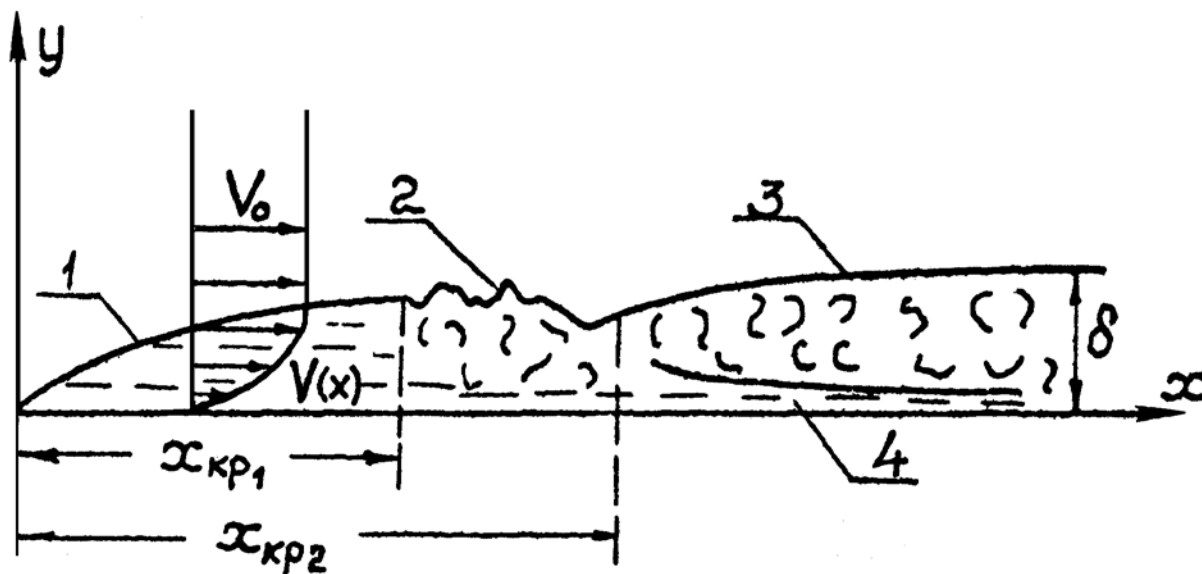


В.А. Кораблев, Д.А. Минкин, А.В. Шарков

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ
ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.А. Кораблев, Д.А. Минкин, А.В. Шарков
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ
ТЕОРИЯ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА
Учебное пособие

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2016

Кораблев В.А., Минкин Д.А., Шарков А.В. Лабораторный практикум по курсу теория тепло- и массообмена. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 38 с.

Учебное пособие разработано в соответствии с программой курса «Тепло-массообмен» Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования для бакалавров по направлению подготовки 16.03.01– «Техническая физика» и программой курса «Тепломассообмен» Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования для бакалавров по направлению подготовки 14.03.01 – «Ядерная энергетика и теплофизика». В настоящее издание вошли лабораторные работы, посвященные изучению механизмов переноса теплоты (теплопроводность, конвекция). Содержание работ включает в себя расчетную и экспериментальную части.

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета лазерной и световой инженерии 9 февраля 2016 года, протокол №2.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2016

©Кораблев В.А., Минкин Д.А., Шарков А.В., 2016

Содержание

| | |
|---|----|
| 1. Лабораторная работа №1 Теплообмен в замкнутых полостях..... | 4 |
| 2. Лабораторная работа №2 Теплоотдача при вынужденном продольном омывании одиночного цилиндра..... | 15 |
| 3. Лабораторная работа №3 Теплоотдача при вынужденном течении жидкости в каналах..... | 25 |

Лабораторная работа №1

ТЕПЛООБМЕН В ЗАМКНУТЫХ ПОЛОСТЯХ

Цель работы – изучение интенсивности конвективного теплообмена в замкнутых вертикальных и горизонтальных полостях.

Программа работы:

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и измерительными приборами;
2. Провести измерения интенсивности теплообмена в замкнутой полости при различных перепадах температуры между ее стенками и ориентации в пространстве;
3. Вычислить по результатам эксперимента значения коэффициентов конвекции;
4. Рассчитать теоретические значения средних и локальных коэффициентов конвекции. Результаты расчета сравнить с данными эксперимента;
5. Составить отчет о проделанной работе.

Конвективный теплообмен в замкнутых полостях.

Движение, которое возникает вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц жидкости, называется естественной конвекцией. Возникновение и интенсивность конвективного движения всецело определяются тепловыми условиями процесса и зависят от рода жидкости, объема, конфигурации и ориентации пространства, в котором протекает процесс. Теплоперенос в прослойках возникает при неравенстве температур ее стенок. При этом, как показывают наблюдения, конвективное движение возникает, когда критерий Релея Ra больше некоторого определенного значения $Ra_{кр}$, т.е.

$$Ra = Gr \cdot Pr > Ra_{кр}, \quad (1)$$

где Gr , Pr – критерий Грасгофа и Прандтля.

Для вертикальных прослоек $Ra_{кр} \approx 1000$, для горизонтальных $Ra_{кр} \approx 1700$. В критериях Gr , Pr , Ra в качестве определяющего размера принята толщина прослойки L , теплофизические параметры выбраны при средней арифметической температуре ее стенок t_m .

В ограниченном пространстве явления нагрева и охлаждения жидкости протекают близко друг от друга, являются взаимосвязанными и разделить их невозможно. Поэтому процесс кондуктивно-конвективного теплообмена характеризуется с помощью эквивалентного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эк}$, определяемого уравнением [1]

$$\lambda_{эк} = \frac{PL}{F \cdot \Delta T}, \quad (2)$$

где P – тепловой поток, Вт; F – площадь теплоотдающей поверхности, m^2 ; ΔT – перепад температур между стенками прослойки, К.

Значение $\lambda_{\text{эк}}$ позволяет рассчитывать тепловой поток в прослойках по формулам для теплового потока, протекающего через твердое тело соответствующей формы.

Если $\lambda_{\text{эк}}$ разделить на λ_m среды, то получим безразмерную величину

$$\varepsilon_k = \frac{\lambda_{\text{эк}}}{\lambda_m},$$

которая характеризует собой влияние конвекции и называется коэффициентом конвекции. Различают средние $\overline{\varepsilon_k}$ и локальные ε_k коэффициенты конвекции.

Интенсивность локального теплообмена в замкнутых вертикальных прослойках с изотермическими стенками может существенно (почти на порядок) изменяться по высоте H прослойки [2]. Можно выделить три основные области теплообмена. В нижней части нагретой пластины интенсивность теплообмена максимальна. С ростом высоты коэффициент конвекции ε_k уменьшается до единицы и сохраняется неизменным в определенной области. В верхней части прослойки величина коэффициента конвекции снова падает и может достигнуть значений примерно 0,3. Это явление ($\varepsilon_k < 1$) можно объяснить следующим образом: движение воздуха вверх вдоль горячей пластины обусловлено повышением его температуры, с ростом высоты увеличивается толщина пограничного слоя и падает разность температур между пластиной и омывающим ее газом. Это приводит к уменьшению теплового потока, передаваемого от поверхности пластины к омывающему газу.

В верхней зоне прослойки разность температур пластины и газа может оказаться настолько малой, то тепло от горячей пластины к холодной будет передаваться лишь за счет лучистого теплообмена. Аналогичная картина будет иметь место в нижней зоне прослойки со стороны холодной пластины.

Получается, что локальный поток тепла в определенной области прослойки в условиях естественной конвекции может оказаться меньше, чем поток тепла, проходящий в данной области только за счет теплопроводности газа при отсутствии конвекции.

В горизонтальных щелях процесс конвективного теплопереноса в первую очередь определяется взаимным расположением нагретых и холодных поверхностей. Если нагретая поверхность расположена сверху, то циркуляция жидкой и газообразной среды отсутствует. Если же нагретая поверхность расположена снизу, то имеются и восходящие, и нисходящие потоки, которые между собой чередуются. На основе экспериментальных данных показано [3], что локальный коэффициент конвекции в горизонтальных замкнутых прослойках, подогреваемых снизу, может изменяться во времени в широких пределах относительно своей средней величины (до четырех раз) при изменении критерия Релея $3 \cdot 10^3 < Ra < 6 \cdot 10^4$ и

принимать значения меньше единицы. Однако зафиксировать эти турбулентные пульсации можно только с помощью малоинерционных датчиков теплового потока.

При расчете среднего по поверхности коэффициента конвекции в прослойках с $L/H \leq 0,2$ можно рекомендовать для вертикальных и горизонтальных прослоек соответственно следующие формулы:

$$\overline{\varepsilon}_\kappa = 1 + \frac{0,024 \cdot Ra_m^{1,39}}{1,01 \cdot 10^4 + Ra_m};$$

$$\overline{\varepsilon}_\kappa = 1 + \frac{0,07 \cdot Ra_m^{1,33}}{3,2 \cdot 10^3 + Ra_m}.$$

Расчет локального коэффициента конвекции ε_κ по высоте x вертикальной прослойки проводится в два этапа. На первом этапе находится зависимость

$$\overline{\varepsilon}_\kappa = 2,25 \lg Ra_m + 4,8 \frac{x}{H} - 5,75 \quad (5)$$

Уравнение (5) справедливо при

$$1 \cdot 10^3 < Ra_m < 1 \cdot 10^5, \quad 0,025 \leq \frac{L}{H} \leq 0,175 \quad (6)$$

На втором этапе определяется область $1 \leq \frac{x}{H} \leq \frac{x_{кр}}{H}$, в которой ε_κ может принимать значения меньше единицы:

$$\frac{x_{кр}}{H} = 1 \text{ для } 0 < \lg Ra_m < 3; \quad (7)$$

$$\frac{x_{кр}}{H} = 0,77 \text{ для } 3 < \lg Ra_m < 4,5; \quad (8)$$

Участки с пониженной интенсивностью теплообмена могут занимать до 25% общей высоты прослойки и располагаться в верхней части более нагретой пластины и в нижней части более холодной. В пределах $\frac{x_{кр}}{H} < \frac{x}{H} \leq 1$ коэффициент конвекции может принимать значения меньше единицы (до 0,3).

Методика проведения измерений и описание экспериментальной установки

Измерения локальных значений коэффициента теплопередачи и коэффициентов конвекции проводятся тепломером 4 (рис.1), состоящим из двух медных хромированных дисков 2 и 3 диаметром 15 мм (ядро), в дисках расположена термопара 4, служащая как для измерения температуры, так и для нагревания ядра. Тепломер крепится к пластине 1 при помощи эботнитовой шпильки 5 диаметром 1 мм. Между ядром и пластиной 1 находится воздушная прослойка 7; наружная щель перекрыта плоским тонким кольцом 6. Наружные поверхности этого кольца, диска 3 и пластины 1 подвергались полировке и хромированию. Пропуская через термопару 4

ток, можно повысить температуру ядра t_r тепломера выше температуры пластины t_n ; далее ток отключается, и термопара работает как датчик температуры ядра. Ядро охлаждается и отдает тепло пластине 1 и в окружающую среду с более низкой температурой t_c (рис.2).

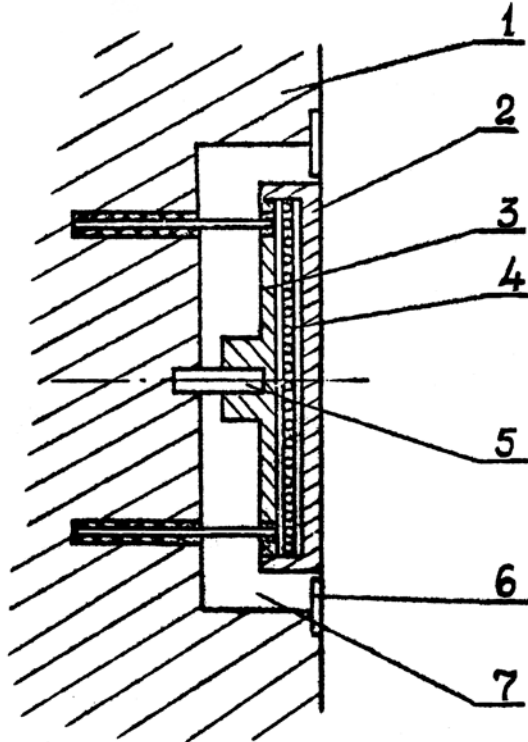


Рис.1. Конструкция тепломера

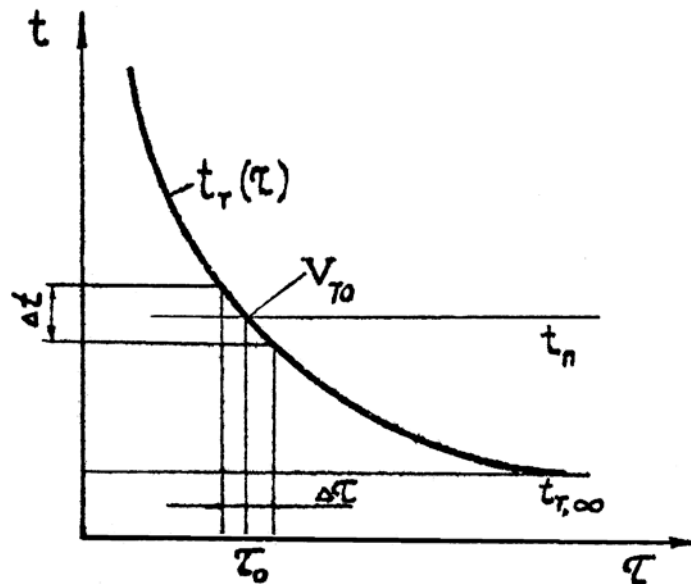


Рис.2. Метод измерения

В момент времени τ_0 температура ядра тепломера и пластины равны, т.е. $t_r(\tau_0) = t_n$, и тепло отдается только во внешнюю среду, удельный поток q в этот момент связан со скоростью V_{τ_0} охлаждения ядра, его теплоемкостью C_T и поверхностью F зависимостью:

$$q = -\frac{C_T}{F} V_{\text{то}} = AV_{\text{то}},$$

$$V_{\text{то}} = \frac{\Delta t}{\Delta \tau}. \quad (9)$$

Размеры и форма пластинки тепломера выполнены таким образом, что закрываемый ею участок поверхности может считаться локальным и изотермическим, она не вносит возмущений в гидродинамический пограничный слой. Степень черноты пластины совпадает со степенью черноты нагретой пластины. Все это обеспечивает равенство потока q_T с тепломера локальному потоку с нагретой пластины в момент $t_n = t_T(\tau_0)$.

Зная тепловой поток (9), легко перейти к локальным коэффициентам теплоотдачи и конвекции. Так, суммарный коэффициент теплоотдачи, обусловленный конвекцией, кондукцией и излучением, определяется по формуле

$$K_{\Sigma} = \frac{AV_{\text{то}}}{\Delta T}, \quad (10)$$

а локальный коэффициент конвекции

$$\varepsilon_k = (K_{\Sigma} - \alpha_n)L/\lambda \quad (11)$$

где α_n – коэффициент теплообмена излучением, Вт/м²К.

Экспериментальная установка предназначена для измерения локальных значений коэффициентов теплопередачи в следующих диапазонах измерения основных определяющих параметров: разность температур между ограничивающими пластинами -20-70 К; толщина прослоек -5, 15, 20, 25 мм; ориентация прослойки – вертикальная и горизонтальная (с верхней и нижней нагретой поверхностью).

Установка состоит из блока питания, пульта, потенциометра и гальванометра.

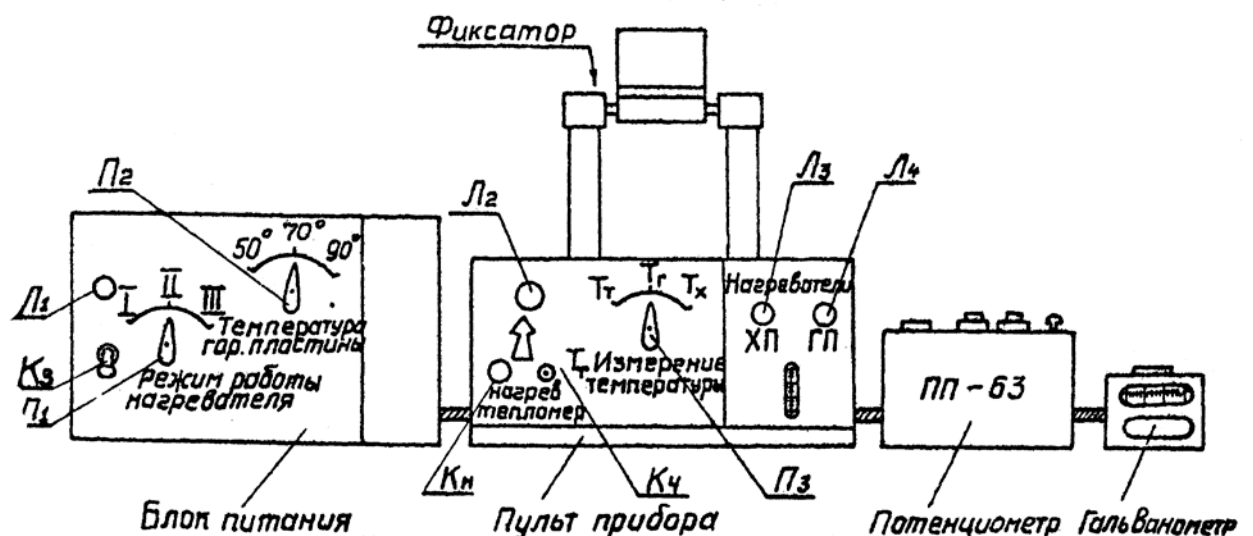


Рис.3. Экспериментальная установка

Основной частью прибора является измерительное устройство (рис.4.). Прослойку образуют две медные пластины 1 и 2 толщиной 10 и диаметром 150 мм. В углубление, выполненное в пластине 1, помещен термомер 5, конструкция которого показана на рис.1. Температура нагретой пластины поддерживается на заданном уровне при помощи электрического нагревателя 3, управляемого блоком питания. Температура «холодной» пластины – при помощи аналогичного нагревателя 4 и воды, циркулирующей по змеевику 6, припаянному к крышке пластины 2. Необходимая толщина прослойки устанавливается с помощью распорных фторопластовых втулок 11, которые надеты на шпильки 12, стягивающие пластины 1 и 2. Торцы прослойки закрыты латунным стаканом 7. Между стаканом и пластинами установлены теплоизоляционные фторопластовые прокладки 8. При помощи поворотного устройства и пружинного фиксатора измерительное устройство фиксируется в нужном положении.

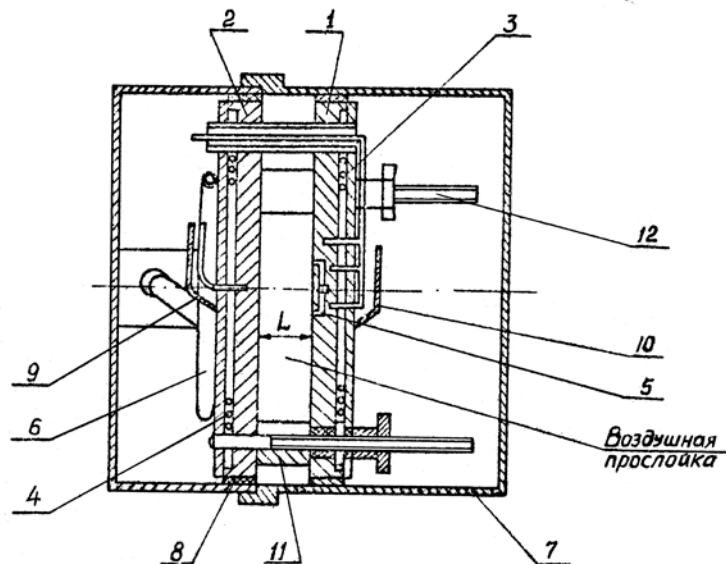


Рис.4. Измерительное устройство.

Для измерения температуры пластин использованы нихром-константановые термопары с диаметром электродов 0,1 мм. На обеих пластинах для охраны термопар от механических повреждений крепятся колодки 9 и 10.

Электрическая схема прибора (рис.5) состоит из двух частей: схемы электропитания и схемы измерения температур и тепловых потоков. Схема электропитания обеспечивает нагревание пластин, образующих прослойку и автоматическое регулирование температуры. Элементы силовой схемы расположены в блоке питания. Измерительная часть силовой схемы расположена в пульте прибора.

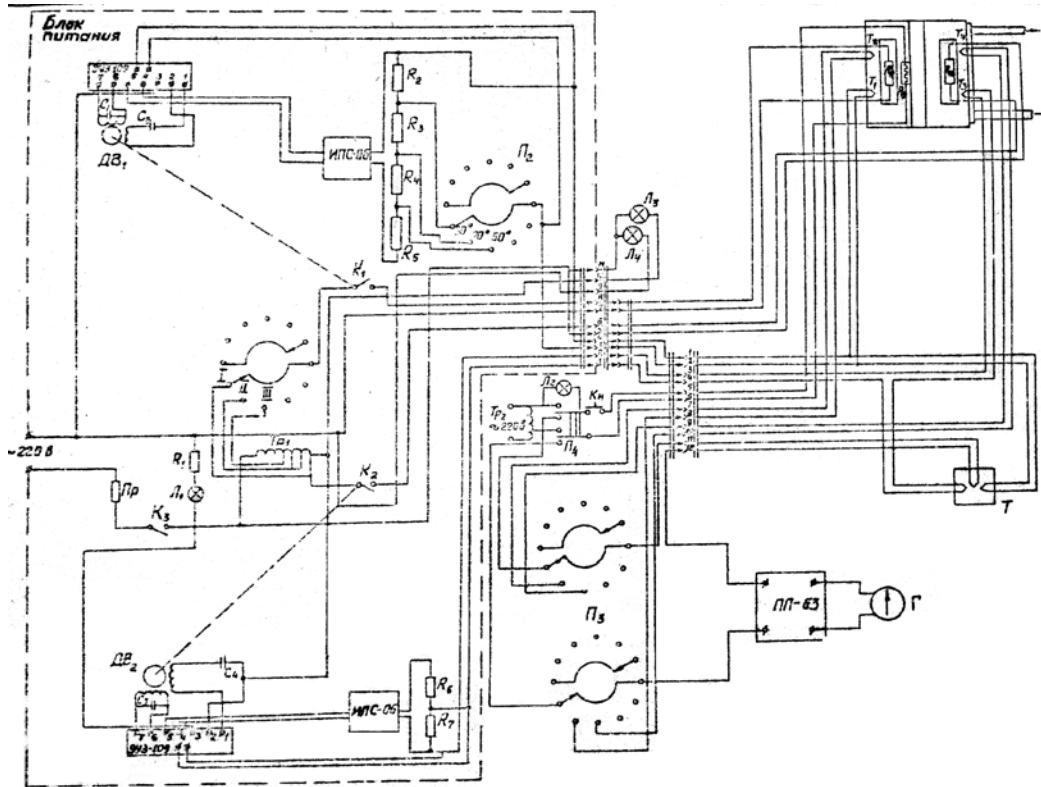


Рис.5 Электрическая схема прибора

Силовая схема включает в себя автотрансформатор Tr_2 типа РНО 250-2, два двигателя $Дв_1$ и $Дв_2$ типа РД-09. При включении тумблера $К_3$ «Сеть» (см. рис.5) напряжение 220 В подается на автотрансформатор и загорается сигнальная лампочка $Л_1$. Напряжение от трансформатора подается на нагреватель «горячей» пластины R_8 . В блоке питания размещены два автоматических регулятора температуры – для «горячей» и для «холодной» пластин. Каждый из регуляторов собран на базе серийного электронного усилителя УЭУ-109 и реверсивного двигателя РД-09.

Рассмотрим работу регулятора температуры «горячей» пластины. С помощью переключателя $П_2$ задаем уровень температуры «горячей» пластины (50°C , 70°C , 90°C). Сигнал от термопары T_1 сравнивается соответственно с падением напряжения на одном из сопротивлений R_2 , R_3 или R_4 . Весь делитель напряжения R_2 , R_3 , R_4 , R_5 подключен к источнику питания стабилизированному – ИПС-06. ИПС выдает на делитель постоянное напряжение. Рабочие сопротивления R_2 , R_3 , R_4 и сопротивление R_5 по своим величинам подобраны так, что падение напряжения на сопротивлении R_2 равно ТЭДС, развиваемой термопарой T_1 при температуре «горячей» пластины $t_{\text{гп}}=90^{\circ}\text{C}$, падение напряжения на R_4 равно ТЭДС T_1 при $t_{\text{гп}}=50^{\circ}\text{C}$.

При отклонении температуры пластины на $\pm 0,3\text{ K}$ от установившегося значения, в цепи термопара T_1 – сопротивление R_2 , или R_3 , или R_4 (в зависимости от заданного уровня температур) появится сигнал рассогласования, который подается на электронный усилитель ЭУЭ-109. С него усиленный сигнал подается на реверсивный двигатель $Дв_1$. В

зависимости от знака сигнала реверсивный двигатель поворачивается в ту или другую сторону. На оси двигателя закреплен рычаг, который при вращении по часовой стрелке замыкает контакт микровыключателя K_1 и подает напряжение на нагреватель «горячей» пластины, загорается сигнальная лампочка L_4 (на пульте она обозначена «ГП»). При вращении мотора в противоположную сторону контакт K_1 размыкается, нагреватель «горячей» пластины обесточивается, лампочка L_4 гаснет.

В отличие от «горячей», «холодная» пластина охлаждается проточной водой. При включении прибора в сеть напряжение от Tr_2 подается на нагреватель «холодной» пластины. В остальном поддержание температуры «холодной» пластины проводится аналогично описанному выше. Уровень регулирования температуры у «холодной» пластины – один ($\approx 25^\circ\text{C}$).

Двухпозиционное регулирование позволяет на протяжении всего опыта поддерживать температуру пластин с погрешностью $\pm 0,3$ К.

Схема измерения ТЭДС термопар и питания тепломера

Схема включает в себя гальванометр М 195/1, потенциометр ПП-63, два переключателя; галетный P_3 и P_4 автотрансформатор типа РН0250-2. Измерительные термопары R_9 , T_2 , T_4 имеют общий холодный спай T , который находится в пассивном термостате из пенопласта. Холодный спай подключается последовательно к каждой из термопар с помощью переключателя P_3 . Переключатель P_3 имеет три положения $t_{гп}$, $t_{хп}$, t_r (на пульте обозначается T_r , T_x , T_r). А этих положениях измеряется соответственно перепад температуры «горячей» пластины, «холодной» пластины и тепломера относительно температуры холодного спаев.

Термометр, расположенный на пульте, показывает температуру, приблизительно равную температуре холодных спаев.

В положении T_r термопара T_2 подключается к потенциометру и по показаниям потенциометра, по градуировке термопары и с учетом температуры холодных спаев можно определить температуру «горячей» пластины. Аналогично при переключении P_3 в положение T_x определяется температура «холодной» пластины. При переключении P_3 в положение T_r и переключателя P_4 в положение T_r аналогично определяем температуру тепломера.

Для нагревания тепломера переключатель P_4 переводится в положение «нагрев». При этом на нагреватель-термопару тепломера подается напряжение ≈ 10 В от автотрансформатора Tr_2 , причем предусмотрена система блокировки: до тех пор, пока не будет нажата кнопка K_n , цепь не замкнется. При подаче напряжения на тепломер загорается сигнальная лампочка L_2 .

Порядок подготовки и проведения опыта

Прежде чем приступить к опыту, необходимо установить определенную толщину прослойки по указанию преподавателя. Для этого нужно взять разрезные втулки, соответствующие указанному размеру L . Прослойке придать вертикальное положение, для чего оттянуть фиксатор, прослойку повернуть вокруг оси и установить вертикально. Затем снять стакан 7 (рис.4), отвинтить гайки, снять старые втулки 11 и установить новые. Толщину прослойки измерить штангенциркулем. После установления зазора заданной величины торцы прослойки снова закрыть стаканом 7. Включить воду и тумблером K_3 подать напряжение на прибор. При этом загорится лампочка L_1 . Переключателем P_2 установить необходимый уровень температуры на «горячей» пластине (по указанию преподавателя), а переключателем P_1 – режим разогрева, соответствующий выбранному уровню температуры (50°C – третий режим; 70°C – второй; 90°C – первый). Причем, вследствие малости напряжения, подаваемого на нагреватель и в третьем режиме разогрева, рекомендуется на уровень 50°C сначала выйти на первом режиме, затем переключиться на третий.

Примерно через 20 – 30 минут после включения прибора температуры пластин достигнут заданной величины. И пластины войдут в стационарный режим, о чем будет свидетельствовать равномерное перемигивание лампочек L_3 и L_4 . Во время выхода прибора на стационарный режим проверить положение «зайчика» нуль-гальванометра и в случае необходимости установить на нуль. В потенциометре установить рабочий ток.

После наступления стационарного режима переключатель P_3 поставить в положение « T_x » и с помощью потенциометра измерить температуру «холодной» пластины в милливольтках. Переключатель P_3 поставить в положение « T_r » и измерить температуру «горячей» пластины в милливольтках. Записать первое показание термометра, установленного на пульте, t_{xc} '.

Затем, переключатель P_3 поставить в положение T_r , а переключатель K_4 – в положение «Нагрев». На 10-14 с замкнуть кнопку K_n (тепломер разогревается). Затем кнопку отпустить, K_4 переключить в положение « T_r » и контролировать температуру тепломера.

Цель: определить время τ прохождения «зайчика» гальванометра между заданными точками, симметрично отстоящими от нуля. Эти точки выбираются так, чтобы время τ прохождения «зайчика» между ними лежало в пределах $10-30^\circ\text{C}$. Обычно этому условию удовлетворяют точки, взятые из ряда (± 5 дел; ± 10 дел; ± 15 дел). Тепломер разогревается до такой температуры, чтобы «зайчик» отклонился на 15-20 делений от первой выбранной точки. (При нагреве «зайчик» отклоняется влево). Например, если выбран интервал ± 10 делений, то тепломер разогревается до такой температуры, чтобы «зайчик» отклонился на -20- -25 делений. Время

прохождения «зайчика» между заданными точками фиксируется по секундомеру.

Опыт повторить семь-девять раз. Затем вторично записать показания термометра t_{xc}' . Температуру холодных спаев принять равной $t_{xc}=0,5(t_{xc}' + t_{xc}'')$.

Результаты измерений записать в табл.1.

Обработка результатов измерений

1. По формуле $t_i = t_{xc} + 24,2E_i$ определить температуры «горячей» и «холодной» пластин прослойки.

2. Найти перепад температуры ΔT между пластинами.

3. Рассчитать среднее время охлаждения тепломера. Для этого из полученных N значений τ_i отбросить наибольшее и наименьшее, а среди оставшихся найти среднее арифметическое:

$$\bar{\tau} = \sum_{i=1}^K \frac{\tau_i}{K}, \text{ где } K = N - 2.$$

4. Найти скорость охлаждения тепломера $V_{то} = \Delta t / \bar{\tau}$, где $\Delta t = M \cdot n$, n – выбранный интервал, дел; M – постоянная прибора, К/дел.

5. Определить суммарный локальный коэффициент теплопередачи K_{Σ} по формуле (10).

6. Определить лучистый коэффициент теплопередачи:

$$\alpha_{л} = 5,67 \cdot 0,045 \frac{\left[\left(\frac{T_{гн}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{хн}}{100} \right)^4 \right]}{\Delta T}.$$

7. Рассчитать локальный коэффициент конвекции ϵ_k по формуле (11).

Содержание отчета

1. Таблица результатов измерений и расчетов по приведенной форме.

2. Расчет локальных и средних значений коэффициентов конвекции для условий проведения экспериментов.

3. Сопоставление опытных и расчетных данных

4. Выводы.

| N | L, мм | Ориен- тация | $t_{xc},$ °C | mV_2 | | mV_x | | $\Delta T,$ К | n, дел | $\Delta t,$ К | τ_i, c | | τ, c | $t_m,$ °C | $\lambda,$ Вт/мК | $K_{\Sigma},$ Вт/м ² К | $\alpha_{л},$ Вт/м ² К | ϵ_k | |
|---|----------|-----------------|-----------------|--------|---|--------|---|------------------|-----------|------------------|-------------|--|-----------|--------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------|--|
| | | | | мВ | К | мВ | К | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Контрольные вопросы

1. При каких условиях возникает конвекция в замкнутых прослойках? От чего зависит интенсивность конвективного теплообмена?
2. Какой физический смысл имеет коэффициент конвекции?
3. Чем отличается локальный коэффициент конвекции ε_k от среднего $\overline{\varepsilon_k}$? Какой коэффициент конвекции измеряется в лабораторной работе?
4. Как устроен тепломер? В чем состоит принцип его работы?
5. Как направлен тепловой поток от пластинки тепломера в момент измерения?
6. Почему требуется охлаждение «холодной» пластины проточной водой?
7. Каким образом проводятся измерения температур пластин и тепломера?
8. По температуре какого элемента контролируется наступление стационарного режима измерительного устройства?
9. Какие исходные данные необходимы для аналитического расчета интенсивности конвективного теплообмена?
10. В каком случае и почему локальный коэффициент конвекции может быть меньше единицы?

Литература

1. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М. Энергия. 1973.
2. Шарков А.В. Конвективный теплообмен в приборах. Автореф. канд. дисс. /Лен. ин-т точной механики и оптики. 1975.
3. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П., Шарков А.В. Экспериментальное исследование локального теплообмена в горизонтальных замкнутых прослойках. – ИФЖ, 1975, т.29, №2.
4. Заричняк Ю.П., Платунов Е.С., Шарков А.В., Способ измерения локальных тепловых потоков. – ИФЖ, 1975, т.28, №2.

Лабораторная работа №2 ТЕПЛООТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ПРОДОЛЬНОМ ОМЫВАНИИ ОДИНОЧНОГО ЦИЛИНДРА

Цель работы – изучение интенсивности конвективного теплообмена при вынужденном продольно омывании воздухом одиночного цилиндра, ознакомление с методами экспериментального исследования и получение навыков в проведении эксперимента.

Программа работы

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и измерительными приборами.
2. Провести измерения интенсивности теплообмена одиночного цилиндра стационарным методом и методом регулярного режима первого рода.
3. Обработать результаты опытов и представить их в обобщенном виде $Nu=f(Re)$.
4. Теоретически рассчитать интенсивность теплообмена цилиндра для условий проведения опытов.
5. Сравнить результаты расчета с данными эксперимента
6. Составить отчет о проделанной работе.

Теплоотдача при вынужденном продольном омывании поверхности

Для простоты будем полагать, что омывается жидкостью плоская поверхность (рис.1), а скорость и температура жидкости вдали от поверхности постоянны и равны соответственно v_0 и t_0 .

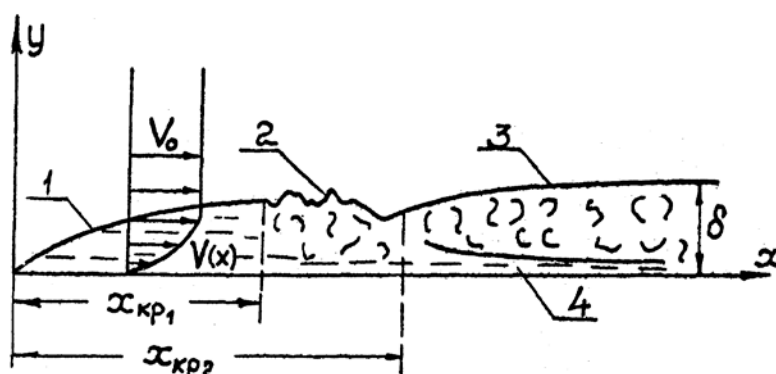


Рис.1. Схема пограничного слоя: 1 – ламинарный пограничный слой; 2 – переходная область; 3 – турбулентный пограничный слой; 4 – ламинарный подслой.

Пусть набегающий поток при $x=0$ имеет равномерный профиль скоростей и температуры. При $x>0$ около стенки образуется гидродинамический пограничный слой, толщина которого возрастает с координатой. В пределах пограничного слоя скорость жидкости меняется от нуля до скорости невозмущенного потока. Течение в пограничном слое может быть как ламинарным, так и турбулентным. Однако в турбулентном слое около стенки пульсации отсутствуют. У стенки образуется тонкий слой жидкости, называемый вязким или ламинарным подслоем, в котором течение имеет характер, в среднем подчиняющийся закономерностям ламинарного движения.

Переход от ламинарной формы движения к турбулентной происходит не в точке, а на некотором участке. Течение на этом участке имеет нестабильный характер и называется переходным. Законы теплообмена при ламинарном и турбулентном режимах различны, поэтому определение их границ имеет существенное значение.

О режиме течения в пограничном слое судят по величине числа Рейнольдса

$$Re_x = \frac{v_0 x}{\nu}, \quad (1)$$

Где v_0 – скорость набегающего потока; ν – кинематическая вязкость жидкости.

Переход к турбулентному режиму может иметь место при значениях $Re_{x,кр}$ примерно от $1 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^5$. Координаты начала разрушения ламинарного слоя ($x_{кр,1}$) и образования устойчивого турбулентного течения ($x_{кр,2}$), зависят не только от Re_x , но и от большого количества факторов: интенсивности теплообмена, изменения давления вдоль поверхности тела, его шероховатости и волнистости, формы передней кромки, вибрации тела. Пульсации потока жидкости (колебания v_0). Все это затрудняет точное определение точек перехода. Представление о локальной теплоотдаче в переходной области дает график (рис.2.), полученный в опытах с воздухом.

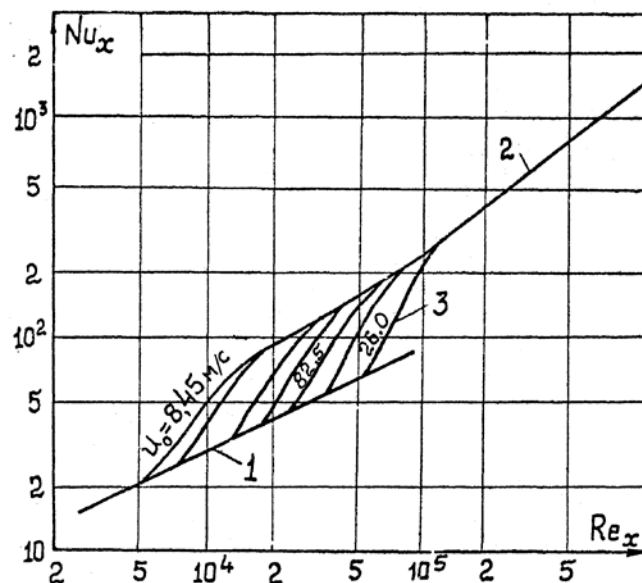


Рис.2. Местная теплоотдача пластины, омываемой продольным потоком воздуха: 1 – теплоотдача при ламинарном пограничном слое, 2 – теплоотдача при турбулентном пограничном слое; 3 – теплоотдача при переходном режиме.

Между кривыми, соответствующими турбулентному 2 и ламинарному 1 пограничным слоям, расположено семейство кривых 3, соответствующих теплопередача в переходной области.

На практике расчеты переходную зону заменяю точкой и приближенно принимают [1]:

$$Re_{x,кр1} = Re_{x,кр2} = Re_{x,кр} = 10^5 \quad (2)$$

При наличии теплообмена кроме гидродинамического образуется также и тепловой пограничный слой. В его пределах температура жидкости изменяется от значения, равного температуре t_0 жидкости вдали от пластины, до температуры t_c поверхности стенки.

Качественное изменение местного коэффициента теплоотдачи по длине пластины показано на рис.3.

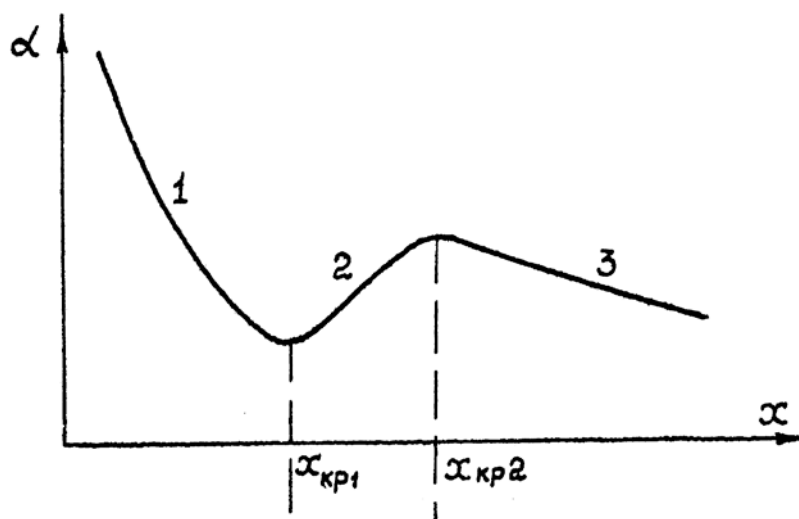


Рис.3. Изменение коэффициента теплоотдачи вдоль плоской поверхности при смешанном режиме течения в пограничном слое: 1 – ламинарный режим, 2 – переходный режим, 3 – турбулентный режим.

На начальном участке пластины 1 уменьшение коэффициента теплоотдачи связано с развитием ламинарного пограничного слоя. При этом

$$Nu_{ж,x} = 0,33 Re_{ж,x}^{0,5} Pr_{ж,c}^{0,33} \left(\frac{Pr_{ж,c}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (3)$$

где Pr – критерий Прандтля, Nu – критерий Нуссельта.

Переходная зона 2 характеризуется увеличением теплоотдачи в связи с появлением турбулентного перемешивания. Для области развитого турбулентного пограничного слоя 3 характерно более плавное изменение α по длине, которое описывается зависимостью [1]:

$$Nu_{ж,x} = 0,03 Re_{ж,x}^{0,8} Pr_{ж,c}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж,c}}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (4)$$

Для определения среднего коэффициента теплоотдачи к воздуху можно использовать более простые соотношения (5) и (6), полученные на основании уравнений (3) и (4), полагая $Pr \approx 0,71$:

а) при ламинарном режиме течения в пограничном слое:

$$\overline{Nu}_{ж,l} = 0,57 Re_{ж,x}^{0,5} \quad (5)$$

б) при турбулентном режиме течения в пограничном слое

$$\overline{Nu}_{ж,l} = 0,032 Re_{ж,x}^{0,8}$$

В расчетных формулах (3)-(6) за определяющую принята температура набегающей на тело жидкости t_0 , что отмечено индексом «ж» (исключение составляет величина Pr_c , выбираемая по температуре стенки). В качестве определяющего размера берется координата x , отсчитываемая от начала пластины, или длина поверхности l , омываемой жидкостью.

Формулы, определяющие теплоотдачу пластины, могут быть использованы также для расчета теплоотдачи при внешнем продольном омывании одиночного цилиндра, если его диаметр существенно больше толщины пограничного слоя [1].

Толщину гидродинамического пограничного слоя можно оценить по формулам [2]:

ламинарный режим:

$$\delta = 4,64 \cdot x \cdot Re_{ж,x}^{-0,5} \quad (7)$$

турбулентный режим:

$$\delta = 0,376 \cdot x \cdot Re_{ж,x}^{-0,2} \quad (8)$$

Описание методики проведения измерений

В лабораторной работе для измерения интенсивности теплообмена одиночного цилиндра используются два метода: стационарный и метод регулярного режима первого рода. Последовательно рассмотрим эти методы:

Стационарный метод. При исследовании коэффициента теплообмена стационарным методом внутри цилиндра монтируется электрический нагреватель. В установившемся тепловом состоянии вся выделяющаяся в нагревателе энергия рассеивается наружными стенками цилиндра; она связана с коэффициентом теплообмена α следующей зависимостью:

$$P = \alpha S(t_c - t_0), \quad (9)$$

где P – мощность нагревателя; S – площадь наружной поверхности цилиндра; t_c и t_0 – температуры поверхности цилиндра и окружающей среды.

Отсюда

$$\alpha = \frac{P}{S(t_c - t_0)} \quad (10)$$

Так как с поверхности цилиндра теплота рассеивается в окружающую среду не только конвективным путем, но и излучением, то полученное значение α является суммарным:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l, \quad (11)$$

где α_k и α_l – конвективная и лучистая составляющие коэффициента теплообмена.

Величина $\alpha_{л}$ может быть вычислена по формуле [3]

$$\alpha_{л} = \varepsilon \cdot c_0 \frac{\left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}{T_c - T_0}, \quad (12)$$

где ε – степень черноты поверхности цилиндра; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $c_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$.

Вычислив величину $\alpha_{л}$ и вычтя ее из суммарного коэффициента теплообмена α , окончательно определим значение $\alpha_{к}$.

Метод регулярного режима. В методе регулярного режима коэффициент теплообмена определяется по формуле [4].

$$\alpha = \frac{1}{\Psi} \cdot \frac{C}{S} m, \quad (13)$$

где Ψ – критерий неравномерности температурного поля исследуемого тела; m – темп охлаждения; C и S – полная теплоемкость и поверхность теплообмена тела.

При охлаждении металлического образца в воздушной среде можно считать, что во все время опыта распределение температуры остается равномерным и $\Psi=1$. Тогда формула (13) принимает вид:

$$\alpha = \frac{C}{S} m \quad (14)$$

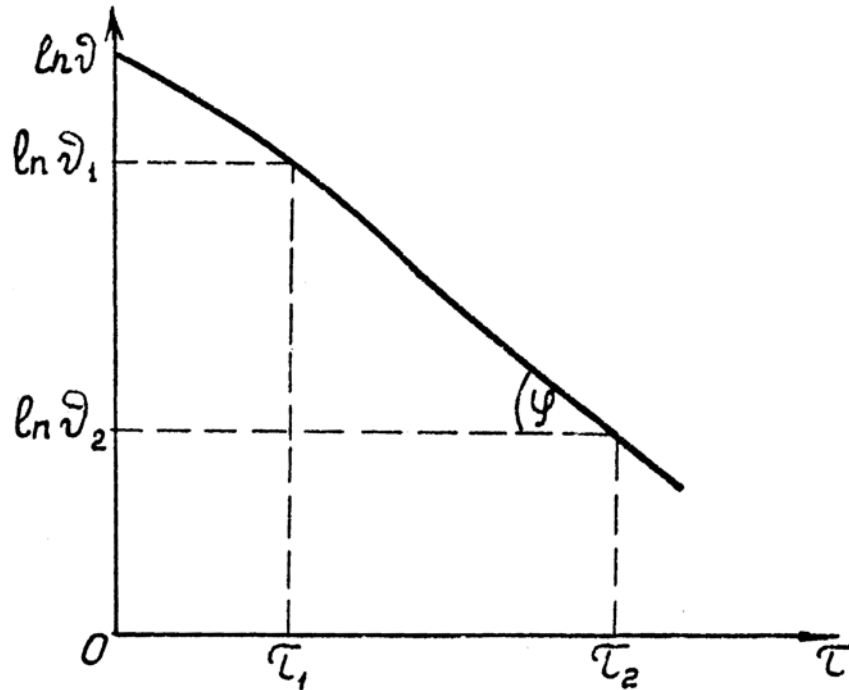
Значение темпа охлаждения может быть найдено в опыте по охлаждению предварительно нагретого образца, погруженного в интересующую экспериментальную среду. В этом случае при наступлении регулярного режима величина перегрева в любой точке тела меняется по экспоненциальному закону [5].

$$\vartheta = \vartheta_0 e^{-m\tau} \quad (15)$$

где $\vartheta = t - t_0$ – величина перегрева тела в момент времени τ ; ϑ_0 – величина перегрева тела в начальный момент времени.

Если построить график в полулогарифмических координатах (по оси ординат откладывать $\ln \vartheta$, а по оси абсцисс – время τ), то получается прямая линия, тангенс угла наклона которой равен темпу охлаждения (рис.4.), т.е.

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (16)$$

Рис.4. К расчету темпа охлаждения m

Учитывая, что перегрев ϑ выражается через показания гальванометра n , дел., чувствительность гальванометра K_u , мВ/дел. и чувствительность термопары K_t , К/мВ,

$$\vartheta = n \cdot K_u \cdot K_t, \quad (17)$$

а также считая, что для небольшого диапазона температуры ($0 < \vartheta < 30$ К), $K_t = \text{const}$, формулу (16) для темпа охлаждения можно представить в виде:

$$m = \frac{\ln n_1 - \ln n_2}{\tau_2 - \tau_1} \quad (18)$$

Таким образом, при определении темпа m нет необходимости знать ни чувствительность термопары, ни чувствительность измерительного прибора, а достаточно построить зависимость натурального логарифма показаний гальванометра от времени:

$$\ln n = f(\tau) \quad (19)$$

Описание установки. Образец (рис.5) состоит из медного корпуса 1, внутри которого на керамическом трубчатом каркасе 2 намотан нагреватель 3.

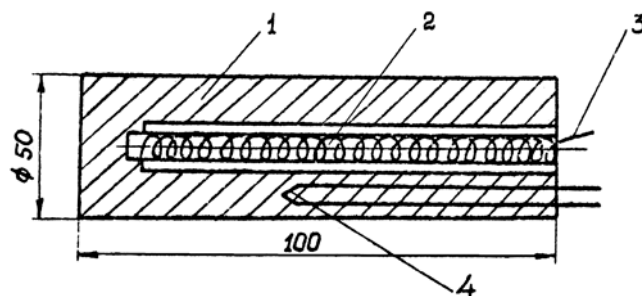


Рис.5. Конструкция образца

Вблизи поверхности цилиндра монтируется спай дифференциальной термопары. Холодный спай термопары располагается в аэродинамической трубе несколько впереди по отношению к набегающему потоку. Спай защищен экраном из алюминиевой фольги. Термопара выполнена из меди и константана.

Основные параметры образца: масса медного корпуса с нихромовым нагревателем $M_k=0,606$ кг; масса керамической трубки $M_T=0,004$ кг; сопротивление нагревателя $R_H=225$ Ом; сопротивление дифференциальной термопары $R_T=10,3$ Ом; истинная теплоемкость меди $C_M=389$ Дж/кгК; истинная теплоемкость керамики $C_T=720$ Дж/кгК.

Смонтированный образец 2 на двух тонких шпильках устанавливается в центральной зоне аэродинамической трубы 1, через которую проходит воздушный поток.

Скорость потока устанавливается путем изменения напряжения на моторе 3 вентилятора с помощью лабораторного автотрансформатора 4 и вольтметра (рис.6)

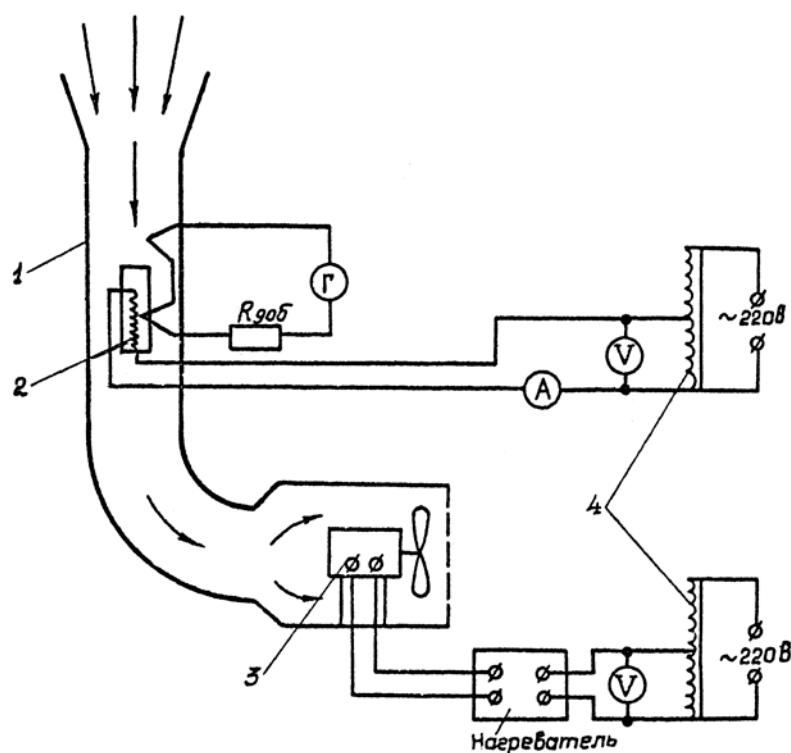


Рис.6. Схема силового питания и температурных измерений: 1 – аэродинамическая труба; 2 – образец; 3 – мотор вентилятора; 4 – автотрансформаторы.

Мощность, подаваемая на нагреватель образца. Измеряется с помощью вольтметра и амперметра. Разность температур между поверхностью цилиндра и воздухом измеряется дифференциальной термопарой из меди и

константана, подключенной через магазин сопротивления $R_{\text{доб}}$ к гальванометру.

Порядок подготовки и проведения опыта

- А. Измерение величины α_k цилиндра стационарным методом.
1. Установить скорость воздушного потока $v=10\text{ м/с}$. ($U=190\text{ В}$);
 2. Подать на нагреватель образца напряжение 40 В ;
 3. Проверить механический нуль гальванометра, закоротив термопару.
 4. Дождаться установления стационарного режима и записать показания термопары;
 5. Определить поверхность цилиндра и по формуле (10) рассчитать полный коэффициент теплообмена α .
 6. По формуле (12) рассчитать α_l и по уравнению (11) найти α_k . Степени черноты поверхности цилиндра принять равной $\varepsilon=0,9$.

Б. Измерение величины α_k цилиндра методом регулярного режима первого рода.

1. Опыт проводится при той же скорости воздушного потока $v=10\text{ м/с}$ ($U=190\text{ В}$) и той же мощности нагревателя ($U_n=40\text{ В}$).
2. Выключить вентилятор аэродинамической трубы и дождаться, когда «зайчик» гальванометра отклонится на 140 дел.
3. Включить вентилятор см.п.1. и выключить нагреватель образца. Снять кривую охлаждения образца, записывая показания гальванометра через 1 минуту.
4. Провести повторный опыт, начиная с п.1; результаты двух опытов свести в таблицу.

Таблица 1.

| № опыта | № Результаты измерений | τ , МИН | | | | | | | | | | |
|---------|------------------------|--------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---|
| | | | | | | | | | | | | 0 |
| 1 | n | | | | | | | | | | | |
| | $\ln n$ | | | | | | | | | | | |
| 2 | n | | | | | | | | | | | |
| | $\ln n$ | | | | | | | | | | | |

5. По данным двух опытов построить сводный график зависимости $\ln \bar{n} = f(\tau)$ и определить величину темпа m .
6. По формуле (14) найти значение полного коэффициента теплообмена α .
7. По формуле (12) рассчитать лучистую составляющую α_l коэффициента теплообмена. Величину T_c принять равной ее среднему

значению на соответствующем прямолинейном участке полулогарифмического графика:

$$T_c = T_0 + \vartheta = K_r \cdot K_u \left(\frac{n_1 + n_2}{2} \right) + T_0.$$

8. Вычислить конвективную составляющую α_k коэффициента теплообмена.

9. Сравнить значения α_k , полученные в стационарном и регулярном режимах, с теоретическим расчетом по формулам (5) или (6).

В. Определение зависимости $\overline{Nu} = f(Re)$

1. Повторить измерения двумя методами α_k при других скоростях движения воздушного потока $v_2=8$ и $v_3=6$ м/с. Для этого установить напряжение на моторе вентилятора, равное 155 и 100 В соответственно.

2. По средним значениям $\overline{\alpha_k}$, полученным двумя методами для трех скоростей потока, построить графики зависимостей $\overline{Nu} = f(Re)$.

Содержание отчета

1. Результаты измерений и их обработка. Зависимость $\overline{Nu} = f(Re)$.
2. Теоретический расчет интенсивности конвективного теплообмена для условий проведения экспериментов.
3. Сопоставление опытных и расчетных данных
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Как осуществляется переход от ламинарной формы движения к турбулентной?
2. Как проходит изменение коэффициента теплоотдачи от плоской поверхности?
3. При каких условиях возможно использование формулы, определяющие теплоотдачу пластины, для расчета теплоотдачи при внешнем продольном омывании одиночного цилиндра?
4. Как изменится коэффициент α , если измерение поверхности провести до установления стационарного режима?
5. Как изменится результат измерения α в стационарном и регулярном режимах, если спай термопары расположить за цилиндром по ходу омывающего потока?
6. В чем заключаются основные теоретические предпосылки теории регулярного режима первого рода?
7. Что такое темп охлаждения m ?
8. Почему в настоящей работе критерий Ψ принят равным единице?
9. Как учитывается лучистая составляющая коэффициента теплообмена цилиндра?

10. Как влияет неточность знания чувствительности термопары и гальванометра на измерение темпа охлаждения?

11. Какие значения величин перегревов цилиндра являются допустимыми при измерениях методом регулярного режима первого рода? Почему?

12. Как влияет на конечные результаты измерений, проводимых в стационарном и регулярном режимах положения спая термопары на поверхности цилиндра при неравномерном распределении температуры по его длине?

Литература

1. Исачено В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С., Теплопередача. – М.: Энергия, 1981.
2. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М., Теория тепло- и массообмена. – М.: Госэнергоиздат, 1961.
3. Михеев М.А., Михеева И.М., Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973
4. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. – М.: Машгиз, 1957.
5. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. – М.: ГИТТЛ, 1954.

Лабораторная работа №3

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В КАНАЛАХ

Цель работы: - углубление знаний по конвективному теплообмену при вынужденном движении однофазной среды на гидродинамическом начальном участке плоского канала, ознакомление с методикой исследования и получение навыков проведения эксперимента.

Программа работы:

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и измерительными приборами.
2. Провести измерения интенсивности теплообмена.
3. Обработать результаты опытов и проставить их в обобщенном виде $\overline{Nu} = f(Re)$.
4. Теоретически рассчитать интенсивность теплообмена для условий проведения опытов.
5. Сравнить результаты расчета с данными эксперимента.
6. Составить отчет о проделанной работе.

Теплообмен в каналах при вынужденном течении однофазной жидкости

При вынужденном движении жидкости различают три режима течения: ламинарный, переходный и турбулентный. О режиме движения судят по

критической величине числа Рейнольдса $Re = \nu d_{эк} / \nu$, где ν – скорость течения жидкости; $d_{эк}$ – эквивалентный гидравлический диаметр канала; ν – кинематическая вязкость жидкости. Опыты показывают, что переход к турбулентному режиму может иметь место при значениях $Re_{кр}$ от 2000 до 10000. На рис.1. приведены профили распределения скоростей по сечению канала, справедливые лишь для гидродинамического стабилизированного течения жидкости при ламинарном (рис.1, а) и турбулентном (рис.1, б) режимах. Напомним, что стабилизация движения наступает на некотором расстоянии l_n (рис.2) от входа в канал (l_n – длина гидродинамического участка стабилизации). На рис.2, а – ламинарное течение, на рис.2.б – турбулентное. Аналогично наблюдается стабилизация теплообмена и формирование профиля температур (рис.3).

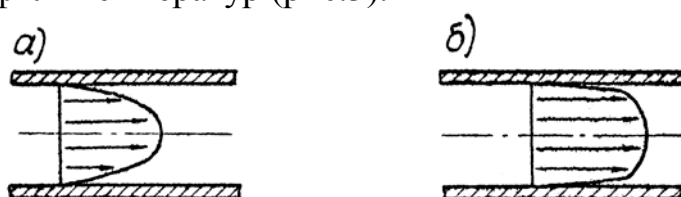


Рис.1 Распределение скоростей по сечению канала: а) ламинарное течение, б) турбулентное течение

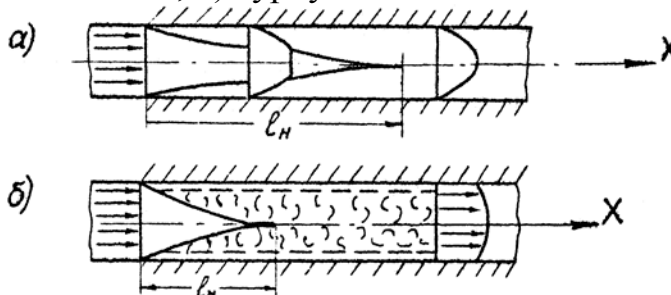


Рис.2. Гидродинамическая стабилизация течения жидкости в канале: а) ламинарное течение, б) турбулентное течение

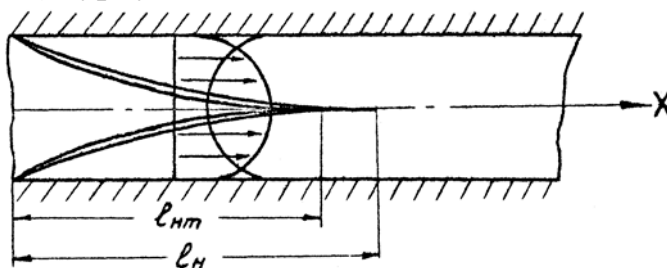


Рис.3. Одновременное развитие теплового и динамического пограничных слоев на начальном участке

Рассмотрим процесс теплообмена при движении жидкости в канале. Около поверхности канала образуется тепловой пограничный слой, толщина которого увеличивается в направлении движения потока. В пограничном слое происходит изменение температуры жидкости от значения, равного температуре стенки t_c до температуры набегающего потока t_0 . Эта

температура сохраняется в центральной части канала, пока еще пограничные слои не сомкнулись. Напомним, что в зависимости от числа Прандтля Pr толщина теплового пограничного слоя может быть как больше толщины гидродинамического пограничного слоя (при $Pr < 1$), так и меньше ее ($Pr > 1$). При $Pr = 1$ эти толщины одинаковы.

Зависимости для расчета интенсивности теплообмена при вынужденной конвекции представляют, как правило, в критериальном виде:

$$\overline{Nu} = f(Re, Pr) \quad (1)$$

Различают местное число Нуссельта Nu , характеризующее теплообмен в конкретном сечении канала, и среднее \overline{Nu} , характеризующее теплообмен на всем участке.

Для расчета среднего числа \overline{Nu} и, следовательно, α

$$\overline{\alpha} = \frac{Q}{F(\overline{t_{ж}} - t_c)} = \frac{q}{\overline{t_{ж}} - t_c} \quad (2)$$

необходимо в общем случае знать средние по длине канала значения температуры жидкости $\overline{t_{ж}}$ и стенки $\overline{t_c}$. Если температура изменяется незначительно, то осреднение температуры $t_{ж}$ по длине производится следующим образом.

При небольшом изменении температуры жидкости в канале ее средняя величина $\overline{t_{ж}}$ может быть определена как среднее арифметическое из значений средних температур в начальном $\overline{t_{ж}'}$ и конечном $\overline{t_{ж}''}$ сечениях канала:

$$\overline{t_{ж}} = 0,5(\overline{t_{ж}'} + \overline{t_{ж}''}) \quad (3)$$

В общем случае осреднение производится по формуле

$$\overline{t_{ж}} = t_c \pm \Delta t_{лог}, \quad (4)$$

где знак «+» берется в случае охлаждения, а знак «-» в случае нагревания жидкости по длине канала.

Величина $\Delta t_{лог}$, называемая среднелогарифмическим температурным напором, определяется из соотношения:

$$\Delta t_{лог} = \frac{(\Delta t' - \Delta t'')}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} \quad (5)$$

где $\Delta t'$ и $\Delta t''$ - температурные напоры в начальном и конечном сечениях канала.

Следует отметить, что среднелогарифмический температурный напор всегда меньше среднеарифметического, но при $\frac{\Delta t'}{\Delta t''} < 2$ разница между ними оказывается менее 4%.

Для приближенного расчета среднего коэффициента теплоотдачи можно воспользоваться следующими соотношениями:

$$\overline{Nu}_{h,ж} = 1,4(\text{Re}_{h,ж} h/l)^{0,4} \text{Pr}_{ж}^{0,33} (\text{Pr}_{ж}/\text{Pr}_c)^{0,25},$$

$$l/h > 10, 10 < \text{Re}_{h,ж} < 2000; \quad (6)$$

$$\overline{Nu}_{d,ж} = 0,0021 \text{Re}_{d,ж}^{0,8} \text{Pr}_{ж}^{0,43} (\text{Pr}_{ж}/\text{Pr}_c)^{0,25} \varepsilon_l, \text{Re}_{d,ж} > 10^4 \quad (7)$$

В равенствах (6) и (7) индексы «ж» и «с» означают, что физические свойства выбираются по средней температуре жидкости и стенки соответственно; « h » и « d » означают, что в качестве определяющего размера выбрана высота канала h или эквивалентный гидравлический диаметр d ; коэффициент ε_l учитывает изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине канала l . Если $l/d > 50$, то $\varepsilon_l = 1$. При $l/d < 50$ необходимо учитывать влияние начального термического участка. Значения ε_l табулированы и приведены в работе [2].

Для воздуха соотношения (6) и (7) упрощаются (так как $\text{Pr} \approx 0,7$ и $\text{Pr}_{ж}/\text{Pr}_c \approx 1$) и принимают вид

$$\overline{Nu}_{h,ж} = 1,25(\text{Re}_{h,ж} h/l)^{0,4} \quad (8)$$

$$\overline{Nu}_{d,ж} = 0,018 \text{Re}_{d,ж}^{0,8} \varepsilon_l \quad (9)$$

Более точные соотношения для расчета интенсивности теплообмена при течении жидкости в трубах и каналах при ламинарном, переходном, турбулентном режимах и при влиянии различных факторов (профиля температуры и скорости жидкости на входе, характера изменения температуры стенки по длине канала, шероховатости стенок и т.д.) содержатся в работах [1, 3, 4, 5, 6].

Описание экспериментальной установки

В настоящей лабораторной работе изучается средний коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$. Общий измерительного устройства показан на рис. 4. Для изучения среднеповерхностного коэффициента теплообмена в плоском канале использован метод «дополнительной стенки». Канал образован двумя металлическими пластинами 1 размером 150x200 мм, которые находятся в механическом контакте с плоскими тепломерами. Тепломеры состоят из набора пластин: дюралюминиевой 2 (толщина 4 мм), текстолитовой 3 (толщина 4 мм), латунной 4 (толщина 15 мм). Пластины 2, 3, 4 соединены эпоксидной смолой. В пазы пластин 4 впаяны медные змеевики 5. По змеевикам циркулирует вода. Температура которой поддерживается неизменной с помощью термостата 14 с погрешностью $\pm 0,1$ К. Движение воздуха в канале обеспечивается вытяжным вентилятором 8, производительность которого регулируется с помощью автотрансформатора 9, электрическое питание которого осуществляется через стабилизатор 10. Скорость протекающего воздуха определяется с помощью пневмометрической трубки 6 и набора сопел 7, которые соединены с микроманометром 11. Для создания равномерного температурного поля

воздуха на выходе из канала служит специальное перемешивающее устройство 12. Температура воздуха на выходе из канала измеряется по показаниям термопары, установленной на медной пластине 13, на входе – ртутным термометром 15.

Схема температурных измерений представлена на рис.5. Датчиками температуры являются манганин-константановые термопары с диаметром электродов 0,12 мм. На каждой из пластин (рис.4.) установлено по четыре дифференциальных термопары. Холодный спай, общий для всех дифференциальных термопар, термостатирован, температура его измеряется ртутно-стеклянным термометром. Перепад температур на рабочем слое изоляции тепломеров измеряется многоспайными термостолбиками.

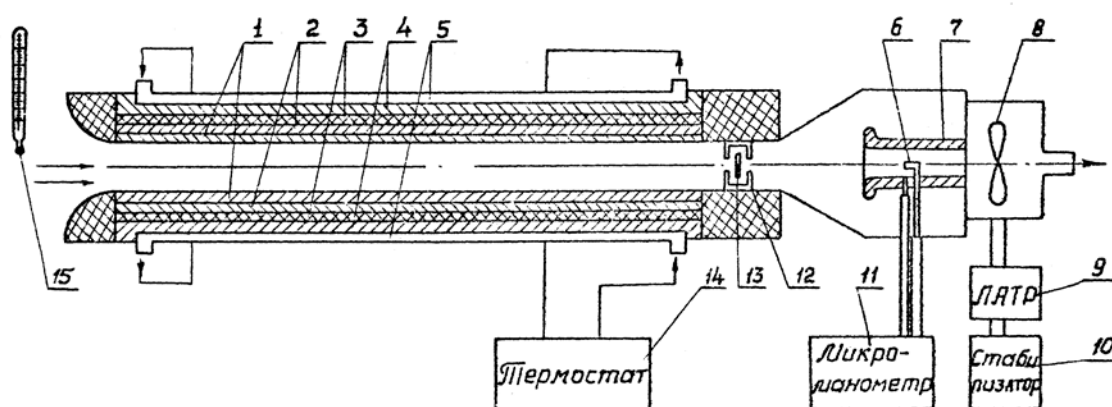


Рис 4. Схематическое изображение экспериментальной установки

Температурные перепады регистрируются потенциометром ППТН-1 с гальванометром М 195/1 в качестве нуля-прибора.

Ключ K_1 служит для последовательного подключения термопар и термостолбиков к измерительным приборам. Ключ K_2 – для отсоединения от измерительной цепи термопары холодного спая (это необходимо при снятии показаний термостолбика).

Порядок подготовки и проведения опыты

Прежде чем приступить к работе, необходимо получить у преподавателя исходные данные: вид профиля канала, скорости течения воздуха, диаметр сопла, температуру воды в термостате.

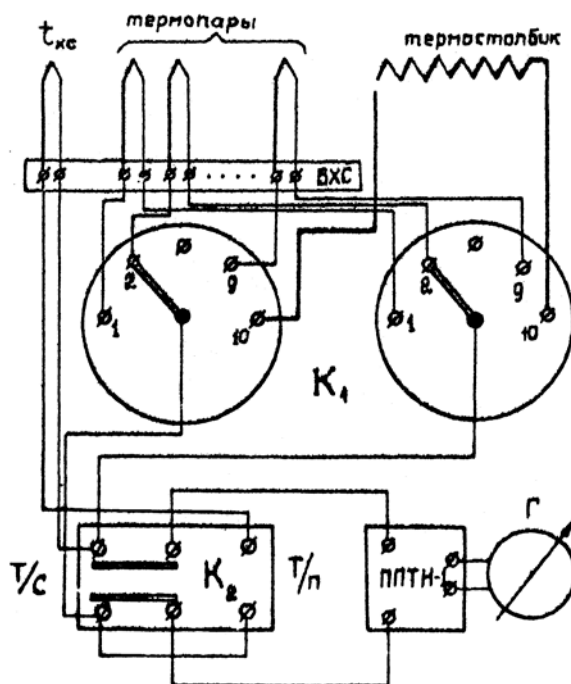


Рис.5. Схема измерений температур

Затем включить термостат и установить необходимый уровень температуры воды. Включить стабилизатор напряжения и при помощи лабораторного трансформатора по показаниям микроманометра установить необходимую скорость течения воздуха в канале. Примерно через 40 минут после включения установки температура пластин, образующих канал, войдет в стационарный режим, о чем будет свидетельствовать неизменность показаний термопар 1-8 (ключ K_1) во времени.

После наступления стационарного состояния произвести следующие измерения и занести их в таблицу:

- 1) скорость течения воздуха в канале (по показаниям микроманометра);
- 2) температуру воздуха на входе в канал (по показаниям термометра 15 (рис.4);
- 3) температуру холодного спая (по показаниям термометра ртутно-стеклянного);
- 4) величину перегрева воздуха на выходе из канала (переключатель K_2 – в положение «т/с», K_1 – в положение «9»);
- 5) величину перегрева стенок канала (переключатель K_2 – в положение «т/п», K_1 – в положение «1-8»);
- 6) показания термостолбика (переключатель K_2 – в положение «т/с», K_1 – в положение «10»);
- 7) повторить замеры по первым четырем пунктам;
- 8) установить новую скорость течения воздуха (из ряда, заданного преподавателем);
- 9) после наступления стационарного режима проделать операции по пунктам 1-7 и т.д.

Обработка результатов измерений

1. Определить значения величин перегревов стенок канала по формуле $g_{i,k} = 23,4 \cdot E_{i,k}$, где $E_{i,k}$ – показания дифференциальных термопар, мВ.

2. Найти среднюю температуру стенок канала $\bar{t}_c = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 g_{i,k} + \bar{t}_{xc}$, где \bar{t}_{xc} – среднее арифметическое значение температуры холодного спая дифференциальной термопары, °С.

3. Определить значение теплового потока, который уносится воздухом, по формуле $Q'_{\Sigma} = 10,1 \cdot E_Q$, где E_Q – показания термостолбика тепломера, мВ.

4. Определить скорость v течения воздуха в канале:

$$v = \sqrt{2\gamma h' / \rho S_{\text{сопла}} / S_{\text{канала}}},$$

где ρ – плотность воздуха; γ – удельный вес манометрической жидкости; h' – высота столба манометрической жидкости; $S_{\text{сопла}}$, $S_{\text{канала}}$ – площади поперечного сечения сопла и канала.

5. Рассчитать тепловой поток Q_{Σ} , уносимый воздухом, вторым методом по известной скорости течения воздуха v , температуре воздуха на входе в канал $t_{ж}'$ и на выходе из канала $t_{ж}''$:

$$Q_{\Sigma}'' = c v S_k \rho (t_{ж}'' - t_{ж}'),$$

где c – удельная теплоемкость воздуха при температуре $t_m = 0,5(t_{ж}' + t_{ж}'')$ Дж/кгК; S_k – площадь поперечного сечения канала, м²; ρ – плотность воздуха при температуре t_m , кг/м³.

6. Найти средний коэффициент теплообмена $\bar{\alpha}$ в канале: $\bar{\alpha} = \frac{Q_{\Sigma}}{F(t_c - t_{ж})}$,

где F – площадь теплоотдающей поверхности канала, м². $Q_{\Sigma} = 0,5(Q_{\Sigma}' + Q_{\Sigma}'')$ – тепловой поток, уносимый протекающим по каналу воздухом, Вт.

7. Заполнить таблицу.

8. Построить графики зависимости $Nu = f(Re)$

ПРИМЕЧАНИЕ. В случае исследования теплообмена в канале со сложным профилем поверхности сравнить результаты измерений с теоретической зависимостью $Nu = f(Re)$ для канала с гладкими стенками равного гидравлического диаметра.

Содержание отчета

1. Таблица результатов измерений и расчетов по приведенной форме.

2. Теоретический расчет средних чисел \bar{Nu} для условий проведения опытов.

3. График теоретической зависимости $\bar{Nu} = f(Re)$ с нанесенными на него результатами опытов.

4. Выводы

Контрольные вопросы

1. Чем различаются локальный и средний коэффициенты теплообмена?
2. Как определить режим течения жидкости в канале?
3. Какой вид имеют профили скоростей и температуры при различных режимах течения жидкости в канале?
4. В чем состоят основные отличия при течении жидкости в канале и в случае продольного обтекания пластины?
5. Какой физический смысл имеет поправка ϵ_1 в формуле (7)?
6. Когда коэффициент теплообмена в каналах можно оценивать по формулам, справедливым для продольного обтекания пластины?
7. Какой закон лежит в основе метода измерения тепломером теплового потока от стенки канала к воздуху?
8. При каком положении тумблеров на пульте необходимо производить измерение сигналов термостолбика и термопар?
9. Каков принцип действия микроанометра «Аскания»?
10. Каким образом проводится измерение скорости течения воздуха в канале?

Литература

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С., Теплопередача. – М.: Энергия, 1981.
2. Михеев М.А., Михеева И.М., Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973
3. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости. – М.: Энергия, 1967
4. Кейс В.М. Конвективный тепломассообмен. – М. Энергия, 1972.
5. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Теплообмен в ядерных энергетических установках. – М.: Атомиздат, 1974.
6. Сукомел А.С., Величко В.И., Абросимов Ю.Г. Теплообмен и трение при турбулентном течении газа в коротких каналах. –М.: Энергия, 1979.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ И ЭНЕРГОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Начало теплофизической научной школы в университете было положено организацией в 1938 году кафедры приборов теплосилового контроля, заведующим которой стал профессор, доктор технических наук Г.М.Кондратьев (1887-1958). В 1954 году вышла в свет его монография «Регулярный тепловой режим». Изложенные в ней идеи впоследствии были успешно применены в различных областях, например, при создании нового типа приборов для исследования теплофизических свойств веществ и параметров теплообмена. В начале 50-х годов началась разработка методов теплового расчета радиоэлектронных устройств, а в дальнейшем и других приборов – оптических, оптико-электронных, гироскопических. Серия этих работ была выполнена под руководством Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, профессора, доктора технических наук Дульнева Г.Н., возглавлявшего кафедру с 1958 года по 1995 год. В результате был создан новый математический аппарат анализа теплового режима сложных технических систем и приборов, разработаны методы проектирования приборов с заданным тепловым режимом. Комплекс этих работ признается и в нашей стране, и за рубежом как новое научное направление в теплофизике. Кафедра приборов теплосилового контроля за свою многолетнюю историю не раз изменяла свое название. Так, с 1947 года она именовалась кафедрой тепловых и контрольно-измерительных приборов, с 1965 года – кафедрой теплофизики, с 1991 года – кафедрой компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга. Однако основным направлением ее научной и педагогической деятельности оставалось применение учения о теплообмене в физике и приборостроении. С 1995 года заведующим кафедрой является профессор, доктор технических наук А.В.Шарков.

Многолетняя деятельность кафедры привела к созданию научной и педагогической школы теплофизиков-приборостроителей, из которой вышли доктора наук А.Н.Гордов, А.И.Лазарев, Г.Н.Дульнев, Б.Н.Олейник, Е.С.Платунов, Н.А.Ярышев, В.Н.Васильев, Ю.П.Заричняк, А.В.Шарков и другие ученые-теплофизики.

Сотрудники кафедры принимали участие в разработке нового поколения вычислительных машин, исследовании термооптических явлений в космических комплексах, в реализации международных программ космических исследований. Так, предложенные на кафедре методы были использованы при проектировании телевизионных камер космических аппаратов в проекте «ВЕГА», при создании лазерного устройства в проекте «ФОБОС». Возможности разработанных на кафедре методов математического моделирования тепловых процессов в сложных системах и технике теплофизического эксперимента были продемонстрированы при анализе

процессов теплообмена в организме человека; при создании электрогенераторов, работа которых использует явления сверхпроводимости; при создании оригинальных образцов оборонной, медицинской и измерительной техники.

В рамках традиционных направлений развиваются работы по созданию методов и приборов для измерения температуры, тепловых потоков, теплофизических свойств веществ, исследования коэффициентов переноса в неоднородных средах, а также работы по созданию принципиально новых композиционных материалов – особо прочных, термостойких, теплоизоляционных и т.д.

В последние годы наряду с традиционными научными направлениями появился ряд новых направлений, связанных с экологическим мониторингом, энергосберегающими технологиями, биологией и медицинским теплофизическим приборостроением. На базе ведущихся на кафедре научных исследований осуществляется обучение молодых специалистов, первый выпуск которых по специальности «Теплофизика» состоялся в 1969 году. В 1998 году кафедра получила также право обучения по новому для нашего университета направлению – «Техническая физика». В июне 1998 года состоялся первый выпуск бакалавров, а в 2000 году – магистров. На кафедре ведется подготовка научных кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре по специальностям 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника» и 05.11.01 «Приборы и методы измерения тепловых величин». Сейчас коллектив кафедры продолжает развитие как ставших уже традиционными научных направлений и направлений подготовки специалистов, так и ведет поиск в новых областях науки и техники.

Кораблев Владимир Антонович
Минкин Дмитрий Алексеевич
Шарков Александр Васильевич

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ ТЕОРИЯ
ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49