

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Павлодарский государственный университет  
им. С. Торайгырова

Энергетический факультет

Кафедра теплоэнергетики

# **ГИДРОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОБМЕН**

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов специальности 050731 "Безопасность  
жизнедеятельности и охрана окружающей среды"

Павлодар  
Кереку  
2009

УДК 621.1.016(07)  
ББК 31.31я7  
Г46

**Рекомендовано к изданию заседанием кафедры  
теплоэнергетики энергетического факультета Павлодарского  
государственного университета им. С. Торайгырова**

**Рецензент:**

кандидат технических наук, доцент С.А.Глазырин

**Составитель А. К. Мергалимова**

Г46 Гидрогазодинамика и тепломассообмен : методические указания к лабораторным работам для студентов специальностей 050731 "Безопасность жизнедеятельности и охрана окружающей среды" / сост. А. К. Мергалимова – Павлодар : Кереку, 2009. – 44 с.

В методическом указании приводятся материалы для подготовки к лабораторным работам и методика их выполнения по дисциплине "Гидрогазодинамика и тепломассообмен", показаны цели работ.

Методические указания разработаны в соответствии с рабочим учебным планом специальности 050731 "Безопасность жизнедеятельности и охрана окружающей среды" и рабочей программой.

УДК 621.1.016(07)  
ББК 31.31я7

© Мергалимова А.К., 2009  
© ПГУ им. С. Торайгырова, 2009

За достоверность материалов, грамматические и орфографические ошибки  
ответственность несут авторы и составители

**Введение**

Данные методические указания по дисциплине «Гидрогазодинамика и тепломассообмен» разработаны для студентов специальности 050731 «Безопасность жизнедеятельности и охрана окружающей среды».

Здесь рассмотрены вопросы: понятие технической термодинамики и тепломассообмена, различные способы применения тепловой энергии, законы идеальных и реальных газов в основных теплотехнических расчетах, газовые смеси, единицы измерения, законы теплопередачи.

Представлены три работы по гидрогазодинамике: изучение способов измерения гидростатического давления, ламинарный и турбулентный режимы течения жидкости, применение уравнения Бернулли к анализу потока жидкости. И три работы по тепломассообмену: определение коэффициента теплопроводности материала по методу цилиндрического слоя, исследование теплоотдачи при свободной конвекции в неограниченном объеме, исследование теплоотдачи при вынужденном поперечном обтекании цилиндра.

Целью лабораторных работ является ознакомление с методикой экспериментального определения исследуемых величин, ознакомление с конструкцией приборов и правилами пользования ими.

**Лабораторная работа № 1 Изучение способов измерения гидростатического давления**

**Цель работы:** ознакомление с конструкцией приборов для измерения давления и правилами пользования ими.

### 1.1 Введение

Покоящаяся под действием внешних массовых и поверхностных сил жидкость находится в напряженном состоянии, которое в каждой точке характеризуется давлением  $P$ , равным

$$P = \lim_{F \rightarrow 0} \frac{|p|}{F} \quad (1.1.1)$$

где  $|p|$  - модуль силы, действующей на некоторую площадку, имеющую площадь, равную  $F$ .

Это давление называется гидростатическим давлением.

Давление измеряется в единицах силы, отнесенных к единице площади. В системе СИ единицей давления служит  $\text{Н/м}^2 = \text{Па}$  (паскаль), а в технической системе –  $\text{кгс/см}^2 = \text{атм}$  (техническая атмосфера). Наряду с этим давление можно измерять в единицах длины столба данной жидкости. При выражении давления высотой столба жидкости чаще всего применяют метры и миллиметры водяного столба ( $1 \text{ атм} = 10 \text{ м вод. ст.}$ ,  $1 \text{ мм вод ст.} = 9,81 \text{ Па}$ ), миллиметры ртутного столба ( $1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ ,  $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}$ ).

Если жидкость находится в ненапряженном состоянии, т.е. в ней отсутствуют напряжения сжатия, то  $P = 0$ . Значения  $P$ , отсчитанные от этого нуля, называют **абсолютным** давлением  $P_{am}$ . Давление может отсчитываться и от атмосферного давления (рисунок 1.1.1)

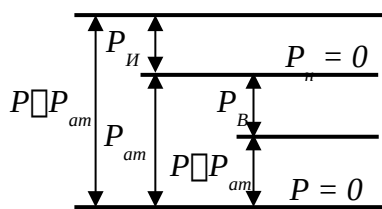


Рисунок 1.1.1 – Схема давлений

Избыток абсолютного давления над атмосферным называется **избыточным** давлением  $P_{и} = P - P_{am}$ . Недостаток абсолютного давления до атмосферного называется **вакуумом** или **разрежением**  $P_{в} = P_{am} - P$ , максимально возможный в технической жидкости вакуум

ограничен величиной, соответствующей при данной температуре давлению насыщенного пара жидкости

$$P_B = P_{am} - P_{НП}$$

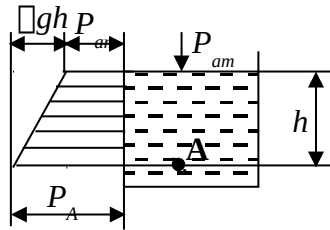


Рисунок 1.1.2 - Распределение давления в объеме

Распределение давления в объеме покоящейся жидкости выражается основным законом гидростатики (рисунок 1.1.2)

$$P = P_A = P_{am} + \rho g h \quad (1.1.2)$$

где  $P_A$  – абсолютное давление в точке А, расположенной на глубине  $h$ , отсчитанной от свободной поверхности жидкости;

$\rho$  - плотность жидкости;

$g$  – ускорение свободного падения.

Если все члены выражения (1.1.2) разделить на  $\rho g$ , то они приобретут линейную размерность

$$\frac{P}{\rho g} = \frac{P_{am}}{\rho g} + h \quad (1.1.3)$$

Отсюда следует, что каждому давлению  $P$  можно поставить в соответствие линейную величину  $P/\rho g$ , которая представляет собой величину столба жидкости, создающего в своем основании данное давление.

Для измерения давления применяются самые разнообразные приборы. Условно все приборы для измерения давления можно классифицировать по следующим признакам:

- 1) по роду измеряемой величины;
- 2) по принципу действия;
- 3) по классу точности.

По роду измеряемой величины в зависимости от необходимости измерения атмосферного, абсолютного, избыточного давления или вакуума существует несколько видов приборов.

Приборы, предназначенные для измерения атмосферного давления, называются барометрами, для измерения избыточного давления – манометрами, для измерения вакуума – вакуумметрами. Приборы, позволяющие измерять и избыточное давление и вакуум, называются мановакуумметрами. Для измерения абсолютного давления необходимо наличие двух приборов – барометра и манометра, если абсолютное давление больше атмосферного; и барометра и вакуумметра, если абсолютное давление меньше атмосферного. Приборы, предназначенные для измерения разности давлений, называются дифференциальными манометрами. Для измерения малых давлений применяют микроманометры.

По принципу действия все приборы можно разделить на жидкостные, механические, грузопоршневые, электрические и комбинированные.

К **жидкостным** относятся приборы, в которых измеряемое давление уравнивается давлением, создаваемым весом столба жидкости, высота которого служит мерой давления.

**Пьезометр** применяется для измерения избыточного давления и разрежения и представляет собой стеклянную трубку с открытым в атмосферу верхним концом. Нижний конец пьезометра соединяется с местом измерения давления. На рис. 1.1.3 изображен пьезометр для измерения избыточного давления. Под действием избыточного давления в сосуде жидкость в пьезометре поднимается на высоту  $h$ , измеряемую по линейной шкале, установленной строго вертикально.

Избыточное давление  $P_{и}$  в точке А жидкости

$$P_{и} = \rho g h \quad (1.1.4)$$

а абсолютное давление в этой точке

$$P = P_A = P_{и} + P_{am}. \quad (1.1.5)$$

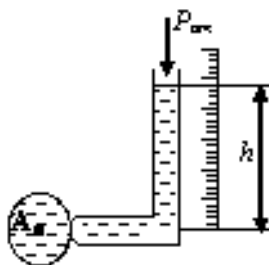


Рисунок 1.3 - Пьезометр

Давление, выраженное высотой столба жидкости  $h = P_{и} / \rho g$ , носит название пьезометрической высоты.

Точность измерения определяется погрешностью в определении плотности, неточностями установки и градуировки шкалы прибора, погрешностями при отсчетах

показаний и дополнительной высотой подъема жидкости в стеклянной трубке, обусловленной действием сил поверхностного натяжения (явление капиллярности).

Дополнительная высота подъема жидкости  $\Delta h$ , мм, в стеклянной трубке диаметром  $d$  определяется по формуле

$$\Delta h = K / d \quad (1.1.6)$$

где величина  $K$  имеет следующие значения: для воды – 30 мм<sup>2</sup>, для ртути – 14 мм<sup>2</sup>, для спирта – 12 мм<sup>2</sup>.

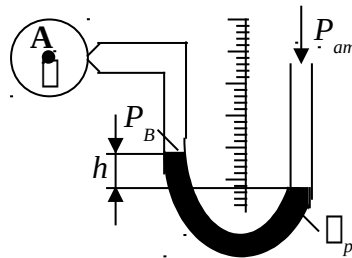


Рисунок 1.1.4 - U – образный манометр

**U – образный манометр** (рисунок 1.1.4) представляет собой U-образную стеклянную трубку, заполненную до некоторого уровня рабочей жидкостью (спирт, ртуть и др.). конец одной ветви манометра соединяется с местом измерения, конец другой ветви открыт в атмосферу. Разность высот уровней рабочей жидкости в ветвях является показанием прибора. Разрежение  $P_B$  на уровне рабочей жидкости в левой ветви

$$P_B = \Delta_p g h \quad (1.1.7)$$

где  $\Delta_p$  – плотность рабочей жидкости. Точность измерений зависит от тех же факторов, что и в пьезометре. Поправкой на капиллярность для U – образного манометра обычно пренебрегают.

**Чашечный манометр** (рисунок 1.1.5) представляет собой модификацию U – образного манометра, одна из ветвей которого заменена чашкой. Под действием давления  $P_{и}$  рабочая жидкость в стеклянной трубке прибора поднимается на высоту  $h$ . Нуль шкалы прибора помещен на уровне мениска рабочей жидкости в трубке при атмосферном давлении на поверхности рабочей жидкости в чашке;

такой способ установки нуля дает возможность сразу учесть поправку на капиллярность.

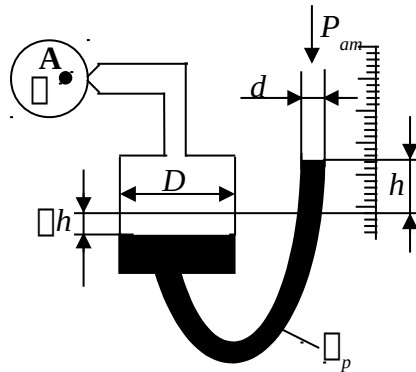


Рисунок 1.1.5 – Чашечный манометр

Избыточное давление на уровне рабочей жидкости в чашке прибора

$$P_{и} = \rho g (h + \Delta h) \quad (1.1.8)$$

где  $h$  – показания прибора;

$\Delta h = h d^2/D^2$  – поправка на положение уровня рабочей жидкости в чашке прибора при подъеме жидкости в трубке на высоту  $h$ ;

$d$  – диаметр прибора (трубки);

$D$  – диаметр чашки.

Обычно  $D \gg d$  и поправкой  $\Delta h$  на положение уровня в чашке можно пренебречь. Преимущество чашечного манометра перед U – образным, что первый имеет постоянный нуль и не требует измерения нескольких высот для определения давления.

В **пружинных манометрах** деформация упругого элемента (полая трубка, мембрана и т.п.), вызванная давлением, по закону Гука пропорциональна давлению и служит его мерой. В манометре с одновитковой трубчатой пружиной (манометр Бурдона) основной деталью является согнутая по дуге окружности полая трубка, имеющая на конце овальную форму. Большая ось овала перпендикулярна плоскости оси трубки. Один из концов трубки запаян. Измеренное давление передается внутрь трубки через второй открытый ее конец. Под действием давления овальное сечение трубки деформируется: большая ось овала уменьшается, малая увеличивается. При такой деформации каждого сечения трубки появляется момент  $M$ , разгибающий эту трубку. Стрелка прибора,

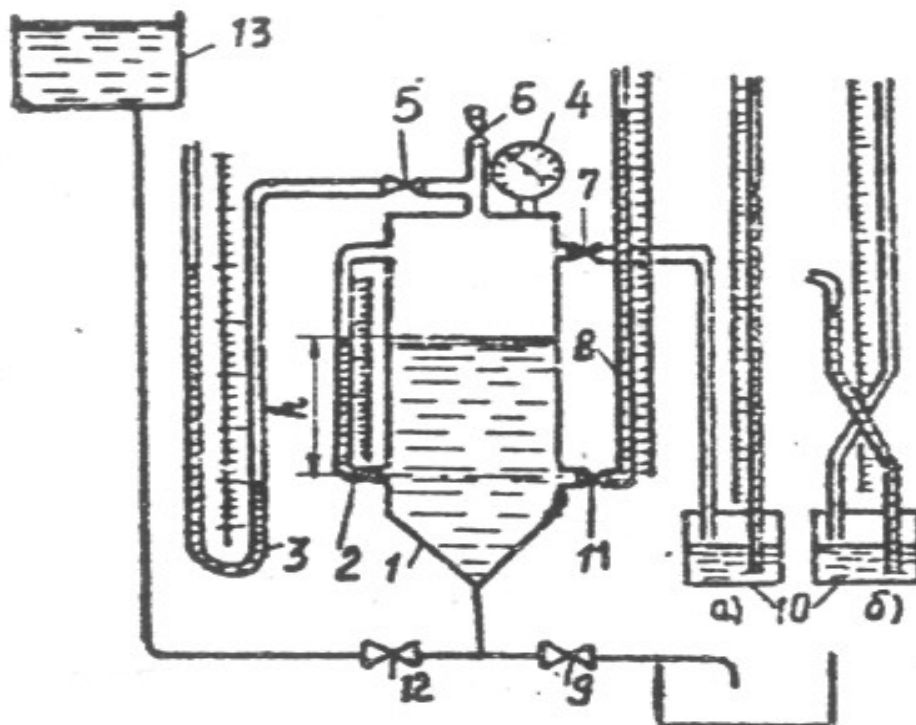


связанная со свободным концом трубки через передаточный механизм, поворачивается на некоторый угол, пропорциональный измеренному давлению.

Важным преимуществом пружинных приборов по сравнению с жидкостными являются портативность, универсальность, огромный диапазон измеряемых давлений. Недостатком является нестабильность их показаний, вызываемая рядом причин: изменением упругости деформируемого элемента, износ передаточного механизма. В связи с чем возникает необходимость периодически определять поправку, компенсирующую систематическую погрешность прибора.

## 1.2 Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка (рисунок 1.2.1) состоит из герметичного сосуда 1, к которому присоединены водомерное стекло 2, пьезометр 8, чашечный манометр 10, пружинный мановакуумметр 4 и U - образный манометр 3, заполненный водой. Уровень жидкости в сосуде 1 и давление над ее свободной поверхностью можно менять, регулируя доступ воды из напорного бака 13 при помощи вентилях 5, 6, 7, 9, 11 и 12. Вентиль 6 служит для сообщения сосуда с атмосферой.



Заполнить сосуд водой до уровня 11. Угол наклона его объема, ориентируясь по уровню воды в

1.3.3 водомерном стекле. Закрывать вентиль 6 (разобшить сосуд с атмосферой). Вода, продолжая поступать в сосуд через вентиль 12, повысит давление воздуха над свободной поверхностью воды в сосуде.

1.3.4 Записать показания мановакуумметра, U – образного манометра и чашечного манометра, показывающих избыточное давление воздуха в сосуде, и показания пьезометра, показывающего избыточное давление в жидкости в сосуде на глубине  $h$ , которая определяется по уровню жидкости в водомерном стекле.

1.3.5 Закрывать вентиль 12 и открыть вентиль 9. Часть воды вытечет из сосуда, в результате чего давление в сосуде станет меньше атмосферного. Закрывать вентиль 7 и поменять местами соединительные трубки чашечного манометра как показано на рис. 1.7,б. Открыть вентиль 7.

1.3.6 Записать показания приборов, показывающих величину вакуума в сосуде.

1.3.7 Привести установку в исходное состояние: поменять местами соединительные трубки на чашечном манометре, вентиль 12 закрыть, 6 и 9 открыть.

1.3.8 Результаты замеров занести в таблицу 1.3.1

Таблица 1.3.1-Результаты измерений

Приборы	Показания приборов				Перевод показаний в кПа		Абсолютное давление		Погрешность измерения	
	$h$ , мм	$h_B$ , мм	$P_{И}$ , ат	$P_B$ , ат	$P_{И}$	$P_B$	$P = P_{ам} + P_{И}$ , кПа	$P = P_{ам} - P_B$ , кПа	абсолютная	относительная
Мановакуумметр	-	-								
Пьезометр		-	-	-						
Чашечный манометр			-	-						
U – образный манометр			-	-						
Барометр	-	-		-						
Водомерное стекло			-	-						

## 1.4 Обработка результатов опыта

1.4.1 Перевести показания всех приборов в кПа. Определить абсолютное давление воздуха в сосуде по показаниям каждого прибора (атмосферное давление  $P_{ам}$  определить по показаниям барометра), а также абсолютное давление жидкости на глубине  $h$ .

1.4.2 Определить предельную и абсолютную погрешности измерения давления каждым прибором по формулам:  
Предельная абсолютная погрешность измерения давления

$$\Delta_n(P) = \frac{K \cdot P_{ном}}{100} \quad (1.4.1)$$

где  $K$  – класс точности прибора;  
 $P_{ном}$  – номинальное значение давления (за него принимается верхний предел прибора).

Предельная относительная погрешность

$$\varepsilon_n(P) = \frac{\Delta_n(P)}{P_{изм}} \cdot 100\%, \quad (1.4.2)$$

где  $P_{изм}$  – измеренное значение давления.

1.4.3 Результаты расчетов занести в таблицу 1.3.1.

### Контрольные вопросы

1. Что называется давлением?
2. Что такое абсолютное, избыточное и вакуумметрическое давление?
3. Основной закон гидростатики?
4. Приборы для измерения давления?
5. Связь между различными единицами измерения давления.

### Лабораторная работа № 2 Ламинарный и турбулентный режимы течения жидкости

**Цель работы:** ознакомление с методикой визуального определения критического числа Рейнольдса для потока, движущегося в стеклянной трубе, на приборе Рейнольдса и исследование режимов движения жидкости.

#### 2.1 Введение

Наблюдения показывают, что в природе существует два различных режима движения жидкости. В первом случае отдельные струйки движутся параллельно, не смешиваясь между собой. Этот вид

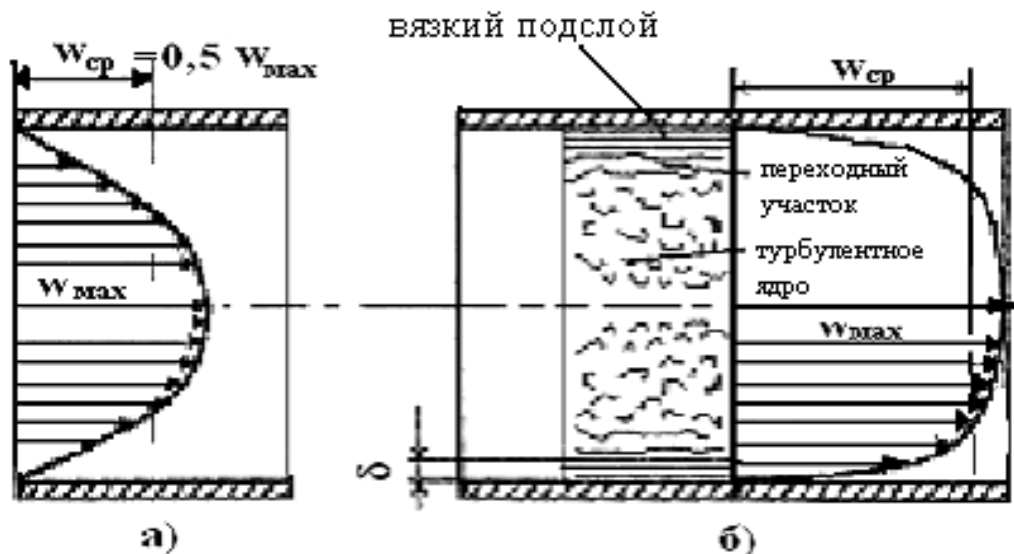
упорядоченного движения жидкости, при котором жидкость перемещается как бы слоями, параллельными направлению течения, называется **ламинарным** течением (от латинского lamina – пластина).

Во втором случае поток характеризуется беспорядочным, хаотичным движением жидкости. Наряду с основным поступательным перемещением жидкости вдоль трубы наблюдается незакономерное поперечное перемещение и вращательное движение частиц. Этот вид беспорядочного движения жидкости называется **турбулентным** течением (от латинского turbulentus – буйный, беспорядочный).

Кинематические и динамические характеристики потока в трубе существенно зависят от режима движения жидкости. Так, при ламинарном движении распределение скоростей по сечению имеет параболический характер: непосредственно у стенок скорости равны нулю, а при удалении от них непрерывно и плавно возрастают, достигая максимума на оси трубы (рисунок 2.1.1,а). Средняя скорость при этом равняется половине максимальной.

При турбулентном течении скорость в каждой точке потока изменяется по величине и направлению около некоторого среднего значения. Следовательно, турбулентный поток является по своей природе неустановившимся. При гидравлических расчетах турбулентных поток обычно пользуются их осредненными во времени характеристиками. Замена действительного неустановившегося движения более простой схемой осредненного установившегося потока чрезвычайно облегчает изучение турбулентного потока, сохраняя вместе с тем его главные закономерности.

Измерения скоростей показывают, что при переходе к турбулентному режиму у стенок сохраняется тонкий слой жидкости, в котором частицы жидкости, подторможенные и направленные стенками, сохраняют, в основном, слоистый характер движения (так называемый ламинарный или вязкий подслой). Поэтому профиль осредненных скоростей имеет два значительно различных участка (рисунок 2.1.1,б). В турбулентном ядре благодаря интенсивному перемешиванию, приводящему к выравниванию скоростей частиц, осредненные скорости отличаются незначительно и их распределение по основной части сечения оказывается более равномерным, чем при ламинарном режиме. В пределах вязкого подслоя происходит весьма резкое падение скорости до нулевого значения на стенке. Толщина вязкого подслоя  $\delta$  чрезвычайно мала (сотые и тысячные доли диаметра трубопровода).



- а) Ламинарный режим течения жидкости,  
 б) турбулентный режим течения жидкости

Рисунок 2.1.1

Измерения скоростей показывают, что при переходе к турбулентному режиму у стенок сохраняется тонкий слой жидкости, в котором частицы жидкости, подторможенные и направленные стенками, сохраняют, в основном, слоистый характер движения (так называемый ламинарный или вязкий подслой). Поэтому профиль осредненных скоростей имеет два значительно различных участка (рисунок 1.1). В турбулентном ядре благодаря интенсивному перемешиванию, приводящему к выравниванию скоростей частиц, осредненные скорости отличаются незначительно и их распределение по основной части сечения оказывается более равномерным, чем при ламинарном режиме. В пределах вязкого подслоя происходит весьма резкое падение скорости до нулевого значения на стенке. Толщина вязкого подслоя  $\delta$  чрезвычайно мала (сотые и тысячные доли диаметра трубопровода).

Между турбулентным ядром и вязким подслоем имеется тонкий переходной участок, в котором по мере приближения к подслою резко уменьшаются турбулентные пульсации и интенсивно уменьшаются осредненные скорости. Так как характеристики потока изменяются по радиусу непрерывно, установить границы между этими участками можно только условно. Ясность в вопрос о том, как именно будет происходить движение жидкости в тех или иных условиях, была

внесена в 1883 г. в результате опытов английского физика Рейнольдса. Основываясь на некоторых теоретических соображениях, а также на результатах этих опытов, Рейнольдс установил общие условия, при которых возможны существование ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости и переход от одного режима к другому. Оказалось, что режим потока жидкости в трубе зависит от величины безразмерного числа, которое учитывает основные факторы, определяющие это движение: среднюю скорость  $v$ , диаметр трубы  $d$ , плотность жидкости  $\rho$  и ее абсолютную (динамическую) вязкость  $\mu$ . Это число (позже ему было присвоено название числа Рейнольдса) имеет вид

$$\varepsilon = \frac{V_1 \cdot V_2}{V_1} = 1 \cdot \frac{V_2}{V_1} \quad (2.1.1)$$

Если ввести понятие кинематической вязкости  $\nu = \mu / \rho$ , то для сечений любой формы число Рейнольдса определяется из выражения

$$Re = \frac{\omega \cdot d_s}{\nu} \quad (2.1.2)$$

где  $d_s = \frac{4F}{x}$  - эквивалентный диаметр, равный отношению учетверенной площади проходного сечения канала к его смачиваемому периметру (для трубы круглого поперечного сечения  $d_s = d$ ).

Значение числа Рейнольдса, при котором происходит переход от ламинарного движения к турбулентному, называют верхним критическим числом Рейнольдса и обозначают  $(Re_{кр})_в$ . Величина  $(Re_{кр})_в$  зависит от условий входа в трубу, отсутствия или наличия первоначальных возмущений в жидкости, конвективных токов и др.

Число Рейнольдса, при котором турбулентный режим сменяется ламинарным, называется нижним критическим числом  $(Re_{кр})_н$ .

Вопрос о неустойчивости ламинарного движения и его переходе в турбулентное, а также о величине критического числа Рейнольдса подвергся тщательному теоретическому и экспериментальному изучению, но до сих пор не получил еще достаточного решения. Наиболее часто в расчетах труб круглого сечения принимают для критического числа Рейнольдса значение  $(Re_{кр})_н = 2300$ , отвечающее переходу жидкости из турбулентного в ламинарное. При переходе движения из ламинарного в турбулентное критическое число  $(Re_{кр})_в$

имеет большую величину (для плавного входа оно может быть доведено до 20000).

В настоящее время в практике принято исходить только из одного критического значения числа Рейнольдса, считая, что: при  $Re \leq 2300$  режим ламинарный, при  $Re > 2300$  режим турбулентный.

## 2.2 Описание лабораторной установки

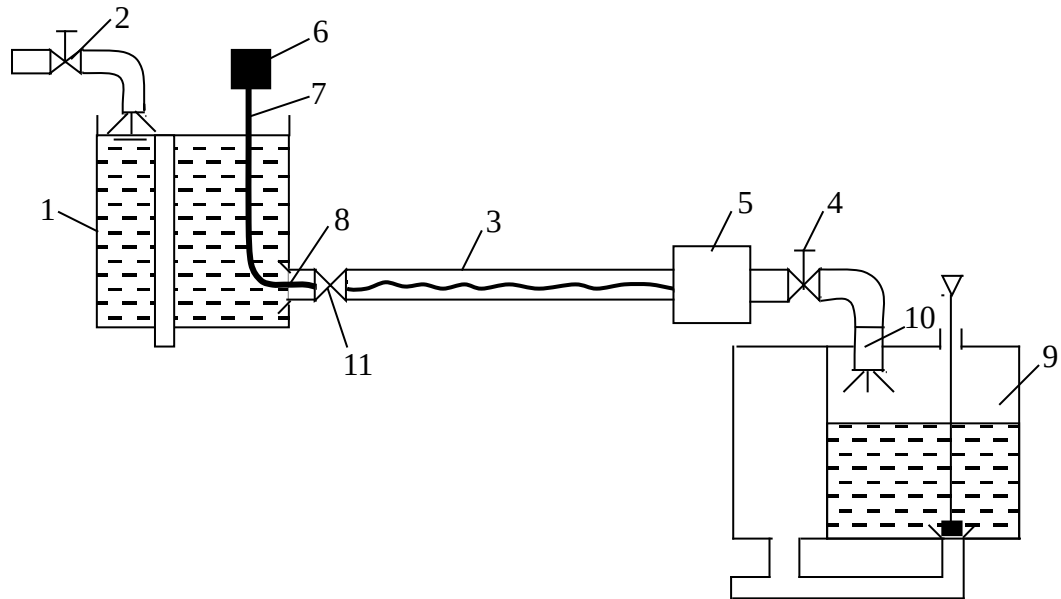


Рисунок 2.2.1- Опытная установка

Опытная установка для исследования режимов движения жидкости (рисунок 2.2.1) состоит из бака постоянного напора 1, в который поступает жидкость из трубопровода через вентиль 2. К напорному баку присоединена прозрачная труба 3 для наблюдения характера движения жидкости.

Расход жидкости, а значит и ее скорость регулируется вентилями 4 и 11. Для уменьшения возмущений, создаваемых вентилем 4 предусмотрен дополнительный объем 5. Вытекающая из трубопровода вода направляется либо в мерную емкость 9, либо на слив в канализацию с помощью шланга 10. Подкрашенная жидкость поступает из бачка 6 через кран 7, служащий для регулирования подачи подкрашенной жидкости, в трубку 8 и в виде тонкой струйки вводится в основной поток.

## 2.3 Порядок выполнения работы

**2.3.1** Ознакомиться с приборами и устройством лабораторной установки.

**2.3.2** Залить подкрашенную жидкость в бачок 6 и заполнить водой бак 9.

**2.3.3** Несколько приоткрыв, начиная от положенного полного закрытия, вентиль 4, установить ламинарный режим течения в стеклянной трубе (струйка краски должна четко выделяться в потоке и не перемешиваться с основным потоком).

**2.3.4** Направить шланг 10 в мерную емкость 9 и одновременно включить секундомер. Остановить секундомер после заполнения мерной емкости объемом  $V$  и записать время  $\tau$ .

**2.3.5** Увеличивая постепенно открытие вентиля 4, установить момент перехода ламинарного режима в турбулентный (момент полного перемешивания окрашенной струйки с водой основного потока). Для этого случая определяется верхнее критическое число Рейнольдса. Повторить пункт 4.

**2.3.6** Установить турбулентный режим течения в трубе, полностью открыв вентиль 4. Повторить пункт 4.

**2.3.7** Уменьшая открытие вентиля 4, зафиксировать момент перехода турбулентного режима в ламинарный. Для этого случая вычисляется нижнее критическое число Рейнольдса. Повторить пункт 4.

**2.3.8** Результаты опытных данных занести в таблицу 2.3.1.

Таблица 2.3.1-Результаты измерений

Номер опыта	Объем жидкости и $V$ , м <sup>3</sup>	Время замера $\tau$ , с	Расход $V_{сек}$ , м <sup>3</sup> /с	Скорость $u$ , м/с	Число Рейнольдса $Re$	Режим движения жидкости
1						
2					$(Re_{кр})_в$	
3						
4					$(Re_{кр})_н$	

## 2.4 Обработка результатов опыта

2.4.1 Найти объемный расход, м<sup>3</sup>/с, по формуле

$$V_{сек} = \frac{V}{\tau} \quad (2.4.1)$$

где  $V$  – объем воды в мерной емкости, м<sup>3</sup>;  
 $\tau$  - время заполнения мерной емкости, с.



2.4.2 Вычислить среднюю скорость потока, м/с, в стеклянной трубе

$$\omega = \frac{V_{сек}}{F} = \frac{4V_{сек}}{\pi d^2} \quad (2.4.2)$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубы, м.

2.4.3 Числа Рейнольдса определить по формуле (1.2).

2.4.4 Результаты расчетов занести в таблицу 3.1.

2.4.5 Зарисовать характерные режимы течения жидкости.

2.4.6 Произвести сопоставление критических чисел Рейнольдса, найденных по опыту, с указанными в начале работы.

### Контрольные вопросы

1. Особенности ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости. Распределение скоростей при различных видах движения.
2. От каких величин зависит режим движения жидкости?
3. Что называется верхним и нижним критическим числом Рейнольдса?
4. Методика визуального определения критического числа Рейнольдса.

### Лабораторная работа № 3 Применение уравнения Бернулли к анализу потока жидкости

**Цель работы:** ознакомиться с методикой экспериментального построения линий полного и пьезометрического напоров и определение пьезометрического и гидравлического уклонов для произвольного трубопровода.

#### 3.1 Введение

Уравнение Бернулли является выражением закона сохранения энергии применительно к потоку жидкости, связывающим его потенциальную и кинетическую энергии жидкой частицы, массой  $M$  в двух ее положениях с работой внешних сил давления и работой сил сопротивления. В совокупности с законом сохранения массы, который применительно к потоку принимает вид уравнения неразрывности

$$M_{сек} = \rho WF = const \quad (3.1.1)$$

Уравнение Бернулли является одним из основных уравнений гидромеханики.

Для установившегося потока несжимаемой жидкости в поле сил тяжести уравнение Бернулли имеет вид

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{\omega_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{\omega_2^2}{2g} + h_{ном1-2} \quad (3.1.2)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – высоты положения центров тяжести сечений 1 и 2 относительно произвольной плоскости сравнения О-О (рисунок 3.1.1);

$P_1$  и  $P_2$  – избыточные статические давления в сечениях 1 и 2;

$\rho$  – плотность жидкости;

$g$  – ускорение свободного падения;

$\omega_1$  и  $\omega_2$  – средние скорости потока в сечениях 1 и 2;

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты кинетической энергии для сечений 1 и

2.

**Коэффициенты кинетической энергии** представляют собой отношение действительной кинетической энергии потока, вычисленной по местным скоростям, к кинетической энергии, вычисленной по средней скорости. При турбулентном режиме течения  $\alpha \approx 1,1$  и во многих случаях (например, при расчете трубопроводов) практически можно полагать  $\alpha = 1$ .

Трехчлен  $Z + \frac{P}{\rho g} + \alpha \frac{\omega^2}{2g} = H$  называется **полным напором** потока в соответствующем сечении и представляет собой удельную, отнесенную к единице веса, механическую энергию, проносимую потоком через это сечение.

Двучлен  $Z + \frac{P}{\rho g}$  называется **пьезометрическим или потенциальным напором** и представляет собой полную удельную потенциальную энергию.

Слагаемые напора:

$Z$  – геометрический напор;

$P/\rho g$  – пьезометрическая высота.

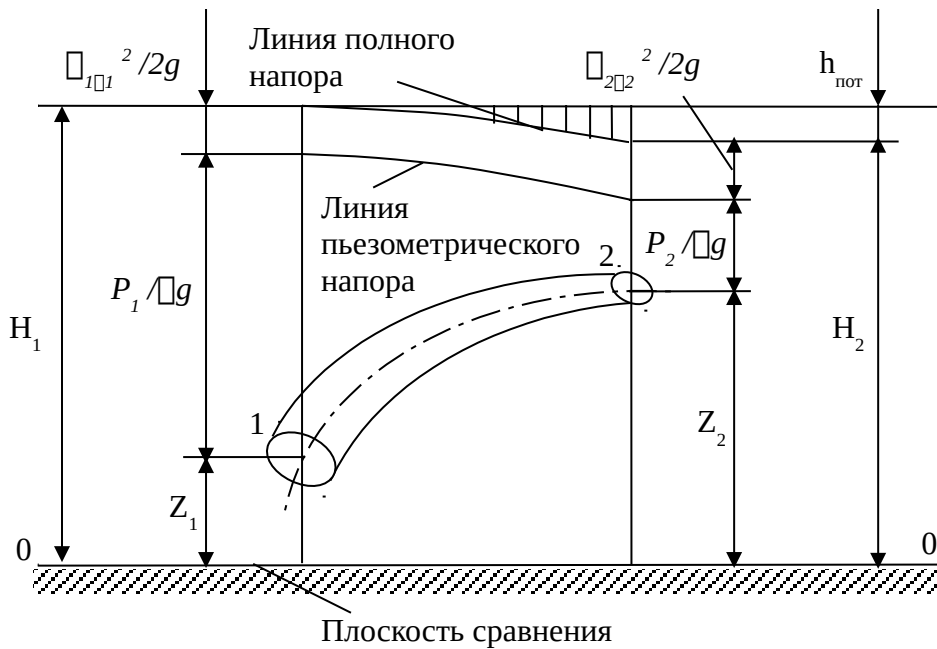


Рисунок 3.1.1- Пьезометрический график

$\alpha \frac{\omega^2}{2g}$  - скоростной напор представляет собой соответственно удельную (отнесенную к единице веса) потенциальную энергию положения, удельную потенциальную энергию давления (возможную работу сил) и удельную кинетическую энергию потока в данном сечении.

Слагаемое  $h_{ном}$  (**потери напора**) представляет собой уменьшение удельной механической энергии потока на участке между сечениями 1 и 2, происходящие в результате работы сил внутреннего трения, сопровождающейся переходом механической энергии потока в тепловую энергию. Таким образом, уравнение Бернулли свидетельствует о том, что по длине потока реальной жидкости полный напор (удельная механическая энергия) уменьшается. Из этого уравнения вытекает также, что по длине потока с ростом давления скорость потока уменьшается и, наоборот – с увеличением скорости потока уменьшается давление.

Для характеристики относительного изменения полного напора на единицу длины трубопровода вводится понятие о так называемом

**гидравлическом уклоне.** Среднее значение гидравлического уклона на участке между сечениями 1 и 2 определяется как величина потери полного напора на единицу длины участка

$$i = \frac{h_{nom1-2}}{l_{1-2}} = \frac{H_1 - H_2}{l_{1-2}} \quad (3.1.3)$$

Гидравлический уклон – величина безразмерная и в общем случае переменная. Понятие об уклоне можно ввести и для пьезометрической длины. Средний пьезометрический уклон тогда определится по формуле

$$i_{cp.пвз.} = \frac{(Z_1 + P_1 / \rho g) - (Z_2 + P_2 / \rho g)}{l_{1-2}} \quad (3.1.4)$$

Пьезометрический уклон может быть положительным, равным нулю и отрицательным.

## **3.2 Описание лабораторной установки**

Установка для анализа потока с помощью уравнения Бернулли состоит из бака со сливной трубой, трубопровода с участками различного поперечного сечения. Расход воды регулируется двумя вентилями. Вытекающая из трубопровода вода направляется либо в мерную емкость 6, либо на слив в канализацию с помощью шланга. В напорный бак вода поступает через вентиль. Для замера пьезометрического напора установлены пьезометры.

## **3.3 Порядок выполнения работы**

3.3.1 Ознакомиться с приборами и устройством лабораторной установки.

3.3.2 Открыть вентиль 4 (вентиль 8 открывается лаборантом) и при закрытом вентиле 5 убедиться в равенстве показаний каждой пары пьезометров на соответствующем участке трубопровода, при необходимости ввести поправку.

3.3.3 Направить шланг 7 на слив в канализацию и открыть вентиль 5 (вентиль 4 должен быть полностью открыт). После того, как уровень воды в пьезометрах перестанет изменяться, можно приступать к замерам.

3.3.4 Направить шланг в мерную емкость 6 и одновременно включить секундомер. Остановить секундомер после заполнения мерной емкости объемом  $V$  и записать время  $\square$ .

3.3.5 Замерить температуру воды  $t$  в емкости с помощью термометра и пьезометрической высоты  $P_i/\rho g$  в каждом мерном сечении с помощью пьезометров.

3.3.6 Записать координаты  $Z_i$  положения центров сечений трубы, диаметр  $d_i$  и длину участков трубы  $l_n$ .

### 3.4 Обработка результатов измерений

3.4.1 Найти объемный расход  $V_{сек}$ , м<sup>3</sup>/с, по формуле

$$V_{сек} = \frac{V}{\tau} \quad (3.4.1)$$

где  $V$  – объем воды в мерной емкости, м<sup>3</sup>;

$\tau$  - время заполнения мерной емкости, с.

3.4.2 Найти среднюю скорость потока, м/с, в соответствующем сечении трубопровода

$$\omega = \frac{V_{сек}}{F} = \frac{4V_{сек}}{\pi d^2} \quad (3.4.2)$$

где  $d$  - внутренний диаметр трубы ( $d_I = 40$  мм,  $d_{II} = 80$  мм,  $d_{III} = 80$  мм,  $d_{IV} = 45$  мм).

3.4.3 Найти динамический напор в каждом сечении, м.

$$h_{дин} = \frac{\omega^2}{2g} \quad (3.4.3)$$

3.4.4 Полный напор в каждом сечении, м.

$$H_i = Z_i + \frac{P_i}{\rho g} + \frac{\omega_i^2}{2g} \quad (3.4.4)$$

3.4.5 Потерю напора на каждом участке трубопровода как разность полных напоров в двух смежных сечениях, м.

$$h_{ном_{i-(i+1)}} = H_i - H_{i+1} \quad (3.4.5)$$

3.4.6 Полную потерю напора на участке I-IV.

3.4.7 Пьезометрический уклон для каждого участка по формуле (1.4).

3.4.8 Гидравлический уклон для каждого участка по формуле (1.3).

3.4.9 Построить непосредственно на схеме установки в соответствующем масштабе линии пьезометрического и полного напоров.

3.4.10 Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.4.1

Таблица 3.4.1-Результаты измерений

Номер мерного сечения	I	II	III	IV
Пьезометрическая высота $P_i / \rho g$ , м				
Координата центра сечения трубы $Z_i$ , м				
Диаметр трубы $d_i$ , м				
Средняя скорость потока $v_i$ , м/с				
Номер мерного сечения	I	II	III	IV
Динамический напор $h_{дин}$ , м				
Полный напор $H_i$ , м				
Номер участка трубы $n$	I-II	II-III	III-IV	
Длина участка трубы $l_n$ , м				
Потери полного напора $h_{ном} = H_i - H_{i+1}$ , м				
Гидравлический уклон $i = h_{ном} / l_n$				
Пьезометрический уклон $i_{пъез}$				

### Контрольные вопросы

1. Физический смысл уравнения Бернулли.
2. Уравнение Бернулли для несжимаемой жидкости.
3. Что такое гидравлический уклон?
4. Что такое пьезометрический уклон?
5. Как строятся линии полного и пьезометрического напоров?

### Лабораторная работа № 4 Определение коэффициента теплопроводности материала по методу цилиндрического слоя.

**Цель работы:** ознакомление с методикой экспериментального определения коэффициента теплопроводности материала цилиндрической формы и углубление знаний по теплопроводности.

#### 4.1 Введение

Источником тепловой энергии является кинетическая энергия микрочастиц тела, которая вместе с потенциальной энергией микрочастиц в термодинамике определяется как внутренняя энергия тела.

При столкновении двух молекул кинетическая энергия передается от более быстрой молекулы к менее быстрой, т.е. кинетическая энергия быстрой молекулы уменьшается, а медленной увеличивается. Обратный процесс невозможен, т.к. медленная молекула попросту не догонит быструю молекулу. При этом изменение кинетической энергии молекул равно работе, совершаемой силами инерции при изменении скорости молекул. Макроскопическим параметром, характеризующим среднюю кинетическую энергию молекул, является температура.

Самопроизвольный необратимый процесс передачи кинетической энергии быстрых молекул медленным молекулам называется теплообменом или теплопереносом.

Обмен кинетической энергии между молекулами может происходить не только при их столкновении, но и путем испускания и поглощения различных частиц (гравитонов, фотонов, электронов и т.п.), несущих определенный запас кинетической энергии. В соответствии с этим различают три способа переноса энергии (передачи кинетической энергии): тепловое излучение, теплопроводность и конвекцию.

Если носителями кинетической энергии являются только фотоны, то в этом случае процесс теплообмена называется тепловым излучением. Тепловое излучение в чистом виде имеет место только в космосе или вакууме.

В случае теплопроводности носителями кинетической энергии могут быть как различные частицы, испускаемые молекулами, так и сами молекулы, если результирующий поток молекул во всех направлениях равен нулю, т.е. нет макроскопического перемещения среды в пространстве. Так, в металлах носителями кинетической энергии в основном являются свободные электроны; в жидкостях и твердых телах - диэлектриках фононы (частицы упругих волн подобно фотонам частицам электромагнитных волн); в газах молекулы и атомы.

Теплопроводность в чистом виде большей частью имеет место в твердых телах. В жидкостях и газах чистая теплопроводность может быть реализована лишь при условии отсутствия макроскопического перемещения среды в пространстве. Конвекция (от латинского *convectio* - перенос, доставка)

возможна только в текучей среде. В случае конвекции носителями кинетической энергии являются молекулы, которые наряду с хаотическим движением внутри некоторого элементарного объема (макрочастицы), совершают направленное движение в пространстве вместе с самой макрочастицей.

Количество кинетической энергии, переданное молекулам системы через всю ее поверхность в процессе теплообмена за время  $t$ , называется теплотой  $Q$ , Дж (чтобы не путать обозначение времени с температурой Цельсия, для обозначения последней можно ввести символ  $T_c$ ). Все величины имеют одинаковую единицу температуры - Кельвин (К) подобно тому, как все виды давления имеют одинаковую единицу давления - Паскаль (Па);  $T$  - температура (абсолютная), К;  $T_0 = 273,15$  К - температура таяния льда;  $T_c$  - температура Цельсия.

В термодинамике под теплотой понимается та часть изменения кинетической энергии молекул системы, в произвольном процессе, которую пока не удастся рассчитать как произведения силы на перемещение, т.е. как работу микроперемещения. Согласно 1-му закону термодинамики теплоту можно определить как разность изменения кинетической энергии молекул и работы макроперемещения внешних сил или как сумму внутренней энергии и работы изменения объема внутренних сил

$$dQ = dE_K - dL_{\text{внеш}} - dE_K - (-P_{\text{мол}}dV - pdV) = dU + pdV \quad (4.1.1)$$

Поскольку теплота в общем случае не характеризует полное изменение кинетической энергии молекул, то она не может рассматриваться как функция состояния, изменение которой характеризует полное изменение кинетической энергии микрочастиц системы.

Количество теплоты, проходящее в единицу времени через изотермическую поверхность, называется тепловым потоком  $\Phi$ , Вт,

$$\Phi = dQ/dt; Q = \int \Phi dt \quad (4.1.2)$$

Тепловой поток проходящий через единицу площади поверхности теплообмена, называется плотностью теплового потока  $\phi$ , Вт/м<sup>2</sup>,



$$\varphi = d\Phi/dA = d^2Q/dA*dt; \quad Q = \iint \varphi dA*dt$$

(4.1.3)

Согласно закону Фурье вектор плотности теплового потока  $\varphi$  пропорционален и противоположен по направлению градиенту температуры

$$\text{grad}T = n_0 dT/dn \quad (4.1.4)$$

$$\varphi = -\lambda \text{grad}T = -\lambda (dT/dn) n_0$$

(4.1.5)

где  $\lambda$  – теплопроводность – физическая величина, характеризующая теплопроводящие свойства вещества, Вт/(мК). Зависит от агрегатного состояния вещества (таблица 4.2.1), его атомно-молекулярного строения, температуры и давления, состава (в случае смеси или раствора) и т.д.;

$n_0$  - единичный вектор, нормальный к изотермической поверхности и направленный в сторону возрастания температуры;

$dT/dn$  - производная от температуры по направлению нормали  $n$ .

Градиент температуры - это вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры и численно равный производной от температуры в направлении нормали. Градиент температуры характеризует наибольшее изменение температуры на единицу длины в данной точке пространства.

На основании закона Фурье выводятся зависимости для расчета теплопроводности плоской стенки

$$\Phi = \lambda/\delta(T_1 - T_2)A \quad (4.1.6)$$

и цилиндрической стенки

$$\Phi = 2\pi l/\ln(d_2/d_1)*(T_1 - T_2) \quad (4.1.7)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  - температура горячей и холодной поверхностей стенки, К;

$\delta$  - толщина стенки, м;  $A$  - площадь поверхности стенки, м<sup>2</sup>;

$d_1$  и  $d_2$  - внутренний и наружный диаметры стенки цилиндрической, м;

$\lambda$  - теплопроводность материала стенки, Вт/(м К).

#### 4.2 Методика экспериментального определения теплопроводности материала

В данной работе определяется теплопроводность сыпучего материала методом цилиндрического слоя (трубы). Сущность метода состоит в том, что испытываемому материалу придают форму цилиндрической трубы. В центре трубы равномерно по длине расположен электронагреватель, причем длина трубы должна быть больше в 30 раз для создания одномерного теплового потока через слой исследуемого материала. Для уменьшения тепловых потерь через торцы трубы, они дополнительно теплоизолируются. Если пренебречь тепловыми потерями через торцы трубы, то тепловой поток  $\Phi$ , Вт, проходящий через слой исследуемого материала, может быть найден непосредственно путем измерения мощности  $P$ , потребляемой электронагревателем, или по величине силы тока  $I$  и падению электронного напряжения в нагревателе  $U$ .

$$\Phi = P = IU \quad (4.2.1)$$

Теплопроводность исследуемого материала находится из уравнения 1.7

$$\lambda = (\Phi l n d_2 / d_1) / 2 n l (\check{T}_1 - \check{T}_2) \quad (4.2.2)$$

где  $l$  - длина цилиндрического слоя из исследуемого материала, м;

$d_2$  и  $d_1$  - внутренний и наружный диаметры цилиндрического слоя, м;

$\check{T}_1$  и  $\check{T}_2$  средние арифметические температуры внутренней и наружной поверхностей цилиндрического слоя, К.

Теплопроводность исследуемого материала находится из уравнения 4.1.7

$$\lambda = (\Phi l n d_2 / d_1) / 2 n l (\check{T}_1 - \check{T}_2) \quad (4.2.2)$$

где  $l$  - длина цилиндрического слоя из исследуемого материала, м;

$d_2$  и  $d_1$  - внутренний и наружный диаметры цилиндрического слоя, м;

$\bar{T}_1$  и  $\bar{T}_2$  средние арифметические температуры внутренней и наружной поверхностей цилиндрического слоя, К.

Таблица 4.2.1.

Вещество	$T_c$ , К	$\lambda$ , Вт/(м К)	Вещество	$T_c$ , К	$\lambda$ , Вт/(м К)
<u>Газы.</u>			<u>Жидкости.</u>		
Водород	0	0.1655	Ртуть	0	7.82
Гелий	0	0.1411	Вода	20	0.599
Кислород		0.0237	Ацетон	16	0.190
Азот	-3	0.0266	Этиловый спирт	20	0.167
Воздух	4		Бензол	22.5	0.158
<u>Металлы.</u>	0		<u>Минералы и материалы.</u>		
Серебро		429	Хлорид натрия	0	6.9
Медь	0	403	Турмалин		
Золото	0	311	Стекло	0	4.9
Алюминий	0	202	Дерево	18	0.4/ 1
Железо	0	86.5	Асбест	18	0.16/0.25 0.12
Олово	0	68.2	Песок	18	0.30/0.38
Свинец	0	35.6	Текстолит	18	0.30/0.38
	0			0+160	1.23/0.34
	0			20	

### 4.3 Описание лабораторной установки

Опытная установка состоит из внешней металлической трубы, диаметром  $d_2$ , внутри которой концентрично установлена металлическая труба, диаметром  $d_1$ , промежуток между этими трубами заполнен исследуемым сыпучим материалом. В стенки труб заделаны горячие спаи термопар (по три термопары на трубу). Внутри трубы вставлена керамическая трубка, в которой установлен электронагреватель. Мощность электронагревателя измеряется ваттметром и может регулироваться с помощью лабораторного автотрансформатора ЛАТРа. Значения температур определяется с помощью милливольтметра, который поочередно подключается к каждой термопаре с помощью переключателя. Торцы трубы теплоизолированы специальными крышками.

#### 4.4 Порядок выполнения работы

4.4.1 Ознакомиться с приборами и устройством лабораторной установки.

4.4.2 Под руководством преподавателя включить электропитание установки и установить заданную мощность нагревателя.

4.4.3 Подключить милливольтметр к одной из термопар с помощью переключателя 9 и дождаться наступления стационарного теплового режима, о чем будет свидетельствовать неизменность показаний милливольтметра во времени.

4.4.4 Произвести замеры следующих величин:

а) температуры на внутренней трубе  $T_4$ ,  $T_5$  и  $T_6$ ;

б) температуры на внешней трубе  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$ ;

в) мощность электронагревателя  $P$ , Вт или силы тока  $I$ , А и падения напряжения  $U$ , В;

г) записать геометрические размеры  $d_1$ ,  $d_2$  и  $l$ , м, которые указаны на установке.

4.4.5 При обработке результатов измерений вычислить:

а) средние значения температур на внутренней трубе

$$\check{T}_1 = (T_4 + T_5 + T_6) / 3 \quad (4.1)$$

и на внешней трубе

$$\check{T}_2 = (T_1 + T_2 + T_3) / 2 \quad (4.2)$$

б) среднюю температуру исследуемого материала

$$T_{\text{мат}} = (\check{T}_1 - \check{T}_2) / 2 \quad (4.3)$$

в) теплопроводность материала  $\lambda$  по формуле (2.2).

4.4.6 Повторить опыт 3 раза, меняя мощность нагрева с помощью ЛАТНа по показаниям ваттметра или вольтметра (например,  $U = 100, 150$  и  $200$  В).

4.4.7 Данные измерений и расчетов занести в таблицу 4.1.

4.4.8 Построить зависимость теплопроводности материала от температуры  $\lambda = f(T_{\text{мат}})$ .

4.4.9 Определить предельную относительную ошибку измерений теплопроводности материала  $\epsilon_n(\lambda)$  по формуле (1.2).

Отчет о работе должен содержать наименование и цель работы, краткое описание методики экспериментального определения,

схему лабораторной установки, график зависимости  $\lambda = f(T_{\text{мат}})$ , таблицу и необходимые расчеты.

Таблица 4.4.1-Результаты измерений

Ф=Р, Вт	T <sub>1</sub> , К	T <sub>2</sub> , К	T <sub>3</sub> , К	T <sub>4</sub> , К	T <sub>5</sub> , К	T <sub>6</sub> , К	Т̇ <sub>1</sub> , К	Т̇ <sub>2</sub> , К	T <sub>мат</sub> , К	Λ, Вт/м К

### Контрольные вопросы

1. Сущность метода цилиндрического слоя.
2. Способы переноса теплоты.
3. Закон Фурье.
4. Зависимости для расчета теплового потока через плоскую цилиндрическую стенку.

### Лабораторная работа № 5 Исследование теплоотдачи при свободной конвекции в неограниченном объеме

**Цель работы:** ознакомление с методикой экспериментального определения коэффициента теплоотдачи и коэффициентов критериального уравнения при свободной конвекции в неограниченном объеме и изучение сложного теплообмена.

#### 5.1 Вводная часть

Сложный теплообмен. Различают три элементарных способа переноса теплоты в пространство: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

Теплопроводность представляет собой способ переноса теплоты в телах (или между ними) путем энергообмена между микрочастицами вещества. Теплопроводность в чистом виде имеет место лишь в твердых телах.

Конвекция представляет собой способ переноса тепла путем перемещения вещества из области с одной температурой в область с

другой температурой. Конвекция возможна только в текучей среде. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

Тепловым излучением называется способ переноса тепла с помощью электромагнитных волн.

Разделение общего процесса переноса теплоты на элементарные явления – теплопроводность, конвекцию и излучение – производится в основном из методологических соображений. В действительности же эти явления протекают одновременно и влияют друг на друга.

Совместный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью называется конвективным теплообменом. Совместный перенос тепла теплопроводностью и излучением называется радиационно-кондуктивным теплообменом. Совместный перенос тепла излучением, конвекцией и теплопроводностью называется радиационно-конвективным или сложным теплообменом. Примером сложного теплообмена является теплообмен между газом и стенкой. В данной работе исследуется радиационно-конвективный теплообмен между нагретым горизонтальным цилиндром и окружающей средой (воздухом), где в качестве основного явления рассматривается конвективный теплообмен.

Теплоотдача при свободной конвекции в неограниченном пространстве. Процесс теплообмена при свободной конвекции (при свободном движении) происходит в следствии разности нагретых и холодных частиц жидкости в гравитационном поле. Возникновение и интенсивность конвективного теплообмена определяется тепловыми условиями процесса и зависит от рода жидкости, разности температур, напряженности гравитационного поля и объёма пространства, в котором происходит процесс. При теплообмене температура жидкости переменна, поэтому возникает разность плотностей и как следствие разность гравитационных сил, представляющих собой архимедову или подъёмную (опускную) силу. Например, при соприкосновении воздуха с нагретым телом воздух нагревается, становится легче и поднимается вверх, т.е. воздух у поверхности тела движется снизу вверх, на его место поступают новые холодные частицы, которые также нагреваются и поднимаются вверх. При свободной конвекции движение жидкости (воздуха) возникает без внешнего возбуждения в результате самого процесса теплообмена.

Интенсивность конвективного теплообмена характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ , который определяется по формуле Ньютона-Рихмана

$$Q = \alpha \cdot F(t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}) \quad (5.1.1)$$

Согласно этому закону тепловой поток  $Q$  пропорционален поверхности теплообмена  $F$  и разности температур стенки и жидкости (под жидкостью может пониматься и газ).

Коэффициент теплоотдачи можно определить как количество теплоты, отдаваемое в единицу времени единице поверхности при разности температур между поверхностью и жидкостью, равной одному градусу, Вт/(м<sup>2</sup>/К)

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}})} \quad (5.1.2)$$

В общем случае коэффициент теплоотдачи является сложной функцией формы  $\Phi$ , размеров  $l$ , температуры стенки и жидкости, скорости жидкости и её физических свойств – коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , теплоемкости  $C_p$ , плотности  $\rho$ , коэффициента вязкости  $\mu$  и других факторов:

$$\alpha = f(W, t_c, t_{\text{жс}}, \lambda, C_p, \rho, \mu, \Phi, l \dots) \quad (5.1.3)$$

Число Прандтля является теплофизической характеристикой теплоносителя

$$\text{Pr}_{\text{жс}} = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} \quad (5.1.4)$$

$\text{Pr} = \text{const}$  и, тогда зависимость (1.1) можно представить в виде  $Nu_{\text{жс}} = c \cdot Gr^n$ . Постоянные  $c$  и  $n$  являются искомыми величинами в этом уравнении. Методики экспериментального определения коэффициента теплоотдачи и коэффициентов критериального уравнения. В условиях опыта тепло рассеиваемое нагревателем передается боковой поверхностью горизонтального цилиндра в окружающее пространство путем теплового излучения, конвекцией и теплопроводностью и может быть определено по эквивалентной мощности электронагревателя

$$Q = Q_{\text{эл}} = I \cdot \Delta U \quad (5.1.5)$$

где  $I$  - величина тока, А;

$\Delta U$  - падение напряжения в нагревателе, Вт.

Суммарный тепловой поток  $Q$  складывается из тепловых потоков путем конвективного теплообмена  $Q_k$  и излучения  $Q_l$ , определяемого по формуле лучистого теплообмена

$$Q = Q_k + Q_l = \alpha F (t_{жс} - t_c) + \varepsilon c_0 F \left[ \frac{T_c}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_{жс}}{100} \right]^4 \quad (5.1.6)$$

Откуда находится коэффициент теплоотдачи  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\frac{Q}{F} - \varepsilon_0 c_0 F \left[ \frac{T_c}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T_{жс}}{100} \right]^4}{(t_c - t_{жс})} \quad (5.1.7)$$

где  $F = \pi d l$  - боковая поверхность цилиндра диаметром  $d$  и длиной  $l$ ;

$c_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>2</sup>) - коэффициент абсолютно чёрного тела;

$\varepsilon$  - степень черноты поверхности цилиндра (для поверхности цилиндра из окисленной стали можно принять  $\varepsilon = 0,79$ , а для фарфоровой трубы  $\varepsilon = 0,92$ );

$T_c$  и  $T_{жс}$  - температура стенки трубы и окружающей среды (воздуха вдали от поверхности цилиндра), К.

Для определения постоянных  $s$  и  $n$  вычисляются численные значения критериев Нуссельта и Грасгофа. Затем по найденным значениям этих критериев строится график в логарифметрических координатах.

Эту зависимость можно значительно упростить, если представить её в виде критериального уравнения, которое для естественной конвекции имеет вид

$$N_{и} = f(G_r P_r) \quad (1.8)$$

Число Грасгофа характеризует относительную эффективность подъемной силы, вызывающей свободно-конвективное движение среды

$$G_{rdжс} = g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot \frac{d^3}{\nu^2} \quad (1.9)$$



где  $g$ -ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  
 $\beta$  - температурный коэффициент объемного расширения среды  
(для газа  $\beta = 1/T_{жс}$ ,  $1/K$ );

$\Delta t = t_c - t_{жс}$  - характерный температурный напор;

$d$  - диаметр трубы, м;

$\gamma$  - кинематический коэффициент вязкости (выбирается в зависимости от температуры жидкости по соответствующим таблицам, например, для воздуха по таблице 5.1.1)

Число Нуссельта характеризует интенсивность процесса конвективного теплообмена и из него определяется коэффициент теплоотдачи  $\alpha$

$$N_{уджс} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (5.1.10)$$

где  $d$  - диаметр трубы, м;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности теплоносителя, выбирается в зависимости от его температуры,  $Вт/(м \cdot К)$ .

Таблица 5.1.1 - Физические параметры воздуха при  $P=760$  мм. ст.

$t, ^\circ C$	$\rho, кг / м^3$	$C_p, Дж / (кг \cdot К)$	$\lambda, Вт / (м \cdot К)$	$\mu \cdot 10^6, Па \cdot с$	$P_r$	$\gamma \cdot 10^6, м / с$
0	1,294	1005	0,0244	17,2	0,707	13,82
10	1,247	1005	0,0259	17,6	0,705	14,16
20	1,205	1005	0,0261	18,1	0,703	15,06
30	1,165	1005	0,0267	18,6	0,701	16,00
40	1,128	1005	0,0276	19,1	0,699	16,96
50	1,093	1005	0,0283	19,6	0,698	17,95

Индексы "d" и "ж" у критериев подобия указывают на то, что в качестве определяющего размера (для горизонтальной трубы) берется диаметр трубы, а за определяющую температуру берется температура жидкости или газа  $t_{жс}$ .  $\ln Nu = f(\ln Gr)$ . В указанных координатах опытные данные описываются прямолинейно зависимостью вида

$$\ln Nu = \ln C + n \ln Gr \quad (5.1.11)$$

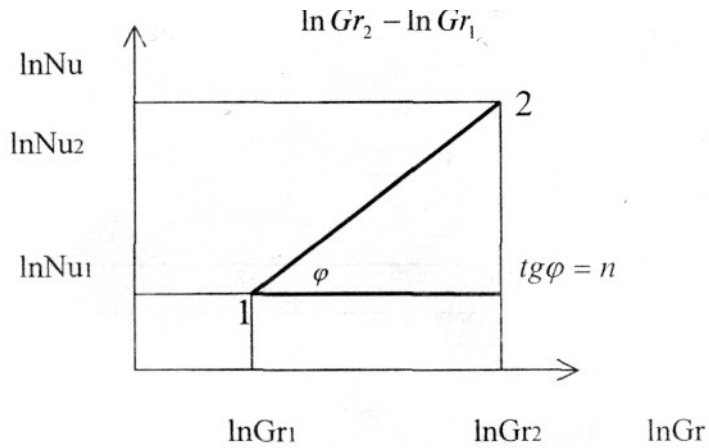


Рисунок 5.1.1 - Определение углового коэффициента

Значение  $n$  в этом уравнении характеризует угловой коэффициент (тангенс наклона) прямой на графике. Взяв на этой прямой две какие-либо произвольные точки с координатами  $\ln Nu_1, \ln Gr_1$  и  $\ln Nu_2, \ln Gr_2$ , можно вычислить угловой коэффициент (рисунок 5.1.1)

$$n = \frac{\ln Nu_2 - \ln Nu_1}{\ln Gr_2 - \ln Gr_1} \quad (5.1.12)$$

Используя уравнение (5.1.11), можно найти постоянную  $c$

$$c = \frac{Nu_1}{Gr_1^n} \quad (5.1.13)$$

Подставляя найденные значения  $c$  и  $n$  в уравнение (5.1.11), получим конкретный вид критериального уравнения для горизонтальных труб при свободной конвекции в неограниченном объёме.

## 5.2 Описание лабораторной установки

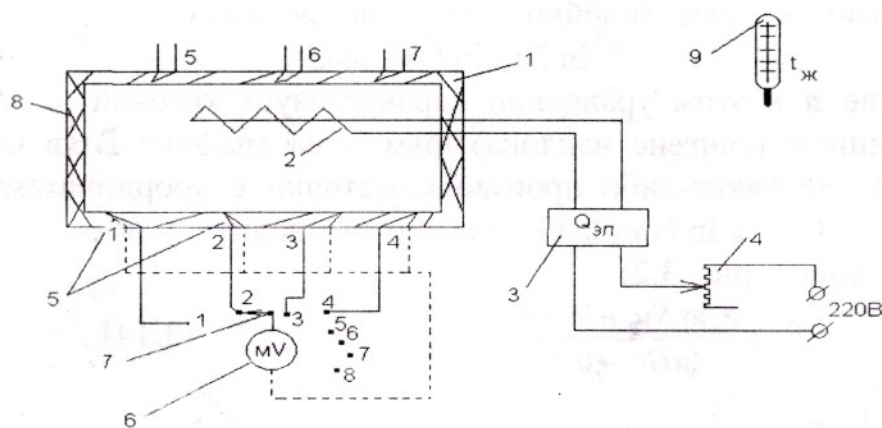


Рисунок 5.2.1 - Схема лабораторной установки

Установка состоит из горизонтального цилиндра 1 (из стали или фарфора) с вмонтированным в него нагревателем 2 (рисунок 5.2.2). Мощность нагревателя измеряется ваттметром 3 и может регулироваться с помощью лабораторного автотрансформатора 4. Для измерения средней температуры стенки трубы на её поверхности установлены горячие спаи термопар 5, причём в нижней части трубы, где температура измеряется наиболее значительно, термопары установлены чаще. Значения температур измеряются с помощью милливольтметра 6, который поочерёдно подключается к каждой термопаре с помощью переключателя 7. Для уменьшения тепловых потерь через торцы трубы они изолируются крышками 8. Температура окружающей среды (воздуха)  $t_{ж}$  измеряется термометром 9, который должен быть расположен не ближе одного метра от трубы.

### 5.3 Порядок выполнения работы

5.3.1 Ознакомится с приборами и устройством лабораторной установки.

5.3.2 С разрешения преподавателя включить электропитание установки и установить заданную мощность нагревателя.

5.3.3 Подключить милливольтметр к одной из термопар с помощью переключателя 7 и дождаться наступления стационарного теплового режима, о чём свидетельствует неизменность показаний милливольтметра во времени.

- 5.3.4 Произвести замеры следующих величин:
- температур на поверхности трубы  $t_1, t_2, t_3 \dots t_7, ^\circ C$ ;
  - температуру воздуха  $t_{\text{в}}, ^\circ C$ ;
  - мощности электронагревателя или тока и падения напряжения, если в схеме установки нет ваттметра;
  - записать геометрические размеры трубы  $d$  и  $l$ , которые указаны на установке ( $d_1=0,020$  м;  $d_2=0,036$  м;  $l=0,72$  м).
- 5.3.5 При обработке результатов измерений вычислить:
- Среднюю температуру стенки трубы  $t = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_7}{7}$
  - Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  по формуле (5.1.7);
  - Критерии Нуссельта и Грасгофа по формулам (5.1.8) и (5.1.9) и их натуральные логарифмы.
- 5.3.6 Повторить опыт три раза, меняя мощность нагрева с помощью ЛАТРа, ориентируясь по показаниям вольтметра (например,  $U=100, 150, 200$ В).
- 5.3.7 Данные измерений и расчётов занести в таблицу 5.3.1.
- 5.3.8 Построить прямолинейную зависимость  $\ln Nu = f(\ln Gr)$ .
- 5.3.9 Определить постоянные критериального уравнения  $s$  и  $n$  по формулам (5.1.12) и (5.1.13).

Таблица 5.3.1 - Результаты измерений

$I, A$	$\Delta U, B$	$Q_{\text{эл}}, Bm$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_{\text{в}}$	$t_{\text{н}}$	$\alpha$	$\lambda$	$N_u$	$G_r$	$\ln G_r$	$\ln N_u$

Отчет по работе должен содержать наименование и цель работы, краткое описание методики экспериментального определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , схему лабораторной установки, график зависимости  $\ln Nu = f(\ln Gr)$ , таблицу и необходимые расчеты.

### Контрольные вопросы

- Способы переноса тепла в пространстве.
- Сложный теплообмен.
- Уравнение Ньютона-Рихмана.
- Что такое коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  и от каких факторов он зависит?

5. Критериальное уравнение для свободной конвекции в неограниченном пространстве.

6. Как определялись в работе постоянные критериального уравнения  $s$  и  $n$ ?

### **Лабораторная работа № 6 Исследование теплоотдачи при вынужденном поперечном обтекании цилиндра**

**Цель работы:** ознакомление с методикой экспериментального определения среднего коэффициента теплоотдачи и постоянной  $S$  в критериальном уравнении при поперечном обтекании цилиндра (трубы).

#### **6.1 Вводная часть**

Конвективный теплообмен. Конвективным теплообменом или теплоотдачей называется процесс переноса теплоты между поверхностью твердого тела и жидкой средой путем теплопроводности и конвекции. Конвекция возможна лишь в жидкостях и газах, частицы которых могут легко перемещаться. По природе возникновения различают два вида движения - свободное и вынужденное. Свободное движение (естественная конвекция) происходит вследствие разности плотностей нагретых и холодных слоев жидкости. Вынужденное движение (вынужденная конвекция) возникает под действием посторонних возбудителей, например, насоса, вентилятора и пр. В общем случае наряду с вынужденным движением одновременно может развиваться и свободное. Относительное влияние последнего тем больше, чем больше разность температур в отдельных точках жидкости и чем меньше скорость вынужденного движения.

Интенсивность конвективного теплообмена характеризуется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ , который определяется по формуле Ньютона – Рихмана. В общем случае коэффициент теплоотдачи может изменяться вдоль поверхности теплообмена, и поэтому различают средний по поверхности коэффициент теплоотдачи и местный (локальный) коэффициент теплоотдачи, соответствующий единичному элементу поверхности.

Процесс теплоотдачи неразрывно связан с условиями движения жидкости. Различают два режима течения жидкости - ламинарный и турбулентный. При ламинарном режиме течение имеет спокойный, струйчатый характер. При турбулентном режиме движение

неупорядоченное, вихревое (рисунок 6.1.1). Режим течения зависит от числа Рейнольдса

$$Re = \omega * d / \nu \quad (6.1.1)$$

которое учитывает основные факторы, определяющие это течение  $\omega$  - среднюю скорость движения жидкости, м/с.

При этом характер и условия омывания передней (фронтальной) и задней (кормовой) половины цилиндра совершенно различны. В лобовой точке набегающий поток разделяется на две части и плавно обтекает переднюю часть периметра трубы. На поверхности трубы образуется пограничный слой, который имеет наименьшую толщину в лобовой точке и далее постепенно нарастает в размерах. Скорость слоев жидкости, примыкающих к внешней границе пограничного слоя, увеличивается вдоль периметра трубы, а давление в соответствии с уравнением Бернулли уменьшается. При достижении точки периметра, отвечающей углу  $\varphi=90^\circ$  (угол отсчитывается от лобовой точки), скорость достигает наибольших значений и далее начинает уменьшаться, что сопровождается соответствующим увеличением давления и отрывом потока с образованием вихревой зоны, охватывающей кормовую часть трубы.

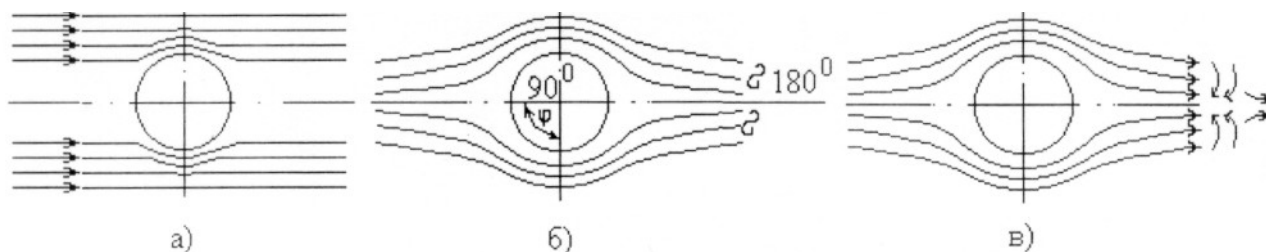


Рисунок 6.1.1 - Режимы течения

Такая своеобразная картина обтекания трубы в сильной мере отражается и на теплоотдаче. Интенсивность теплоотдачи по окружности трубы неодинакова. Максимальное значение коэффициента теплоотдачи наблюдается на лобовой образующей цилиндра ( $\varphi=0$ ), где толщина пограничного слоя наименьшая. По поверхности цилиндра в направлении движения жидкости интенсивность теплообмена резко падает и при  $\varphi=90 - 100^\circ$  достигает минимума. Это изменение связано с нарастанием толщины пограничного слоя, который как бы изолирует поверхность трубы от основного потока. В кормовой части трубы коэффициент

теплоотдачи снова возрастает за счет улучшения отвода теплоты вследствие вихревого движения и перемещения жидкости.

В условиях опыта тепло, рассеиваемое боковой поверхностью цилиндра  $F$  в окружающее пространство путем теплового излучения, конвекцией и теплопроводностью, может быть определено по эквивалентной мощности электронагревателя. Суммарный тепловой поток  $Q$  складывается из тепловых потоков путем конвективного теплообмена  $Q_k$  и излучения

$$Q_{\text{л}} - Q = Q_k + Q_{\text{л}} = \alpha_{\text{ф}} * F (t_{\text{сф}} - t_{\text{ж}}) + \epsilon_{\text{с0}} * F [(T_{\text{сф}} / 100)^4 - (T_{\text{ж}} / 100)^4] \quad (6.1.2)$$

где  $d$  - диаметр трубы, м;

$\nu$  - кинематический коэффициент вязкости (для воздуха таблица 1.1).

Переход турбулентного режима в ламинарный происходит при критическом числе Рейнольдса

$$Re_{\text{кр}} = 2300$$

Если  $Re > 2300$ , то режим турбулентный, если  $Re < 2300$ , то режим ламинарный.

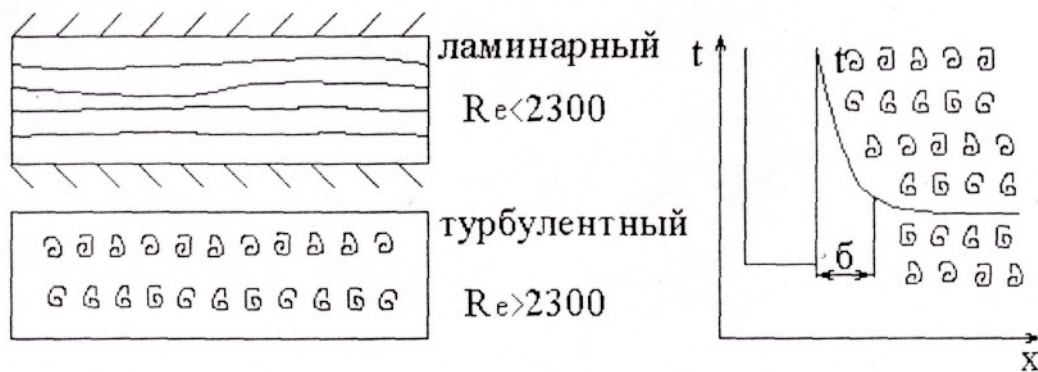


Рисунок 6.1.2 - Пограничный слой при различных режимах течения

При турбулентном движении весь поток насыщен беспорядочно движущимися вихрями, которые непрерывно возникают и исчезают. Однако при любом виде турбулентности в тонком слое у поверхности из-за наличия вязкости трения течения жидкости затормаживается, и скорость падает до нуля.

Для процессов теплоотдачи режим движения жидкости имеет очень большое значение, т.к. им определяется механизм переноса теплоты. При ламинарном режиме перенос теплоты в направлении нормали к стенке в основном осуществляется путем теплопроводности. При турбулентном режиме перенос теплоты путем теплопроводности происходит лишь в вязком подслое, а внутри турбулентного ядра перенос осуществляется путем интенсивного перемещения (конвекции) частиц жидкости. В этих условиях интенсивность теплоотдачи в основном определяется термическим сопротивлением пристенного подслоя толщиной  $\delta$ , где происходит наибольшее изменение температуры жидкости (рисунок 6.1.2).

Теплоотдача при вынужденном поперечном обтекании цилиндра. Процесс теплоотдачи при поперечном обтекании цилиндра (трубы) имеет ряд особенностей, которые объясняются гидродинамической картиной движения жидкости вблизи поверхности цилиндра. Опыт показывает, что плавный, безотказный характер обтекания цилиндра имеет место только при очень малых числах  $Re < 5$ . При значительно больших числах Рейнольдса, характерных для практики, обтекание трубы всегда сопровождается образованием в кормовой части вихревой зоны.

Откуда находится локальный (соответствующий углу  $\varphi$ ) коэффициент теплоотдачи  $\alpha_4$

$$\alpha_4 = (Q / F - \epsilon_{co}[(T_{c\varphi} / 100)^4 - (T_{ж} / 100)^4]) / (t_{c\varphi} - t_{ж}) \quad (6.1.3)$$

где  $F = \pi d l$  - боковая поверхность цилиндра диаметром  $d$  и длиной  $l$ , м<sup>2</sup>;

$C_0 = 5,67$  Вт / (м<sup>4</sup>\*К<sup>4</sup>) — коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$\epsilon$ - степень черноты поверхности цилиндра (для фарфоровой трубы  $\epsilon = 0.92$ );

$t_{c\varphi}$  - температура стенки трубы в точке, соответствующей углу  $\varphi$ , °С,  $T_{c\varphi} = t_{c\varphi} + 273$ , К;

$t_{ж}$  - температура омывающей жидкости (газа), °С и  $T_{ж} = t_{ж} + 273$ , К.

После расчета локальных коэффициентов теплоотдачи определяется средний по периметру трубы коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  как среднее арифметическое значение



$$\alpha = \Sigma \alpha_{\phi} / N, \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

(6.1.4)

где  $N$  - число значений локальных коэффициентов теплоотдачи.

Критерий Нуссельта вычисляется для среднего коэффициента теплоотдачи

$$\dot{N}_{\text{удж}} = \alpha \cdot d / \lambda$$

(6.1.5)

Критериальное уравнение для конвективного теплообмена при вынужденном обтекании цилиндра воздухом имеет вид

$$\dot{N}_{\text{удж}} = C \cdot Re^n$$

(6.1.6)

Поскольку в работе скорость постоянна и влияние числа  $Re$  на теплоотдачу не исследуется, то значение коэффициента  $n$  принять равным при  $Re < 10^3 n = 0,5$  и при  $Re > 10^3 n = 0,6$ .

Постоянная определяется по формуле

$$C = \dot{N}_{\text{удж}} / Re^n$$

(6.1.7)

## 6.2 Описание лабораторной установки

Исследуемый цилиндр (фарфоровая трубка) 1 с вмонтированным в него нагревателем помещен в трубу 2, через которую просасывается воздух вентилятором 3. Для определения средней по длине трубы температуры три термопары 4 на одной образующей цилиндра. Цилиндр может поворачиваться вокруг своей оси, что позволяет замерять температуру по окружности цилиндра одними и теми же термопарами. Термопары с помощью переключателя 5 подключаются к милливольтметру 6. Для определения мощности нагревателя служат амперметр 7 и вольтметр 8. Скорость потока определяется с помощью чашечного

анемометра, который устанавливается в трубу 2. Измерение скорости сводится к определению числа оборотов по счетчику анемометра за соответствующий отрезок времени, измеренный секундомером. По найденному числу оборотов в минуту определяется скорость потока с помощью градуированного графика, прилагаемого к анемометру.

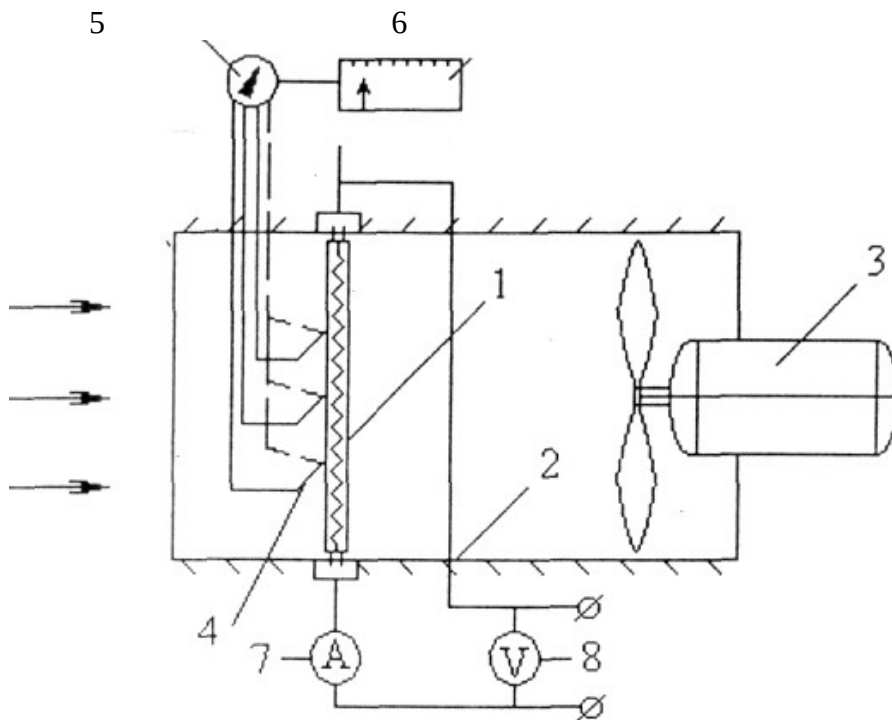


Рисунок 6.2.1- Опытная установка

### 6.3 Порядок выполнения работы

6.3.1 Ознакомление с приборами и устройством лабораторной

установки.

6.3.2 Включить электронагреватель цилиндра и вентилятор.

6.3.3 После наступления установившегося режима (о чем свидетельствует постоянство показаний милливольтметра) произвести следующие замеры:

- а) температуры воздуха в трубе с помощью термометра  $t_{ж}$ , °С;
- б) скорости воздуха в трубе с помощью анемометра  $\omega$ , м / с;
- в) показаний амперметра I, А и вольтметра  $\Delta U$ , В;
- г) температуры стенки цилиндра при положении термопар в лобовой точке цилиндра ( $\varphi = 0^\circ$ ) с помощью трех термопар  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ , °С;

6.3.4 Поворачивая цилиндр вокруг своей оси, произвести замеры температур с помощью термопар  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  через каждые  $30^\circ$  поворота цилиндра.

6.3.5 При обработке результатов опыта вычислить:

- а) тепловой поток по формуле  $Q = Q_{эл}$ , Вт;
- б) среднее значение температуры по образующей цилиндра для данного угла  $\varphi$

$$t_{ср} = t_1 + t_2 + t_3/3, \text{ } ^\circ\text{С}$$

- в) локальный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  по формуле (1.3);
- г) средний коэффициент теплоотдачи  $\acute{\alpha}$  по формуле (1.4);
- д) критерий Рейнольдса по формуле (1.1);
- е) по найденному значению числа Re выбрать показатель степени n;
- ж) критерий Нуссельта по формуле (1.5);
- з) постоянную C по формуле (1.7) и записать критериальное уравнение в окончательном виде применительно к условиям опыта.

6.3.6 Результаты опытов и расчетов занести в таблицу 4.1.

6.3.7 Построить график изменения относительного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_\varphi / \acute{\alpha}$  по окружности  $\alpha_\varphi / \acute{\alpha} = f(\varphi)$ .

Таблица 6.3.1- Результаты измерений

$\varphi$	$t_{ж}$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_{ср}$	I	$\Delta U$	Q	$\alpha_\varphi$	$\acute{\alpha}$	$\omega$	Re	Nu	$\alpha_\varphi/\acute{\alpha}$
град	°С					А	В	Вт	Вт/(м <sup>2</sup> ,К)	м/с				
0														
30														
60														
---														
180														

Отчет о работе должен содержать наименование и цель работы, схему установки, основные расчетные формулы, краткую методику экспериментального определения среднего коэффициента теплоотдачи цилиндра при вынужденной конвекции, таблицу опытных и расчетных

данных, график зависимости относительного коэффициента теплоотдачи от угла.

### **Контрольные вопросы**

1. Чем объясняется неодинаковость коэффициента теплоотдачи по окружности цилиндра?
2. Где больше значения коэффициента теплоотдачи: в боковой или лобовой точке цилиндра и почему?
3. Как в работе определяется средний коэффициент теплоотдачи по окружности цилиндра?
4. Как влияет режим течения жидкости на теплоотдачу?
5. Что называется конвективным теплообменом?
6. Ламинарный и турбулентный режим течения жидкости.
7. Что характеризует критерии Нуссельта и Рейнольдса?

### **Литература**

#### **Основная**

- 1 Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика : учебник для вузов – М. : Стройиздат, 1987. – 210 с.
- 2 Альтшуль А.Д., и др. Примеры расчетов по гидравлике : учеб.пособие для вузов – М. : Стройиздат, 1976. – 175 с.
- 3 Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов. – М. : Энергия, 1975 г.– 320 с.

#### **Дополнительная**

- 4 Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М. : Высшая школа, 1975. – 250 с.
- 5 Рындин В.В. Методические указания к лабораторным работам. Часть 1. – Алма-Ата : НМК, 1992. – 67 с.
- 6 Юдаева Б.Н. Сборник задач по технической термодинамике. – М. : Высшая школа, 1981. – 150 с.

## Содержание

Введение.....	3
.....	
Лабораторная работа №1. Изучение способов измерения гидростатического давления.....	4
Лабораторная работа №2. Ламинарный и турбулентный режимы течения жидкости.....	1 1
.....	
Лабораторная работа № 3 Применение уравнения Бернулли к анализу потока жидкости.....	1 7
Лабораторная работа № 4 Определение коэффициента теплопроводности материала по методу цилиндрического слоя.....	2 2
Лабораторная работа №5 Исследование теплоотдачи при свободной конвекции в неограниченном объеме.....	2 9
Лабораторная работа №6 Исследование теплоотдачи при вынужденном поперечном обтекании цилиндра.....	3 7

Литература.....	4
.....	4

**УТВЕРЖДАЮ**  
Проректор по УР  
ПГУ им. С. Торайгырова  
\_\_\_\_\_Н.Э. Пфейфер  
«\_\_»\_\_\_\_\_2009 г.

Составитель: ст.преподаватель Мергалимова А.К.

**Кафедра теплоэнергетики**

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине  
«Гидрогазодинамика и тепломассообмен» для студентов  
специальности 050731 «Безопасность жизнедеятельности и охрана  
окружающей среды»

Рекомендована на заседании кафедры, от «\_\_»\_\_\_\_\_2009 г.  
Протокол №\_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Глазырин С.А.

Одобрена методическим советом энергетического факультета  
«\_\_»\_\_\_\_\_2009 г. Протокол №\_\_\_\_\_

Председатель МС \_\_\_\_\_ Кабдуалиева М.М.

### **СОГЛАСОВАНО**

Декан ЭФ \_\_\_\_\_ А.П.Кислов «\_\_»\_\_\_\_\_2009 г.

Нормоконтролер ОМК \_\_\_\_\_ Г.С.Баяхметова «\_\_»\_\_\_\_\_2009 г.

### **ОДОБРЕНО**

Начальник ОП и МОУП \_\_\_\_\_ А.А. Варакута «\_\_»\_\_\_\_\_2009 г.

.

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Павлодарский государственный университет  
им. С. Торайгырова

# **ГИДРОГАЗОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССОБМЕН**

Методические указания к лабораторным работам  
для студентов специальности 050731 "Безопасность  
жизнедеятельности и охрана окружающей среды"

Павлодар