальных температур датчиков

Д1 – Д3 в диапазоне 30 – 90 °С

«Т4» – установка минимальной температуры датчика Д4 в диапазоне 10 – 40 °С.

### 6.3. Подготовка установки к работе

**Внимание!** Включать установку разрешается только в присутствии преподавателя или лаборанта!

1. Проверить уровень воды в резервуаре. Резервуар должен быть заполнен не менее, чем на 3/4 своего объема;

2. Проверить все гидравлические соединения и замкнутость контура установки: в режиме прямотока Д3 – Д6, Д4 – С1 и Д8 – С2 (рис. 6.1); в режиме противотока Д3 – Д4, Д6 – С1, Д8 – С2 (рис. 6.2);

3. Проверить включение насосных помп в сеть и соединения их с контуром установки;

4. Проверить работоспособность основных элементов и блоков лабораторного комплекса:

реометры – в положении Р1 и Р2 показывают значения, не превышающее 0,08 кПа;

термометры – во всех положениях тумблера Т1 – Т8 на передней панели установки цифровой дисплей показывает значения температур, близких к комнатному значению.

**ВНИМАНИЕ!** Запрещается включать блок нагревателей при отключенных или неисправных датчиках температуры.

Блок нагревателей – при включении тумблера «НАГРЕВ» и одновременно одного или нескольких тумблеров подачи мощности нагревателя «400» и «800» в положении «I1» переключателя видов измерений цифровое табло показывает наличие тока нагрева, при этом температуры, показываемые датчиками Д1 и Д2 начинают расти;

**ВНИМАНИЕ!** Прибор показывает верные значения токов и напряжений в нагревателе, только если переключатель диапазонов манометров стоит в положении «0,01».

Блок реле ограничителей температур «Т1 – Т4» должен срабатывать при достижении датчиками температур Д1 – Д3 значений, которые установлены регуляторами «Т1-Т3» блока реле. При этом происходит отключение питания нагревателя и на панели загораются красные индикаторы.

5. Терморегуляторы Т1 – Т3 необходимо выставить на максимальное значение 90 °С. При выполнении работы необходимо следить за тем, чтобы блок нагревателей был постоянно включен (при этом должны гореть зеленые индикаторы терморегуляторов).

## **6.4. Порядок выполнения работы**

1. Закройте кран К1 канала 1 (сильно не затягивать!). Установите режим измерения «Р1» (расход жидкости в канале 1). Включите тумблер «ПОМПА 1». Убедитесь в отсутствии протечек воды. Медленно открывая кран К1, наблюдайте прохождение воды в гидросистеме и наличие показаний расходомера Р1.

2. Закройте кран К2 канала 2 (сильно не затягивать!). Установите режим измерения «Р2» (расход жидкости в канале 2). Включите тумблер «ПОМПА 2». Убедитесь в отсутствии протечек воды. Медленно открывая кран К2, наблюдайте прохождение воды в гидросистеме и наличие показаний расходомера Р2.

3. Установите тумблеры Т1 – Т3 в положение 90 °С и включите тумблер «НАГРЕВ».

4. Включите тумблеры 400-800 на заданные преподавателем значения мощности нагрева. Провести измерения при примерных значениях электрической мощности нагревателя 400, 800, 1200 Вт.

5. После примерно 3 – 5 мин работы установки в режиме нагрева, когда показания термодатчиков Д1 – Д3 перестанут существенно меняться, необходимо произвести измерения значений (температуры, расхода, силы тока и напряжения).

6. Выключение установки производится в следующей последовательности: выключите тумблер «НАГРЕВ» и тумблеры «400», «800». Через 1 – 2 мин перекройте краны «К1», «К2» и выключите тумблер «ПОМПА 1» и тумблер «ПОМПА 2».

## 6.5. Обработка результатов экспериментов

На первом этапе обработки экспериментальных данных необходимо найти определяющие температуры горячего и холодного теплоносителей в теплообменнике:

$$\bar{t}_{\text{гор}} = \frac{1}{2}(t_{11} + t_{12}), \quad \bar{t}_{\text{хол}} = \frac{1}{2}(t_{21} + t_{22}). \quad (6.5)$$

Затем по таблицам свойств воды при атмосферном давлении (см. Приложение) для заданных определяющих температурах найти теплофизические свойства воды ( $\rho_1, \rho_2, c_{p1}, c_{p2}$ ). Объемные расходы воды горячего  $V_1$  и холодного теплоносителей  $V_2$  через каналы 1 и 2 находятся по значениям перепада давления на дросселирующих шайбах  $\Delta P$  (кПа):

$$V_i = k_i \sqrt{\Delta P_i - \Delta P_{\text{см}}}, \quad (i=1,2). \quad (6.6)$$

Значения коэффициентов  $k_i$  представлены в табл. 6.1,  $\Delta P_{\text{см}} = 0,08$  кПа.

Далее по формулам (6.3) и (6.4) находятся экспериментальные значения тепловых потоков  $Q_{1з}, Q_{2з}$  и по формуле (6.2) определяется  $Q_{2з}^{\text{пот}}$ . На следующем этапе рассчитывается среднелогарифмический температурный напор  $\Delta t_{\text{cp}}$ :

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}, \quad (6.7)$$

где  $\Delta t_{\text{б}}$  – больший из крайних температурный напор;  $\Delta t_{\text{м}}$  – меньший. Под крайними понимаются напоры на входе в теплообменник и выходе из него. Если выполняется соотношение  $\Delta t_{\text{м}}/\Delta t_{\text{б}} > 0,6$ , то средний температурный напор можно рассчитывать как средний арифметический  $\Delta t_{\text{cp}} = 0,5 \cdot (\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}})$ , при этом отличие от средне-

логарифмического не превышает 3 %. Площадь теплопередающей поверхности определяется по формуле:  $F = \pi \cdot d_2 \cdot l$

На следующем этапе обработки экспериментальных данных по формуле (6.1) находятся значения коэффициентов теплопередачи  $k_3$  и проводится сравнение с расчетной величиной  $k_p$ . Расчетное значение коэффициента теплопередачи  $k_p$  определяется по формуле:

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} \cdot \frac{d_2}{d_{cp}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (6.8)$$

где  $\delta = 0,5 \cdot (d_2 - d_1)$  – толщина стенки,  $d_{cp}$  – средний диаметр трубы, равный  $0,5 \cdot (d_2 + d_1)$ ,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стенки трубы, равный 20 Вт/(м·К).

Значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1$  (от горячего теплоносителя к внутренней трубе) и  $\alpha_2$  (от внутренней трубы к холодному теплоносителю) определяются по формуле Диттуса – Белтера, которая может быть рекомендована для определения коэффициента теплоотдачи при числах  $Pr$  ( $0,5 \leq Pr \leq 2,5$ ) и  $Re$  ( $10^3 \leq Re \leq 10^6$ )

$$Nu_p = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}. \quad (6.9)$$

В числах  $Nu_p = \alpha d / \lambda_{ж}$  и  $Re = ud / \nu$ , в качестве характерного размера при расчете  $\alpha_1$  выбирается внутренний диаметр внутренней трубы  $d_1$ , скорость теплоносителя  $u_1 = 4V_1 / \pi d_1^2$ . При расчете  $\alpha_2$  характерный размер  $d = d_3 - d_2$ , скорость течения воды в канале  $u_2 = 4V_2 / (\pi d_3^2 - \pi d_2^2)$ . Теплофизические свойства воды числа  $Pr$  выбираются (см. Приложение) при соответствующих определяющих температурах  $\bar{t}_{гор}$  и  $\bar{t}_{хол}$ .

После расчета коэффициента теплопередачи  $k_p$  следует найти относительное отклонение полученных экспериментальных данных от расчетных  $\Delta k = (k_3 - k_p) / k_p, \%$ .

## 6.6. Оформление отчета

В отчете необходимо представить:

1. схему экспериментальной установки;
2. основные расчетные соотношения;
3. результаты измерений и расчетов, сведенные в таблицы табл. 6.2 и 6.3;
4. оценку погрешности проведенных измерений.

Таблица 6.2

$\Delta P_1$ , КПа	$t_1$ , °C	$t_{12}$ , °C	$V_1$ , м <sup>3</sup> /с	$Q_1$ , Вт	$t_{21}$ , °C	$t_{22}$ , °C	$\Delta P_2$ , КПа	$V_2$ , м <sup>3</sup> /с	$Q_2$ , Вт	$\Delta t_{ср}$ , °C	$k_3$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
	С										

Таблица 6.3

$\bar{t}_{гор}$ , °C	Pr <sub>1</sub>	Re <sub>1</sub>	Nu <sub>p1</sub>	$\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\bar{t}_{хол}$ , °C	Pr <sub>2</sub>	Re <sub>2</sub>	Nu <sub>p2</sub>	$\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$k_p$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\Delta k$

## Список литературы

1. Деев В.И. Теплопередача в ЯЭУ. М.: МИФИ 2004.
2. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Осипова В.А. Экспериментальные исследования процессов теплообмена. М., 1979.

## Контрольные вопросы

1. Что характеризует коэффициент теплопередачи?
2. Что такое среднелогарифмический температурный напор?
3. Какими факторами определяются утечки тепла?
4. Какими основными причинами определяется погрешность между расчетным значением коэффициента теплопередачи и экспериментальным значением?

---

## Часть 2. Теплофизические измерения в ЯЭУ

---

### 2.1. Особенности измерений в реакторных условиях

Сложность диагностики ЯЭУ определяется такими факторами, как одновременное протекание различных по природе физических процессов в активной зоне, взаимосвязанность большинства основных процессов, имеющих стохастический характер, сложность доступа к основным узлам и оборудованию, а также условиями эксплуатации реакторной установки.

Главной особенностью реакторных измерений является воздействие излучений на работу датчиков. Радиационные повреждения в материалах могут оказывать существенное влияние на проявление физических свойств и законов, которыми определяется принцип действия датчиков, приводить к изменению их конструктивных характеристик и режимов эксплуатации. Поскольку полностью устранить радиационные эффекты не удастся практически никогда, одним из важнейших требований к реакторному контролю является предложенный В.И. Субботиным принцип [1]: «Контроль каждого из определяющих устойчивую работу ЯЭУ параметров должен осуществляться датчиками, действие которых основано на двух или более различных физических принципах».

При регулировании реактора допускается изменение нагрузки блока с ограниченной скоростью (не более 3÷5 процентов в минуту для реакторов ВВЭР [2]). Однако, поскольку происходящий в активной зоне процесс преобразования ядерной энергии в тепловую характеризуется очень малыми временами, детекторы системы управления и защиты реактора должны обладать высоким быстродействием и быть рассчитаны на работу в предаварийных ситуациях.

Высокая теплонапряженность и гетерогенная структура активной зоны определяют сильную неоднородность температурных полей. Поэтому датчики реакторного контроля должны выдерживать высокие уровни и большие градиенты температур [3]. Эффективность контроля возрастает в случае размещения датчиков в наиболее напряженных узлах элементов активной зоны.

Присутствие в активной зоне большинства элементов Периодической системы Менделеева, сложный изотопный состав создают жесткий химический режим функционирования датчиков. Наряду с внешними воздействиями на оболочку датчика возможно протекание химических процессов и во внутренних структурных элементах детектора.

Взаимодействие нейтронов, гамма квантов и заряженных частиц с материалами датчиков и линий связи создает в них большое количество свободных электронов и положительно заряженных зон. Перетечка электронов между зонами приводит к генерации паразитных токов и напряжений, влияющих на работу электрических цепей.

Проведение измерений в активной зоне осложняется невозможностью оперативного исправления дефектов, возникающих в процессе работы датчиков. Сроки замены неисправных детекторов, как правило, определяются регламентом работы реактора и могут быть весьма продолжительными. Поэтому ресурс работы датчиков должен обеспечивать их высокие метрологические характеристики (точность, быстродействие, воспроизводимость показаний и т.п.) по крайней мере, в период между перегрузками реактора. Кроме того, датчики не должны вносить локальных искажений рабочих параметров, как в рабочем состоянии, так и в случае выхода их из строя.

## **2.2. Роль теплофизических методов в контроле ядерного реактора**

Основная часть энергии деления выделяется в активной зоне реактора в виде тепла (~ 85 %). Близки между собой, хотя принципиально не идентичны и пространственно-временные распределения полей энерговыделения и тепловыделения. Применительно к активной зоне понятие «энерговыделение» характеризует полную мощность источников ядерной энергии (включая и не преобразуемые в тепло виды, например, энергию антинейтрино), а понятие «тепловыделение» определяет используемую часть энергии деления. Оно отражает эффективность преобразования ядерной энергии в тепловую. Известные технические средства не позволяют определить тепловыделение в реакторе путем «прямых» измерений (в ли-

температуре [4-7] «прямым» называют способ определения тепловыделения в реакторе по подогреву теплоносителя). Величина тепловыделения может быть непосредственно определена только по измеренным значениям подогрева, расхода и параметров теплоносителя с помощью первого начала термодинамики. Косвенно тепловыделение и его распределение по объему активной зоны определяют путем измерения энергии и выхода продуктов реакции деления при соответствующей нормировке детекторов энерговыделения.

Для определения тепловыделения и энерговыработки ЯЭУ наряду с тепловыми нашли нейтронные и гамма-методы, активационные, радиохимические и нейтринные методы. Некоторые методики используют различные комбинации этих методов. Однако тепловым методам контроля принадлежит особая роль.

Только теплофизические методы контроля дают возможность определять абсолютные величины полной мощности реактора и ее составляющих (мощности петель, ТВС). Поэтому теплофизические методы используются в качестве эталонных для градуировки и абсолютной калибровки средств измерений другими методами [9-12].

Главный недостаток теплофизических методов – их инерционность. Скорости протекания ядерных процессов на несколько порядков превышают скорости передачи тепла теплоносителю. Поэтому теплофизические методы непригодны для контроля быстропротекающих процессов. Кроме того, эти методы малочувствительны за пределами энергетического диапазона изменения мощности реактора.

## **2.3. Теплотехнические датчики**

### **2.3.1. Датчики теплотехнического контроля параметров первого и второго контуров**

Теплотехническим способом энерговыделение в ТВС (петле реактора или по всему объему активной зоны) определяется по подогреву теплоносителя из уравнения теплового баланса:

$$W = G(i_{\text{ввых}} - i_{\text{вх}}), \quad (1)$$

где  $G$  – расход;  $i_{\text{вых}}$ ,  $i_{\text{вх}}$  – энтальпии теплоносителя на входе и выходе из данной ТВС (петли реактора или всей активной зоны). Энтальпия теплоносителя определяется в соответствии с показаниями датчиков температуры и давления (для однофазного теплоносителя), а также паросодержания (в случае кипящего теплоносителя). Поскольку подогревы теплоносителя, особенно на малых уровнях мощности невелики, к точности измерения температуры предъявляются высокие требования.

В качестве датчиков температуры в пределах активной зоны используют термоэлектрические преобразователи (ТЭП) главным образом двух типов: хромель - алюмель и вольфрам - рений. Погрешность измерения температуры с помощью ТЭП, расположенных в активной зоне, может достигать величины 4 % от подогрева теплоносителя. Поэтому для измерения температуры за пределами активной зоны используют термопреобразователи сопротивления (например, платиновые), точность измерения которыми существенно выше по сравнению с ТЭП. Ошибка в определении температуры с помощью термопреобразователей сопротивления составляет 0,02 – 0,005 °С.

### 2.3.2. Датчики для внутризонных измерений температуры

Термопреобразователи хромель-алюмель (ХА) нашли применение в области температур до 900 °С, а вольфрам-рений – до 2200 °С [8]. Конструктивно ТЭП представляют собой тонкостенную трубку небольшого диаметра, внутри которой помещены термоэлектроды, изолированные друг от друга и внешней оболочки. Трубка с термоэлектродами образует кабель. Поэтому такие ТЭП часто называют кабельными. Их главные достоинства – удобство монтажа, механическая прочность и химическая стойкость. Кабельные ТЭП изготавливаются в нескольких исполнениях:

- однозонные и многозонные (до семи зон);
- в стальной и жаропрочной оболочке;
- с изолированным рабочим спаем и неизолированным;
- круглого постоянного сечения или с уплощением (утоплением) рабочего участка.

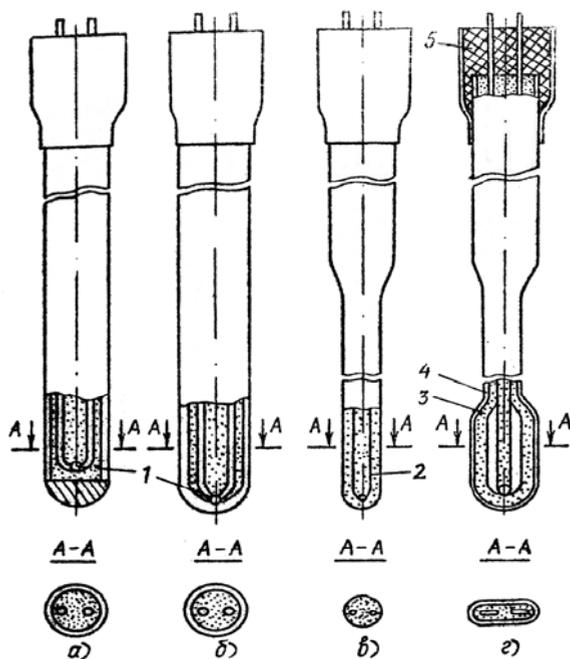


Рис. 1. Схемы однозонных ТЭП для измерения средних температур: а – с изолированным спаем; б – с неизолрированным, в – с тонким рабочим концом; г – с уплощенным; 1 – спай; 2 – термоэлектроды; 3 – изоляция; 4 – оболочка; 5 – герметизация выводов

На рис. 1 представлены схемы однозонных ТЭП для измерения средних температур, а на рис. 2 - схема высокотемпературного ТЭП. Термопреобразователи для средних температур имеют изоляцию их  $Al_2O_3$  и  $MgO$ . В высокотемпературных ТЭП в качестве изоляции используется соломка из  $BeO$ .

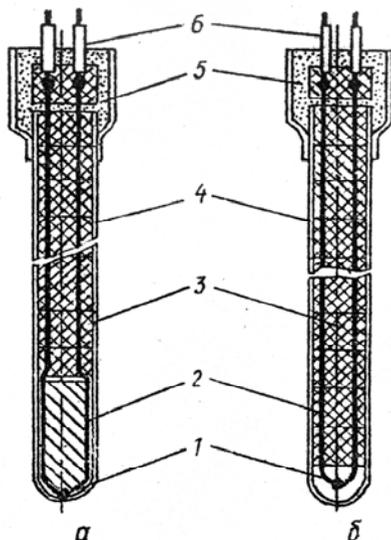


Рис. 2. Схема высокотемпературного ТЭП: а – с неизолрованным рабочим спаем; б – с изолированным; 1 – спай; 2 – термоэлектроды; 3 – изоляция; 4 – оболочка; 5 – герметик; 6 – выводы термоэлектродов

Помимо стандартных ТЭП могут использоваться и нестандартные. Минимальный диаметр однозонного ТЭП (так называемой микротермопары) составляет 0,1 мм. На рис. 3 показаны сечение микротермопары и соотношение размеров оболочки, электродов и изоляции.

Точность и инерционность измерения температуры во многом определяются способом крепления рабочего спая ТЭП к контролируемому объекту. Для обеспечения хорошего теплового контакта используются различные способы крепления (заделка в дистанцирующее или искусственное ребро, заделка с углублением в поверхность, крепление с помощью хомута, прижима или пайки) [3].

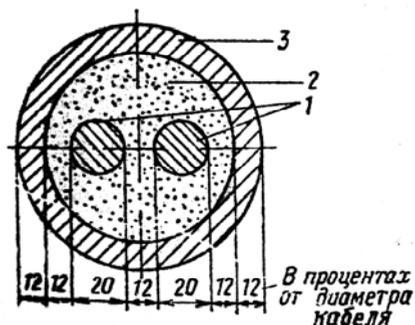


Рис. 3. Сечение микротермопары: 1 – термоэлектроды; 2 – изоляция; 3 – оболочка

### 2.3.3. Датчики температуры для внезонных измерений в первом контуре

За пределами активной зоны наряду с ТЭП могут использоваться термопреобразователи сопротивления (ТПС) из чистых металлов. Наибольшее распространение на АЭС получили платиновые ТПС.

Конструкция платинового термометра показана на рис. 4. Чувствительный элемент термометра выполнен из тонкой ( $D = 0,5$  мм) платиновой проволоки высокой чистоты, намотанной бифилярно на каркас из слюды. Чувствительный элемент помещается в корпус, пространство в котором заполняется теплообменным газом (обычно гелий). Размеры чувствительного элемента достаточно велики, что не позволяет проводить локальных измерений температуры. По сравнению с ТЭП у ТПС большая инерционность измерений, более существенный разогрев чувствительного элемента под влиянием разогрева. Для ТПС требуется специальный источник питания. Однако возможность измерения температур в диапазоне от 0 до 600 °С с погрешностью  $\pm 005$  °С делают платиновые термометры незаменимыми для определения подогрева теплоносителя в первом контуре.

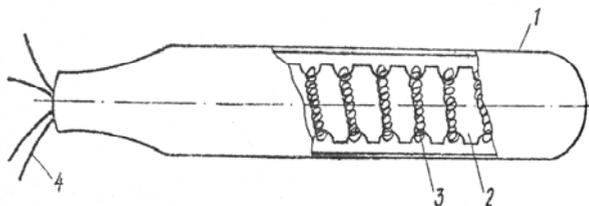


Рис. 4. Платиновый термометр сопротивления: 1 – корпус; 2 – каркас; 3 – платиновая проволока; 4 – токовые и потенциальные выводы

## 2.4. Определение давления и расхода

Для измерения давления теплоносителя используются мембранные и пружинные манометры класса 1,0. Принцип действия манометров основан на преобразовании перемещения чувствительного элемента под действием измеряемого давления в унифицированный токовый сигнал. Так, в используемых в реакторах ВВЭР-1000 датчиках типа «Сапфир» [12] перемещение мембраны с помощью терморезисторов преобразуется в нормированный электрический сигнал (0 – 5 мА).

Часто применяемый в энергетике метод определения расхода по перепаду давления на сужающем устройстве (сопло, диафрагма), измеряемому дифференциальным манометром, дает погрешность около 2 – 2,5 %. Однако его использование для измерения расхода в первом контуре связано с рядом затруднений (отсутствие прямых участков трубопровода достаточной длины, необходимость специальной тарировки). В некоторых типах реакторов расход в первом контуре определяют по перепаду давления на ГЦН в соответствии с его паспортными характеристиками.

Вышеизложенные трудности вынуждают определять тепловую мощность реактора методом обратного баланса по теплоносителю второго контура (или третьего на быстрых реакторах). Естественно, что для определения мощности реактора по параметрам второго контура необходимы поправки, учитывающие потери тепла в первом контуре и парогенераторе.

## 2.5. Калориметры

Измерение поглощенной энергии калориметрическим способом в ядерных реакторах основано на том, что практически вся энергия излучения, переданная облучаемому веществу, превращается в тепло. Хотя в дозиметрии больших доз стандартизация измерительных методов не принята, калориметрический метод часто используют [10] в качестве первичного стандарта.

В основе действия калориметра лежит связь объемного тепловыделения в образце с изменением его температуры, задаваемая законом сохранения энергии. Уравнение теплопроводности для «тонких объемов» имеет вид

$$\rho C_p V \frac{\partial t}{\partial \tau} = q_v V - \alpha F(t - t_c), \quad (2)$$

где  $t$  – температура образца,  $t_c$  – температура охлаждающей среды;  $V$ ,  $F$  – соответственно объем и площадь теплопередающей поверхности образца;  $q_v$  – мощность внутренних источников тепловыделения в образце. Решение уравнения (2) для образца, который в начальный момент времени имел температуру  $t_0$  и был мгновенно помещен в среду с температурой  $t_c$  дает выражение

$$t - t_c = (t_0 - t_c) \cdot \exp\left(-\frac{\alpha F \tau}{\rho C_p V}\right), \quad (3)$$

соответствующее кинетическому методу реакторной калориметрии, который заключается в регистрации кинетики нагрева и охлаждения образца при наличии теплообмена на его поверхности. Если тепло, генерируемое в образце, не рассеивается в окружающую среду ( $\alpha \rightarrow 0$ ), реализуется адиабатический метод. В этом случае температура образца линейно возрастает во времени:

$$t - t_0 = \frac{q_v}{\rho C_p} \tau, \quad (4)$$

причем скорость возрастания температуры пропорциональна поглощенной в образце мощности.

В экспериментах на реакторе также используют стационарный изометрический метод калориметрии, который предусматривает наличие внешней оболочки калориметра с постоянной температурой. В этом случае решением уравнения (2) является выражение

$$t - t_c = \frac{q_v V}{\alpha F}. \quad (5)$$

В зависимости от условий теплообмена между поверхностью образца и оболочкой различают вакуумный, газовый и твердотельный калориметры, в которых величина коэффициента теплоотдачи определяется по законам теплового излучения, естественной конвекции и теплопроводности.

Существует большое разнообразие типов и конструкций калориметров, используемых в реакторах, что обусловлено разнообразием размеров и устройств экспериментальных каналов, диапазонов интенсивности излучения, видов исследуемых материалов. По виду регистрируемого излучения различают нейтронные и  $\gamma$ -чувствительные калориметры. Для первых в качестве материала рабочего образца используют сплавы с делящимся веществом, для вторых – металлы с большим сечением поглощения  $\gamma$ -квантов и малыми сечениями поглощения и рассеяния нейтронов.

Рассмотрим конструкцию калориметра, который может обеспечивать проведение измерений несколькими способами [14]. Конструкция калориметра приведена на рис. 5. Корпус калориметра состоит из тонкостенной трубы из нержавеющей стали ( $\varnothing 10 \times 0,35$  мм). Длина корпуса в зависимости от размеров используемых образцов может находиться в пределах от 200 до 400 мм. Нижний конец корпуса загерметизирован, верхний герметично соединен с подвеской. Подвеска представляет собой полую трубу, через которую выводятся все термопарные провода и кабели электронагревателя. Подвеска с калориметром может быть установлена в охлаждаемый водой переносной канал, который в свою очередь можно помещать в любой экспериментальный канал реактора, где требуется измерение энерговыделения. Симметрично относительно средней плоскости корпуса калориметра располагаются

два образца: верхний – рабочий образец и нижний – образец-свидетель. При измерениях высотное положение калориметра выбирают таким образом, чтобы энерговыделение в обоих образцах было одинаковым.

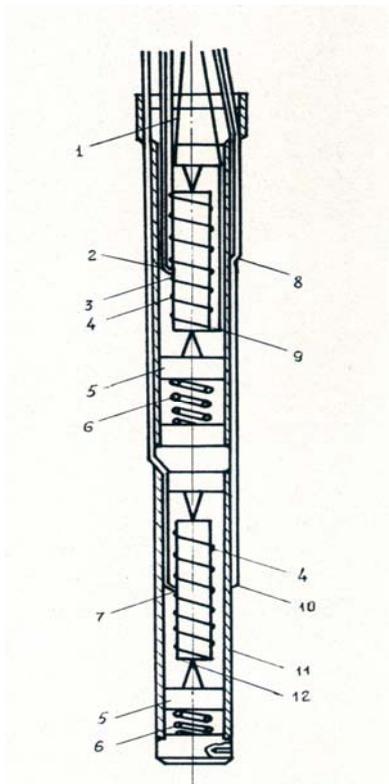


Рис. 5. Конструкция калориметра [14]: 1 – проводник; 2,7,8,9,10 – микротермопары; 3 – рабочий образец; 4 – нагреватель; 5 – игольчатая опора; 6 – пружина; 11 – корпус калориметра; 12 – образец-свидетель

Для измерения торцевых утечек тепла образцы укреплены на торцевых опорах. Для компенсации термических напряжений опоры фиксируются пружинами. На боковой поверхности рабочего образца навит электронагреватель. Образец-свидетель не должен иметь нагревателя, но, чтобы он полностью соответствовал рабочему образцу, на нем также сделана аналогичная обмотка. Температура измеряется микротермопарами. Микротермопары, изме-

ряющие температуры боковых поверхностей, зачеканены в средних сечениях образцов. В тех же сечениях калориметра укреплены микротермопары, измеряющие температуру корпуса. Одна термопара зачеканена в нижнем торце рабочего образца для измерения торцевой утечки тепла.

Рассмотренная конструкция позволяет использовать различные методы реакторной калориметрии. При резком внесении калориметра в активную зону реализуется адиабатический метод. Этот метод целесообразно использовать при низких уровнях энерговыделения, например, при измерении энерговыделения на остановленном реакторе. Погрешности измерения рассматриваемым методом обусловлены конечной скоростью перемещения образца и отсутствием теплового равновесия между калориметрическим устройством и средой в канале.

Стационарный изотермический способ реализуется при фиксированном положении калориметра в канале реактора, работающего на стационарном уровне мощности. Погрешность измерения обусловлена точностью определения величины  $\alpha$  в соотношении (5) и утечек тепла с торцов образца.

Наличие в калориметре идентичных обогреваемого образца и образца-свидетеля позволяет использовать абсолютное значение мощности электрического нагревателя для градуировки калориметра и повышения точности определения объемного энерговыделения. Так, например, при подаче известной электрической мощности  $W_3$  на нагреватель рабочего образца, разность температур между поверхностью образца и корпусом  $\Delta t_{06}$  возрастает на величину

$$\delta(\Delta t_{06}) = \frac{W}{F\alpha}. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет определить величину коэффициента теплоотдачи и по синхронно измеряемой разности температур образца-свидетеля и корпуса  $\Delta t_c$  найти искомую мощность внутренних источников тепловыделения:

$$q_v = \frac{W_3}{V} \cdot \frac{\Delta t_c}{\delta(\Delta t_{06})}. \quad (7)$$

Погрешность этого метода составляет 2 – 3 %.

## **2.6. Комплексное использование тепловых методов**

Контроль и измерения в ЯЭУ осуществляются с одновременным использованием различных физических методов. В ряде случаев теплофизические методы используются во взаимодействии со способами, основанными на других физических принципах.

На рис. 6 представлена схема измерительного зонда РУ АСТ-500, который включает:

- шесть детекторов прямого заряда с родиевыми эмиттерами, равномерно размещенных по высоте активной зоны;
- четыре термопары хромель-алюмель (одна термопара – для измерения температуры теплоносителя в индивидуальном тяговом участке на расстоянии (1,5 – 2) метра от верхнего края активной зоны, одна термопара – для измерения температуры на входе в активную зону, две термопары – для измерения скорости теплоносителя);
- медный термометр сопротивления – для измерения температуры свободных концов термопар;
- индукционный датчик – для измерения числа оборотов турбинки;
- калибровочный канал, в который помещаются активационные детекторы.

Представленный измерительный зонд позволяет проводить измерения параметров реактора с комплексным использованием различных физических методов контроля.

Для определения абсолютной мощности используется измерение подогрева теплоносителя, которое осуществляется с помощью термопар и термометра сопротивления. Абсолютное значение температуры теплоносителя определяется с помощью термометра сопротивления, перепад температур – с помощью первой и последней термопар (по ходу движения теплоносителя).

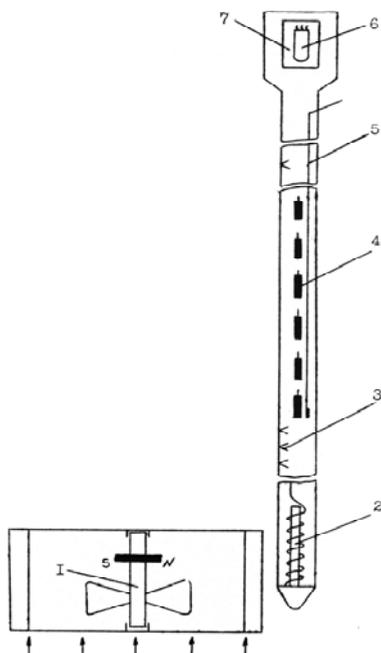


Рис. 6. Измерительный зонд РУ АСТ-500 [15]: 1 – турбинка; 2 – магнитопровод; 3 – чувствительный элемент магнитного расходомера; 4 – термопара; 5 – ДПЗ; 6 – калибровочный канал; 7 – термометр сопротивления; 8 – термостат

Близко расположенные относительно друг друга вторая и третья термопары используются для измерения расхода корреляционным методом [16]. Для тарировки корреляционных датчиков непосредственно в реакторных условиях используется турбинный расходомер. Ресурс работы турбинного расходомера ограничен свойствами подшипников ротора и составляет около 700 ч. Поэтому он используется только в начальный момент работы зонда.

Определенная по подогреву теплоносителя абсолютная величина тепловой мощности позволяет, в свою очередь, оттарировать показания детекторов прямого заряда и получить распределение тепловой мощности по высоте. Радиальное распределение получа-

ется за счет использования 19 зондов симметрично размещенных по сечению активной зоны.

Как уже отмечалось выше, измерения подогрева теплоносителя в первом контуре используются при нормировке показаний штатных датчиков измерения мощности, основанных на других физических принципах (ионизационных камер, расположенных за пределами активной зоны, детекторов прямого заряда и активационных индикаторов, размещенных внутри зоны) [17].

Данные по величине тепловой мощности, получаемые при измерении подогрева теплоносителя незаменимы и при использовании перспективных методов контроля мощности по нейтринному излучению [9] и радиационного метода измерения расхода [13] по спаду  $\gamma$ -активности теплоносителя в первом контуре за пределами активной зоны.

## **Контрольные вопросы и задания**

1. Перечислите основные факторы, оказывающие влияние на работу датчиков в реакторных условиях.

2. Сформулируйте использование теплофизических методов контроля для:

- а) измерения абсолютных величин тепловыделения;
- б) нахождения пространственного распределения тепловыделения по объему активной зоны;
- в) определения энерговыработки реактора;
- г) оперативного управления и защиты реактора.

3. Охарактеризуйте возможности термодатчиков, используемых в реакторных условиях (диапазон измеряемых температур, погрешность, инерционность).

4. Какие особенности конструкций ТЭП позволяет уменьшить их инерционность и погрешность?

5. В чем могут заключаться отличия в тарировке внутриреакторных и внереакторных термодатчиков?

6. Каким образом влияет погрешность измерения давления в первом контуре на точность определения тепловой мощности и энерговыработки реактора?

7. Оцените длину трубопровода первого контура, необходимую для использования классических методов измерения расхода

по перепаду давления на сужающем устройстве (например, диафрагма).

8. Какие физические параметры измеряются, а какие рассчитываются при использовании калориметра?

9. В чем отличия различных методов реакторной калориметрии?

10. Какие датчики используются для измерения расхода в измерительном зонде для РУ АСТ-500?

11. Можно ли с помощью измерительного зонда АСТ-500 определить высотное распределение тепловыделения?

12. Как используются результаты теплофизических измерений при обработке показаний нейтронных и  $\gamma$ -датчиков?

## Список литературы

1. Датчики реакторного контроля в ядерной энергетике. / В.И.Субботин, В.В.Архипов, В.И.Авдонин, А.Ю.Цыганов. // Проблемы реакторной теплофизики. М.: Энергоатомиздат, 1989. С.5-8.

2. Овчинников Ф.Я., Семенов В.В. Эксплуатационные режимы водоводяных энергетических ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1988.

3. Лысиков Б.В., Прозоров В.К. Термометрия и расходометрия ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1985.

4. Ломакин С.С. Ядерно-физические методы диагностики и контроля активных зон реакторов АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1983.

5. Попов А.Ф. Теплотехнический контроль на атомных электростанциях. М.: Энергоатомиздат, 1986.

6. Тепловыделение в ядерном реакторе / Е.С.Глушков, В.Е.Демин, Н.Н.Пономарев-Степной, А.А.Хрулев. М.: Энергоатомиздат, 1985.

7. Шальман М.П., Плютинский В.И. Контроль и управление на атомных электростанциях. М.: Энергия, 1979.

8. Андреев В.К., Архипов В.В., Тимонин А.С. Контроль и измерение температуры в ядерных энергетических установках: Учебное пособие. М.: МИФИ, 1991.

9. Диагностика ядерных реакторов: возможности и перспективы нейтронных методов контроля /Архипов В.В., Кетов С.Н., Ко-

ровкин А.А. и др.// Известия АН СССР Энергетика и Транспорт 1990, №6.

10. Коляда В.М., Карасев В.С. Калориметрия излучений ядерного реактора. М.: Атоиздат, 1974.

11. Мительман М.Г., Розенблюм Н.Д. Зарядовые детекторы ионизирующих излучений. М.: Энергоиздат, 1982.

12. Использование вне реакторных детекторов для контроля мощности и ее распределения в реакторе. / А.М.Лужнов, В.В.Морозов, Н.С.Орехова, С.Г.Цыпин // Атомная техника за рубежом, 1984, № 8, С.19-22.

13. Системы внутриреакторного контроля с реакторами ВВЭР. /В.А.Брагин, В.И.Батенин, М.Н.Голованов и др. М.: Энергоатомиздат, 1987.

14. Цыканов В.А., Самсонов Б.В. Техника облучения материалов в реакторах с высоким нейтронным потоком. М.: Атомиздат, 1973.

15. А.С.1328848, МКИЗ 21С 17.00. Измерительный канал СВРК / Е.Д.Аликин, Д.И.Конин, А.С.Кужиль и др. –Бюл. Открытия. Изобр., 1987, № 29.

16. Измерение расхода методом корреляции случайных сигналов термпар в контурах с естественной циркуляцией теплоносителя. / В.М.Селиванов, А.Д.Мартынов, Ю.А.Сергеев и др. // Ат. энергия, 1977, т. 42, вып.1, С. 49-52.

17. Архипов В.В., Тимонин А.С. Контроль и измерения в ядерных реакторах (контроль тепловыделения): Учебное пособие. М.: МИФИ, 1989.

В.В. Архипов, И.С. Быков, В.А. Корсун,  
К.В. Куценко, Ю.Е. Похвалов, М.Б. Шарифьянов

# **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ТЕПЛОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

Учебное пособие

Редактор Т.В. Волвенкова

Подписано в печать 20.11.2008. Формат 60x84 1/16  
Печ. л. 6,5. Уч.-изд. л. 7,0. Тираж 120 экз.  
Изд. № 3/53. Заказ №

*Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет).  
115 409, Москва, Каширское ш., 31*

*Типография издательства «Тровант».  
г. Троицк Московской обл.*

