

Министерство образования Российской Федерации
Ивановский государственный энергетический университет
Кафедра теоретических основ теплотехники

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ
ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ
ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА
МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Методические указания по выполнению
лабораторной работы при изучении дисциплины
"Тепломассообмен"

Иваново 2004

Составитель А.А. ВАРЕНЦОВ

Редактор В.В. БУХМИРОВ

Методические указания предназначены для выполнения студентами лабораторной работы по исследованию теплоотдачи в условиях естественной (свободной) конвекции около поверхности вертикального цилиндра (трубы) в атмосфере различных газов (водород, воздух, двуокись углерода и азот) методом имитационного моделирования на ЭВМ.

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

Методические указания содержат задание на выполнение работы, основные теоретические сведения об исследуемом процессе и используемых методах измерения физических величин, описание экспериментальной установки и оборудования, порядок проведения опытов, обработки полученных данных и представления результатов, вопросы для подготовки к защите (отчету) по работе в целом.

Методические указания утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ

Рецензент

кафедра теоретических основ теплотехники Ивановского государственного энергетического университета

СОДЕРЖАНИЕ

ЗАДАНИЕ	4
ОСНОВЫ ТЕОРИИ	4
1. Конвективная теплоотдача. Элементы теории пограничного слоя	4
2. Уравнение конвективной теплоотдачи. Средний коэффициент конвективной теплоотдачи	7
3. Локальный (местный) коэффициент конвективной теплоотдачи	8
4. Характер изменения локального коэффициента теплоотдачи	10
5. Расчет локального коэффициента теплоотдачи с помощью критериального уравнения	11
6. Числа (критерии) подобия	12
7. Определяющий (характерный) размер	15
8. Определяющая (характерная) температура	15
9. Сложный теплообмен	16
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА	17
10. Описание экспериментальной установки	17
10.1. Рабочий участок	17
10.2. Пульты управления	19
11. Порядок проведения опыта	21
12. Обработка результатов измерений	23
13. Получение критериальной формулы	26
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	28
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	30
ПРИЛОЖЕНИЕ. Свойства газов при температуре 20 °С.	31

ЗАДАНИЕ

1. На основе опыта определить совокупность локальных коэффициентов конвективной теплоотдачи по высоте наружной поверхности вертикального цилиндра (трубы) к окружающей газовой среде в условиях естественной конвекции.

2. По результатам опытов получить критериальные зависимости вида $Nu_x = f(Ra_x)$, справедливые для характерных областей течения (ламинарной и турбулентной).

3. Сравнить графически результаты, полученные с использованием: а) опытных данных; б) известных критериальных формул; в) полученных Вами критериальных формул.

4. Составить отчет, содержащий: а) схему экспериментальной установки; б) таблицу наблюдений и обработки данных; в) промежуточные и окончательные результаты всех расчетов и пояснения к ним; г) графики полученных зависимостей; д) выводы.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ

1. Конвективная теплоотдача. Элементы теории пограничного слоя

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

Сочетание теплопроводности и конвекции теплоты, наблюдаемое в движущихся газах и жидкостях¹ (текучих средах), называют *конвективным теплообменом.*

Если конвективный теплообмен происходит между поверхностью стенки и жидкостью, омывающей эту поверхность, то такой вид теплообмена называют *конвективной теплоотдачей* (рис.1,а).

Теплота может переходить как от стенки к жидкости, если $t_c < t_{ж}$, так и в обратном направлении, если $t_c > t_{ж}$. В зависимости от причин движения жидкости различают теплоотдачу

¹ Далее будем использовать только термин «жидкость», понимая под этим и газы (сжимаемая жидкость).

при *вынужденном* и *свободном (естественном)* движении (конвекции).

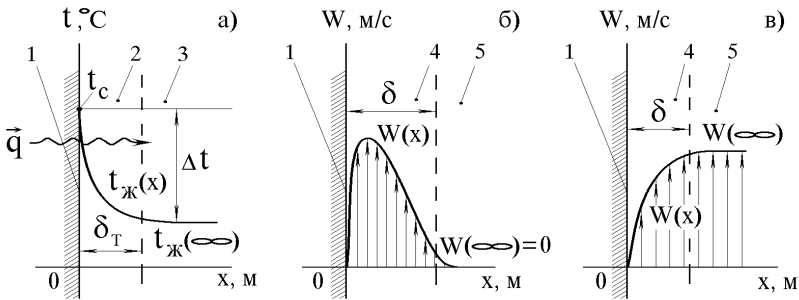


Рис.1. Поле температуры (а) и поля скорости при свободном (б) и при вынужденном (в) движении жидкости: 1 - стенка; 2 - тепловой пограничный слой; 3 - тепловое ядро потока; 4 - гидродинамический пограничный слой; 5 - гидродинамическое ядро потока

Вынужденное движение обусловлено внешними, не зависящими от теплообмена причинами (действием насоса, вентилятора, ветра, движением тела в жидкости и т.п.).

Свободное (естественное) движение возникает под действием теплообмена около поверхности вследствие разности плотностей слоев жидкости, имеющих разную температуру: более легкие нагретые слои вытесняются вверх более тяжелыми холодными слоями. Свободное движение возникает лишь около поверхности теплообмена (рис.1,б). На некотором удалении от поверхности теплообмена жидкость практически неподвижна.

При любом типе движения жидкости в зависимости от его интенсивности различают следующие режимы.

Ламинарный режим - это спокойный, "слоистый", медленный режим течения. Слои жидкости движутся параллельно друг другу, обтекая поверхность теплообмена без перемешивания. Теплоотдача в этом режиме наиболее слабая, так как теплота передается поперек слоев жидкости только теплопроводностью.

Турбулентный режим - это интенсивный, вихревой режим движения. Слои жидкости теряют устойчивость, разрушаются, хаотически перемешиваясь друг с другом, образуя вихри различных размеров. Теплоотдача здесь идет интенсивнее, чем в

ламинарном режиме, вследствие турбулентного перемешивания, обеспечивающего дополнительный перенос теплоты вихревой конвекцией.

Переходный режим - это промежуточный режим, при котором ламинарное движение уже разрушилось, а развитый турбулентный режим еще не достигнут. В частности, возможно периодическое чередование в потоке областей ламинарного течения и турбулентных "пятен". Интенсивность теплоотдачи также занимает промежуточное положение, отличаясь неустойчивостью и нерегулярностью. Поэтому переходный режим наиболее труден для расчета теплоотдачи.

Под действием сил трения (обмена импульсом между жидкостью и стенкой) в движущейся жидкости формируется поле скорости, а в результате теплообмена - поле температуры (см.рис.1).

В рассмотренных полях выделяют следующие области.

Гидродинамический пограничный слой - весьма тонкий слой жидкости, прилегающий непосредственно к поверхности стенки, в пределах которого сосредоточено практически все изменение скорости: от нулевого значения на поверхности (эффект "прилипания" жидкости) до значения скорости в ядре потока (рис.1,б,в).

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

Гидродинамическое ядро потока - вся остальная жидкость за пределами гидродинамического пограничного слоя.

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

В условиях естественной конвекции движение наблюдается лишь в пределах гидродинамического пограничного слоя. За его пределами жидкость практически неподвижна, $w(\infty)=0$ (см. рис.1,б).

Соотношение толщин гидродинамического и теплового пограничных слоев определяется величиной числа Прандтля

($Pr = \nu / a$), то есть соотношением вязкости и температуропроводности жидкости (см. разд.б).

2. Уравнение конвективной теплоотдачи. Средний коэффициент конвективной теплоотдачи.

Согласно уравнению конвективной теплоотдачи, называемому также законом Ньютона-Рихмана, тепловой поток прямо пропорционален разности температур стенки и жидкости и площади поверхности теплообмена. Коэффициент пропорциональности α в этом уравнении называют средним коэффициентом конвективной теплоотдачи:

$$Q = \alpha \cdot |t_c - t_{ж}| \cdot F, \quad (1)$$

$$\text{или} \quad Q = \alpha \cdot \Delta t_{\alpha} \cdot F, \quad (2)$$

$$\text{или} \quad q = \alpha \cdot \Delta t_{\alpha}, \quad (3)$$

где Q - тепловой поток, Вт; $q = Q/F$ - поверхностная плотность теплового потока, Вт/м²; α - средний коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К); $\Delta t_{\alpha} = |t_c - t_{ж}|$ - температурный напор теплоотдачи, °С; t_c - температура поверхности теплообмена (стенки), °С; $t_{ж}$ - температура жидкости вдали от стенки, °С; F - площадь поверхности теплообмена (стенки), м².

Независимо от направления теплового потока (от стенки к жидкости или наоборот) будем считать его положительным, то есть будем использовать модуль разности температур.

Величина коэффициента теплоотдачи зависит от большого числа различных факторов: а) физических свойств жидкости ; б) скорости движения жидкости ; в) формы, размеров и ориентации в пространстве поверхности теплообмена; г) величины температурного напора, направления теплообмена и т.п. Поэтому его теоретическое определение в большинстве случаев невозможно.

Выражения (1)-(3) позволяют опытным путем определить средний коэффициент теплоотдачи посредством измерения величин Q , F , t_c и $t_{ж}$:

$$\alpha = \frac{Q}{|t_c - t_{ж}| \cdot F} = \frac{Q}{\Delta t_{\alpha} \cdot F} = \frac{q}{\Delta t_{\alpha}}, \quad (4)$$

то есть средний коэффициент теплоотдачи численно равен тепловому потоку, передаваемому через единицу поверхности теплообмена при единичном температурном напоре (1 °С или 1 К).

3. Локальный (местный) коэффициент конвективной теплоотдачи

Средний коэффициент теплоотдачи является важной, но не всегда достаточной характеристикой процессов теплообмена. Во многих случаях требуются значения коэффициентов теплоотдачи в отдельных точках поверхности теплообмена, то есть локальные (местные) значения. Локальные коэффициенты характеризуют теплоотдачу в окрестности заданной точки (x) и входят в состав локального уравнения теплоотдачи:

$$dQ_x = \alpha_x \cdot |t_x - t_{ж}| \cdot dF, \quad (5)$$

или
$$q_x = \alpha_x \cdot (\Delta t_{\alpha})_x, \quad (6)$$

где dF – элементарная (бесконечно малая) поверхность теплообмена в окрестности точки x , m^2 ; dQ_x – элементарный тепловой поток, Вт; $q_x = dQ_x / dF$ – локальная плотность теплового потока, Вт/ m^2 ; α_x – локальный коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/($m^2 \cdot K$); $(\Delta t_{\alpha})_x = |t_x - t_{ж}|$ – локальный температурный напор, °С; t_x – локальная температура поверхности (стенки), °С; $t_{ж}$ – температура жидкости вдали от стенки (полагаем, что она постоянна вдоль всей поверхности теплообмена), °С.

Из выражений (5) и (6) следует, что локальные коэффициенты теплоотдачи в принципе могут быть найдены опытным путем посредством измерения величин dQ_x , dF , t_x и $t_{ж}$, относящихся к соответствующему бесконечно малому участку:

$$\alpha_x = \frac{dQ_x}{|t_x - t_{ж}| \cdot dF} = \frac{q_x}{|t_x - t_{ж}|}. \quad (7)$$

На практике вдоль поверхности выделяют необходимое количество конечных, но достаточно малых участков и производят измерения для каждого i -го участка поверхности:

$$\alpha_i = \frac{\Delta Q_i}{|t_{cp,i} - t_{ж}| \cdot \Delta F_i} = \frac{q_i}{|t_{cp,i} - t_{ж}|}, \quad (8)$$

где α_i - среднее для i -го участка значение коэффициента теплоотдачи, Вт/(м²·К); ΔF_i - площадь поверхности i -го участка, м²; ΔQ_i - тепловой поток в пределах i -го участка, Вт; $t_{cp,i}$ - среднее для i -го участка значение температуры поверхности; $q_i = \Delta Q_i / \Delta F_i$ - средняя плотность теплового потока в пределах i -го участка, Вт/м²; $i = 1, 2, \dots, n$ - номер очередного участка; n - количество участков.

При теплоотдаче на вертикальной поверхности выделяют n одинаковых по высоте участков (см. рис.4). Если измерять температуру поверхности на границах выделенных участков, начиная с ее нижней кромки ($i=1$), то средняя для i -го участка температура определится по формуле

$$t_{cp,i} = 0,5 \cdot (t_i + t_{i+1}). \quad (9)$$

Среднее для малого i -го участка значение коэффициента теплоотдачи (8) является приближенным значением локального коэффициента теплоотдачи (7). Чем меньше размеры участка, тем точнее получаемый результат.

Результаты большого количества опытов по определению коэффициентов теплоотдачи (8) обобщают в виде эмпирических (опытных) критериальных уравнений (см.разд.5). В дальнейшем эти уравнения используют в инженерных расчетах для определения коэффициентов теплоотдачи.

4. Характер изменения локального коэффициента теплоотдачи

Локальное уравнение теплоотдачи (5)-(6) можно записать в следующем виде:

$$q_x = \frac{(\Delta t_\alpha)_x}{1/\alpha_x} = \frac{(\Delta t_\alpha)_x}{(R_\alpha)_x}, \quad (10)$$

где $(R_\alpha)_x = 1/\alpha_x$ - локальное термическое сопротивление теплоотдачи, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Таким образом, при теплоотдаче локальная поверхностная плотность теплового потока (q_x) прямо пропорциональна локальному температурному напору $(\Delta t_\alpha)_x$ и обратно пропорциональна локальному термическому сопротивлению теплоотдачи $(R_\alpha)_x$.

Практически все термическое сопротивление теплоотдачи сосредоточено около поверхности стенки в пределах теплового пограничного слоя, при этом локальное термическое сопротивление пропорционально локальной толщине $\delta(x)$ этого слоя.

При теплоотдаче в условиях свободной конвекции около нагретой вертикальной поверхности (рис.2) пограничный слой формируется вдоль поверхности по ходу потока. Толщина слоя возрастает снизу вверх, и при достаточной высоте поверхности первоначально ламинарный пограничный слой постепенно преобразуется в турбулентный.

В области ламинарного (слоистого) течения локальный коэффициент теплоотдачи уменьшается по высоте поверхности в силу увеличения толщины пограничного слоя и, следовательно, в силу увеличения его локального термического сопротивления (см. рис.2).

В переходной области наблюдается увеличение коэффициента теплоотдачи вопреки возрастанию толщины пограничного слоя. Это происходит из-за дополнительного конвективного переноса теплоты образующимися вихрями.

В области развитого турбулентного течения толщина пограничного слоя продолжает расти, но в такой же степени воз-

растает вихревой конвективный перенос теплоты, поэтому термическое сопротивление и коэффициент теплоотдачи остаются постоянными, то есть перестают меняться по высоте поверхности (см. рис.2).

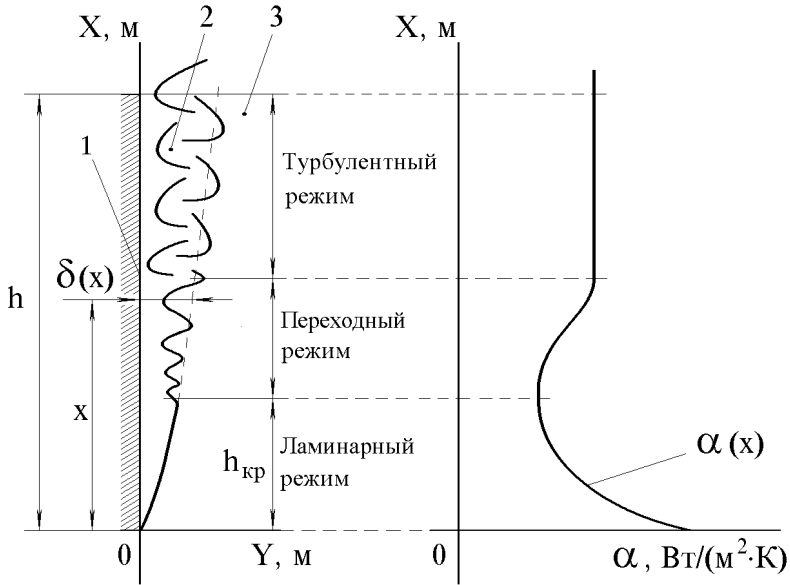


Рис.2. Пограничный слой и локальная теплоотдача:

1 - стенка (поверхность теплообмена); 2 - гидродинамический пограничный слой; 3 - гидродинамическое "ядро потока"

5. Расчет локального коэффициента теплоотдачи с помощью критериальных уравнений

При свободной конвекции локальный коэффициент теплоотдачи на вертикальной поверхности можно рассчитать по критериальным эмпирическим формулам следующего вида:

$$Nu_x = C \cdot Ra_x^n \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (11)$$

где C , n и $0,25$ - эмпирические (определяемые из опыта) постоянные; Nu_x - локальное число Нуссельта; Ra_x - локальное число Релея; Pr , Pr_c - числа Прандтля, взятые при определяющей температуре и при температуре стенки соответственно. Подробнее см. в разд. 6.

Значения эмпирических постоянных (табл.1) зависят от режима свободного движения жидкости. Режим свободного движения в данной точке x поверхности теплообмена определяется величиной локального числа Релея в этой точке.

Таблица 1. Значения эмпирических постоянных [1]

Ra_x	Режим движения	C	n
$Ra_x < 10^9$	Ламинарный	0,60	0,25
$Ra_x > 6 \cdot 10^{10}$	Турбулентный	0,15	1/3

Для газов множитель $(Pr/Pr_c)^{0,25}$ близок к единице, так как $Pr \approx Pr_c$ в силу слабой зависимости числа Прандтля газов от температуры, поэтому для газов формула (11) принимает более простой вид:

$$Nu_x = C \cdot Ra_x^n. \quad (11a)$$

Рассчитав локальное число Нуссельта, определяют входящий в него локальный коэффициент теплоотдачи (см. разд. 6).

6. Числа (критерии) подобия

Каждый критерий подобия представляет собой *безразмерный* комплекс (комбинацию), составленный из физических величин, влияющих на процесс: определяющей температуры (разности температур), определяющей скорости (при вынужденной конвекции), определяющего размера, – и физических свойств жидкости. В итоге каждый критерий подобия характеризует

определенное соотношение физических эффектов, характерных для рассматриваемого явления.

Один из критериев подобия в уравнении является *определяемым* (искомым), все другие являются *определяющими* критериями, то есть играют роль независимых переменных, влияющих на теплоотдачу.

Рассмотрим *локальные* числа (критерии) подобия.

$$\text{Число Нуссельта:} \quad \text{Nu}_x = \alpha_x \cdot x / \lambda_{\text{ж}} , \quad (12)$$

где α_x - локальный коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К); x – координата, в которой ищется локальный коэффициент теплоотдачи, м (см. разд.7); $\lambda_{\text{ж}}$ - коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К).

Это определяемый критерий подобия, так как в его состав входит искомый коэффициент теплоотдачи α_x . Число Нуссельта можно рассматривать как относительный коэффициент теплоотдачи: $\text{Nu}_x = \alpha_x / (\lambda_{\text{ж}} / x)$, где $\lambda_{\text{ж}} / x$ - масштаб отнесения, имеющий ту же размерность, что и коэффициент теплоотдачи α_x . То есть число Нуссельта характеризует интенсивность теплоотдачи или, точнее, соотношение интенсивностей теплоотдачи α_x и теплопроводности жидкости $\lambda_{\text{ж}} / x$. Если найдено число Нуссельта, например, с помощью (11) или (11 а), то

$$\alpha_x = \text{Nu}_x \cdot \lambda_{\text{ж}} / x . \quad (13)$$

$$\text{Число Прандтля:} \quad \text{Pr} = \nu / a , \quad (14)$$

где ν - кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с; a - коэффициент температуропроводности жидкости, м²/с.

Это один из определяющих критериев подобия. Он характеризует влияние физических свойств жидкости на теплоотдачу. В частности, соотношение толщин гидродинамического и теплового пограничных слоев зависит от соотношения величин ν и a , то есть от числа Прандтля. Сомножитель $(\text{Pr} / \text{Pr}_c)^{0,25}$ в фор-

муле (11) учитывает для капельных жидкостей влияние на теплоотдачу величины температурного напора и его знака (направления теплообмена).

$$\text{Число Релея: } Ra_x = Gr_x \cdot Pr, \quad (15)$$

где Gr_x - локальное число Грасгофа.

Это главный определяющий критерий подобия. По его численному значению определяется режим свободного движения жидкости: ламинарный, переходный, турбулентный. Различным режимам движения соответствует различный физический механизм переноса теплоты, что выражается в различных значениях эмпирических постоянных C и n в уравнениях типа (11) и (11а) (см. также разд.9).

Число Релея можно рассматривать как отношение подъемной силы теплового пограничного слоя к силе трения, обусловленной вязкостью.

$$\text{Число Грасгофа: } Gr_x = \frac{g \cdot x^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot (\Delta t_\alpha)_x, \quad (16)$$

где g – ускорение силы тяжести, m/c^2 ; β - термический коэффициент объемного расширения жидкости, $1/K$; $(\Delta t_\alpha)_x = |t_x - t_{ж}|$ - локальный температурный напор, °C (t_x - локальная температура поверхности (стенки), °C; $t_{ж}$ - температура жидкости вдали от стенки, °C).

Это определяющий критерий подобия в составе числа Релея. Он эквивалентен числу Релея при условии $Pr = const$.

Примечания:

1. Физические свойства жидкости ($\lambda_{ж}$, β , ν , a , Pr и др.) берут из справочных таблиц [1-3] при так называемой определяющей (характерной) температуре t_o (см. разд.8). Значение числа Pr_c (для капельных жидкостей) берут там же, но при температуре стенки t_c .

2. Для газов коэффициент объемного расширения в таблицах физических свойств не приводится, так как его легко рассчитать:

$$\beta = 1/T_0 = 1/(t_0 + 273). \quad (17)$$

7. Определяющий (характерный) размер

Определяющий размер необходим для расчета значения большинства критериев подобия, входящих в критериальные уравнения.

На вертикальных поверхностях (вертикальная труба, стенка и т.п.) пограничный слой формируется по вертикали (см. рис.2), то есть его толщина, термическое сопротивление и, следовательно, локальный коэффициент теплоотдачи зависят от высоты поверхности. Поэтому в качестве определяющего размера берут текущую координату по высоте:

$$l_0 = x. \quad (18)$$

Другие размеры - ширина стенки, диаметр трубы и т.п. - на толщину пограничного слоя и на величину коэффициента теплоотдачи не влияют.

8. Определяющая (характерная) температура

Физические свойства жидкости ($\lambda_{ж}$, β , ν , a , Pr и др.), входящие в критерии подобия, находят в справочных таблицах [1-3] при так называемой определяющей (характерной) температуре. Она должна наиболее полно учитывать влияние температурного поля жидкости на эти свойства в пределах пограничного слоя.

Следует брать именно ту температуру, которую использовал автор формулы при ее получении (при обработке экспериментальных данных), то есть указанную в комментариях к формуле. В данной работе будем использовать температуру жидкости за пределами пограничного слоя, то есть вдали от стенки (см. рис.1,а):

$$t_0 = t_{ж} = t_{ж}(\infty). \quad (19)$$

9. Сложный теплообмен

На практике конвективная теплоотдача сопровождается лучистым теплообменом между теплоотдающей поверхностью и окружающими ее телами, то есть наблюдается так называемый сложный теплообмен.

При этом суммарный тепловой поток

$$Q_{\Sigma} = Q + Q_{\text{л}}, \quad (20)$$

где Q и $Q_{\text{л}}$ - конвективный (1) и лучистый (21) тепловые потоки соответственно, Вт.

Согласно законам лучистого теплообмена [1,2]

$$Q_{\text{л}} = C_{\text{пр}} \cdot \left[(T_{\text{с}}/100)^4 - (T_{\text{окр}}/100)^4 \right] \cdot F_{\text{с}}, \quad (21)$$

или

$$q_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{л}}}{F_{\text{с}}} = C_{\text{пр}} \cdot \left[(T_{\text{с}}/100)^4 - (T_{\text{окр}}/100)^4 \right] \quad (21a)$$

где $C_{\text{пр}} = C_0 \cdot \varepsilon_{\text{пр}}$ - приведенный коэффициент излучения системы двух тел, Вт/(м²·К⁴) ($C_0 = 5,67$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); $\varepsilon_{\text{пр}}$ - приведенная степень черноты системы двух тел); $T_{\text{с}}$ - абсолютная температура стенки (исследуемой поверхности теплообмена), К; $T_{\text{окр}}$ - абсолютная температура окружающих тел, К; $F_{\text{с}}$ - площадь стенки (поверхности теплообмена) м².

Для цилиндрической поверхности

$$F_{\text{с}} = \pi \cdot d \cdot l, \quad (22)$$

где d, l - диаметр и длина цилиндра, м.

Примечания:

1. В условиях учебной лаборатории температуру окружающих тел (стен, других стендов и т.п.) можно принять равной температуре воздуха в комнате, то есть $T_{\text{окр}} = T_{\text{в}}$, К.

2. Так как площадь поверхности окружающих тел много больше площади исследуемой поверхности теплообмена ($F_{\text{окр}} \gg F_c$), то $\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_c$, то есть приведенная степень черноты равна степени черноты стенки (поверхности теплообмена). Значение степени черноты поверхности рабочего участка приведено в 10.1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА

10. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис.3) состоит из следующих основных элементов: рабочего участка 1 (вертикальный цилиндр), пультов управления 2 с вмонтированными в них измерительными приборами (цифровыми индикаторами), согласующего блока 3, содержащего также систему электропитания, системного блока 4 персонального компьютера, монитора 5 персонального компьютера, клавиатуры 6, манипулятора «мышь» 7.

10.1. Рабочий участок

Рабочий участок, схема его питания и схема измерения представлены на рис.4 и на экране монитора.

Рабочий участок 1 представляет собой расположенный вертикально стальной тонкостенный цилиндр. Наружный диаметр цилиндра $d = 0,04$ м и высота $h = 1,5$ м. Наружная поверхность цилиндра хромирована. Степень черноты поверхности хромированной стали $\varepsilon_c = 0,2$.

Нагрев цилиндра осуществляется электрическим током. Электрическое сопротивление цилиндра $R_{\text{эл}} = 0,195$ Ом. Подключение к сети производится выключателем S1. Режим нагрева может плавно изменяться с помощью регулятора напряжения 2. Падение напряжения на концах цилиндра определяется по цифровому индикатору 3 на экране монитора или по индикатору, расположенному на пульте управления № 1 (рис.5). Торцы цилиндра закрыты теплоизолирующими заглушками 4 для уменьшения влияния тепловых потерь.

Избыточная (над температурой холодного спая) температура Δt наружной поверхности цилиндра измеряется с помощью термопар 5, размещенных в 10 точках, чередующихся по вертикали с шагом $\Delta x = 150$ мм. Значения избыточных температур $\Delta t_1 \dots \Delta t_{10}$ определяются по цифровым индикаторам 6 на экране монитора или по индикатору, расположенному на пульте управления 4 (рис.5).

Температуру холодного спая термопар (t_{xc}) и температуру исследуемой газовой среды вдали от поверхности цилиндра ($t_{ж}$) измеряют с помощью стеклянного термометра 7.

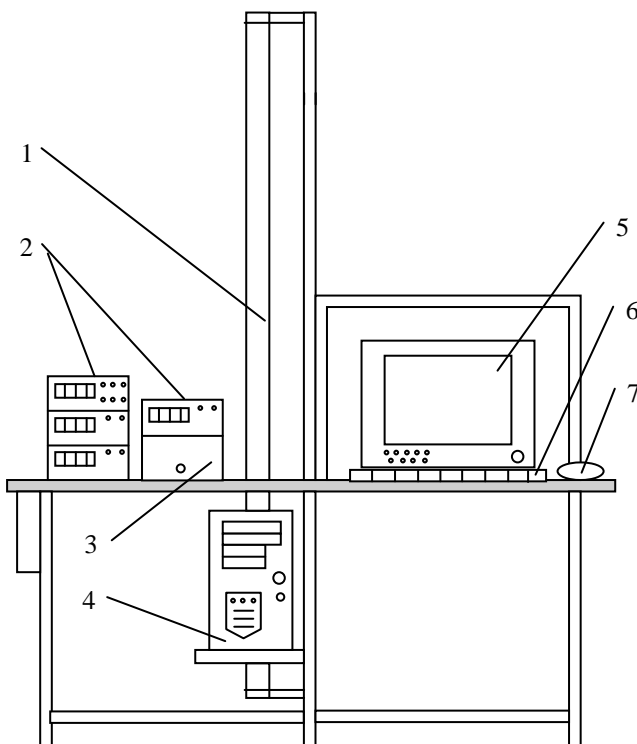


Рис. 3. Экспериментальная установка:

1 - рабочий участок (поверхность теплообмена в форме вертикального цилиндра); 2 - пульта управления с цифровыми индикаторами; 3 - согласующий блок и блок электрического питания; 4 - системный блок персонального компьютера; 5 - монитор; 6 - клавиатура; 7 - манипулятор «мышь»

Данная установка позволяет имитировать теплоотдачу в среде четырех видов газов: воздухе, водороде (H_2), двуокиси углерода (CO_2) и азоте (N_2). Вид используемого в опыте газа высвечивается на экране монитора (рис.4, поз.8). Физические свойства газов представлены в табл. 1. Приложение.

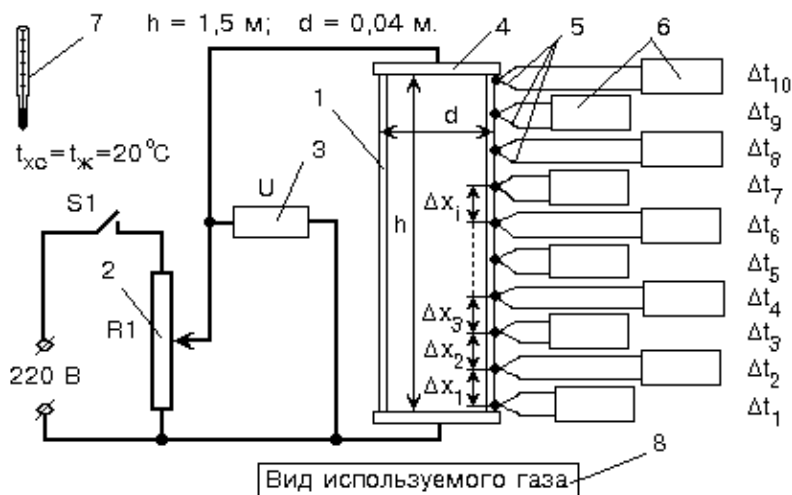


Рис. 4. Рабочий участок. Схема питания и измерений:

1 - рабочий участок (поверхность теплообмена в форме вертикального цилиндра); 2 - регулятор напряжения; 3 - цифровой индикатор напряжения; 4 - теплоизолирующие заглушки; 5 - горячие (рабочие) спаи термопар; 6 - цифровые индикаторы избыточной температуры; 7 - стеклянный термометр; 8 - индикатор вида используемого газа

10.2. Пульты управления

В данной лабораторной работе используют два пульта управления (рис. 5):

№ 1 - пульт управления электрическими нагревателями,

№ 4 - пульт измерения температуры.

Работа с пультами управления описана в разд. 11.

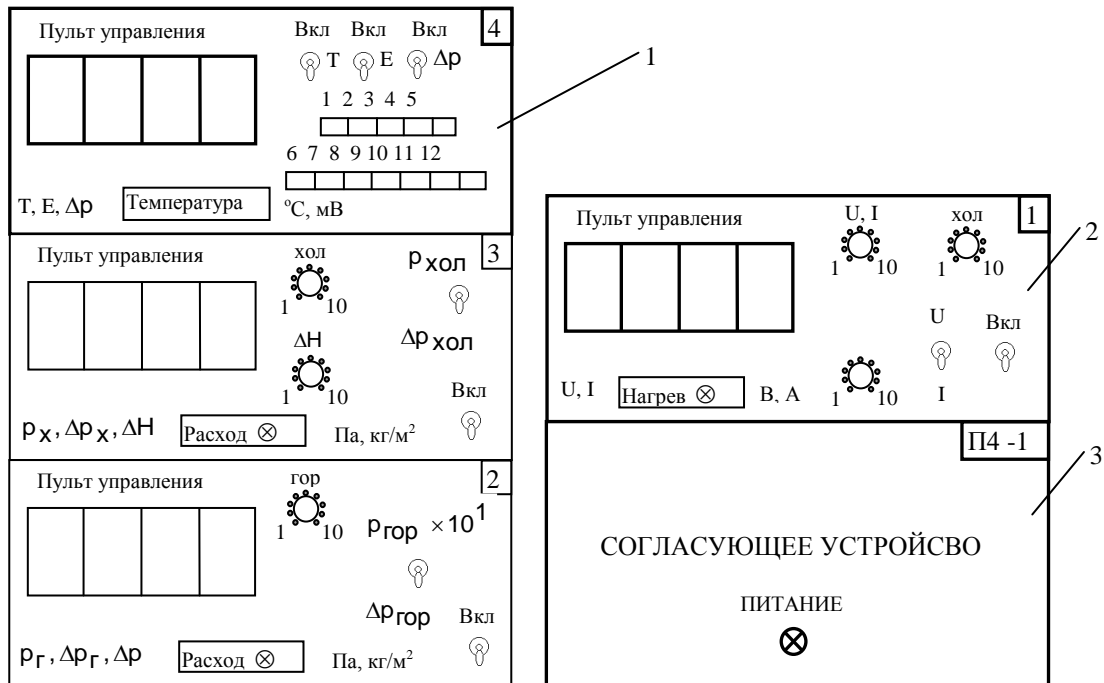


Рис. 5. Пульты управления:

- 1 - пульт управления измерениями температуры; 2 - пульт управления электрическим нагревателем; 3 - согласующий блок электрического питания

11. Порядок проведения опыта

1. Подключить к сети 220 В шнур сетевого питания лабораторного стенда.

2. Включить тумблер питания на системном блоке персонального компьютера. После окончания загрузки операционной системы двойным щелчком мыши запустить файл `C:\ТЕРМО\Тр_004.exe`. При этом на экране монитора отобразится схема экспериментальной установки и расположения термомпар, а также засветятся индикаторы на всех пультах управления (см. рис.3).

3. На пульте управления 1 включить тумблер питания «ВКЛ». При этом на схеме установки (на экране монитора) замкнется выключатель S1 и появятся значения измеряемых величин напряжения U (выделено зеленым фоном) и избыточных температур стенки трубы $\Delta t_1 \dots \Delta t_{10}$ (выделены желтым фоном).

4. На пульте управления № 1 переключатель U/I (напряжение/ток) установить в положение U . При этом на цифровом индикаторе пульта № 1 появится значение напряжения U , подведенного к рабочему участку трубы для его нагрева. Это значение должно совпадать с показанием «индикатора» на экране монитора (выделено зеленым фоном).

5. На пульте управления № 4 переключатель T (температура) перевести в положение «ВКЛ», остальные переключатели – в положение «ВЫКЛ». Нажать одну из кнопок (1...10) многопозиционного переключателя термомпар. При этом на цифровом индикаторе пульта № 4 появится значение соответствующей избыточной температуры ($\Delta t_1 \dots \Delta t_{10}$). Оно должно совпадать с соответствующим значением этой же температуры на экране монитора (выделены желтым фоном).

6. На экране монитора в диалоговом окне данной лабораторной работы с помощью щелчка мыши открыть пункт меню «ПАРАМЕТРЫ» и выбрать газовую среду, для которой предполагается проводить дальнейшие исследования. Название газа высвечивается в нижней части диалогового окна.

7. Вращая ручку реостата (U, I), расположенную на пульте управления № 1, установить заданное преподавателем напряже-

ние электрического нагрева вертикального цилиндра. Величину напряжения можно наблюдать как на цифровом индикаторе пульта управления № 1, так и на экране монитора, где наблюдается также перемещение подвижного контакта регулятора нагрева R1.

8. На пульте управления № 4 с помощью переключателя термопар (кнопки 1...10) измерить значения избыточных температур ($\Delta t_1 \dots \Delta t_{10}$) в различных точках по высоте трубы. Эти значения можно наблюдать как на индикаторе пульта № 4, так и на экране монитора.

9. Значения напряжения U и избыточных температур ($\Delta t_1 \dots \Delta t_{10}$) занести в табл. 2. Результаты таких замеров соответствуют стационарному режиму теплоотдачи. Во всех опытах температуру холодного спая термопар (t_{xc}) и температуру исследуемой газовой среды вдали от поверхности цилиндра ($t_{ж}$) принимают равными 20°C .

Таблица 2. Результаты наблюдений и обработки данных

$U = \dots \text{ В}$

$t_{xc} = t_{ж} = t_0 = 20^\circ\text{C}$

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_i										
Δt_i										
t_i										
$t_{cp,i}$										—
$\Delta t_{\alpha,i}$										—
$T_{cp,i}$										—
$q_{л,i}$										—
q_i										—
α_i										—
Nu_i										—
Ra_i										—

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ln(Nu)_i										—
ln(Ra)_i										—
α_i ^{изв}										—
α_i ^{получ}										—

12. Обработка результатов измерений

1. Определить суммарный тепловой поток (Вт) и плотность суммарного теплового потока (Вт/м²):

$$\Sigma Q = U^2 / R_{эл} , \Sigma q = \Sigma Q / F_c , \quad (23)$$

где U - напряжение, приложенное к рабочему участку, В;
 $R_{эл}$ - электрическое сопротивление рабочего участка, Ом; F_c - площадь поверхности теплообмена (22), м².

2. Определить и занести в табл. 2 следующие величины, характерные для всех локальных участков по высоте трубы:

а) текущую координату (высоту), определяемую по верхней кромке участка:

$$x_i = \Delta x \cdot i ; \quad (24)$$

б) избыточную температуру в точках измерения (Δt_i);

в) истинную температуру в точках измерения:

$$t_i = \Delta t_i + t_{xc} ; \quad (25)$$

г) среднюю температуру участка:

$$t_{cp,i} = 0.5 \cdot (t_i + t_{i+1}) ; \quad (26)$$

д) температурный напор теплоотдачи на участке:

$$\Delta t_{\alpha,i} = t_{\text{ср},i} - t_{\text{ж}} ; \quad (27)$$

е) абсолютную среднюю температуру участка:

$$T_{\text{ср},i} = t_{\text{ср},i} + 273 ; \quad (28)$$

ж) плотность теплового потока излучением:

$$q_{\text{л},i} = C_{\text{пр}} \cdot \left[(T_{\text{ср},i} / 100)^4 - (T_{\text{окр}} / 100)^4 \right] ; \quad (29)$$

и) плотность конвективного теплового потока:

$$q_i = \Sigma q - q_{\text{л},i} ; \quad (30)$$

ж) локальный коэффициент конвективной теплоотдачи:

$$\alpha_i = q_i / \Delta t_{\alpha,i} ; \quad (31)$$

и) локальное число Нуссельта:

$$\text{Nu}_i = \alpha_i \cdot x_i / \lambda_{\text{ж}} ; \quad (32)$$

к) локальное число Релея согласно (15), (16):

$$\text{Ra}_i = \text{Gr}_i \cdot \text{Pr} = \frac{g \cdot x_i^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t_{\alpha,i} \cdot \text{Pr} ; \quad (33)$$

л) логарифмы локальных чисел Релея и Нуссельта:

$$\ln(\text{Ra})_i , \quad \ln(\text{Nu})_i . \quad (34)$$

3. Полученные опытные значения (34) локальных критериев подобия нанести в виде точек на график (рис. 6), построенный в логарифмических координатах $[\ln(\text{Nu}), \ln(\text{Ra})]$.

4. Руководствуясь данными табл. 1, выделить на графике области, соответствующие ламинарному, переходному и турбулентному режимам (см. рис.6).

5. По точкам, расположенным в области ламинарного режима движения, провести визуальную аппроксимацию искомой функции с помощью прямой линии (см. рис.6, поз.1).

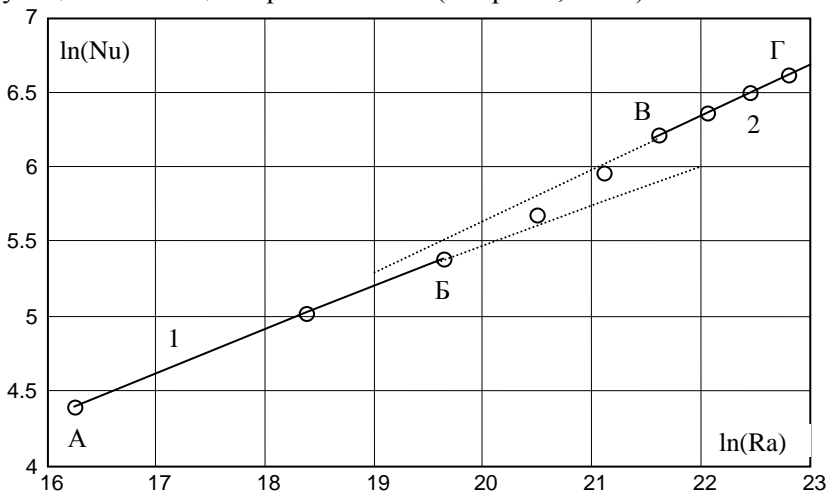


Рис.6. Построение аппроксимирующих прямых:

1 - в области ламинарного движения; 2 - в области турбулентного движения; А, Б, В, Г - опорные точки для определения коэффициентов уравнения прямой линии; $\circ \circ \circ$ - опытные точки

6. Аналогично провести аппроксимацию в области турбулентного режима движения (если такая область существует) (см. рис.6, поз.2).

7. Точки переходного режима не аппроксимируют, но возможны случаи, когда крайние точки, принадлежащие к области переходного режима, хорошо укладываются на аппроксимирующие прямые, полученные в пп. 5 и 6.

9. На каждой из прямых, полученных в пп. 5 и 6, выбрать две опорные точки: А, Б и В, Г (см. рис.6). Используя координаты опорных точек, найти коэффициенты C и n критериальной зависимости (11а) для ламинарного и аналогично для турбулентного режимов течения. Способ определения коэффициентов описан в разд.13.

10. Сопоставить полученные Вами коэффициенты с известными их аналогами (см. табл.1) соответственно для ламинарного и турбулентного режимов течения.

11. Используя данные табл.2, построить график зависимости локального коэффициента теплоотдачи от высоты вертикальной поверхности ($\alpha_i = f(x_i)$) аналогично графику, представленному на рис.2.

12. На том же графике построить аналогичные зависимости для локальных коэффициентов теплоотдачи $\alpha_i^{\text{изв}}$, рассчитанных по известной критериальной формуле (11а), и коэффициентов $\alpha_i^{\text{расч}}$, рассчитанных по Вашей критериальной формуле аналогичного вида.

Рекомендации: а) результаты расчетов свести в последние две строки табл. 2; б) не изменяющиеся величины удобнее предпочтительно объединить и представить в виде числового коэффициента; в) сначала рассчитать координаты всех точек, необходимых для построения графиков, согласно пп. 11 и 12, а затем выбрать масштабы по координатным осям.

13. Получение критериальной формулы

Получить эмпирическую критериальную зависимость (11а) – это значит на основе опытных данных определить такие значения эмпирических коэффициентов C и n , при которых график (линия) этой зависимости наилучшим образом пройдет относительно опытных точек.

В логарифмических координатах искомая зависимость (11а) приобретает вид прямой линии:

$$\ln(Nu) = \ln(C) + n \cdot \ln(Ra), \quad (35)$$

что равносильно уравнению $y = b + k \cdot x$.

Значение показателя степени n определяется как тангенс угла наклона к оси абсцисс (к оси $\ln(Ra)$) соответствующей аппроксимирующей прямой. Для ламинарного и турбулентного

режимов (см. рис.6) эти значения вычисляют, соответственно, по следующим формулам:

$$n = \frac{\ln(\text{Nu}_B) - \ln(\text{Nu}_A)}{\ln(\text{Ra}_B) - \ln(\text{Ra}_A)}, \quad (36)$$

$$n = \frac{\ln(\text{Nu}_\Gamma) - \ln(\text{Nu}_B)}{\ln(\text{Ra}_\Gamma) - \ln(\text{Ra}_B)}, \quad (37)$$

где $\text{Nu}_A, \dots, \text{Nu}_\Gamma$ и $\text{Ra}_A, \dots, \text{Ra}_\Gamma$ - координаты опорных точек, выбранные на аппроксимирующих прямых (см. п.9, разд.12).

По найденным значениям n постоянные C определяются из соотношения (11а) для соответствующих режимов:

а) ламинарного:

$$C = \text{Nu}_A / \text{Ra}_A^n, \quad \text{или} \quad C = \text{Nu}_B / \text{Ra}_B^n; \quad (38)$$

б) турбулентного:

$$C = \text{Nu}_B / \text{Ra}_B^n, \quad \text{или} \quad C = \text{Nu}_\Gamma / \text{Ra}_\Gamma^n. \quad (39)$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение понятий «конвекция», «конвективный теплообмен», «конвективная теплоотдача».

2. Какой вид теплообмена исследуется в данной лабораторной работе? Назовите другой, сопутствующий вид теплообмена.

3. Сформулируйте закон конвективной теплоотдачи, напишите его математическое выражение и поясните входящие в него величины.

4. Поясните физический смысл среднего коэффициента теплоотдачи и выведите единицу его измерения. Напишите формулу, лежащую в основе его экспериментального определения.

5. Поясните физический смысл локального коэффициента теплоотдачи и выведите единицу его измерения. Напишите формулу, лежащую в основе его экспериментального определения.

6. Назовите основные факторы (физические величины, входящие в критерии подобия), влияющие на величину коэффициента теплоотдачи. Поясните это влияние путем анализа критериальной формулы.

7. В чем состоит отличие процессов теплоотдачи при вынужденной и при свободной конвекции жидкости? Поясните физический механизм возникновения свободной конвекции. Какие режимы движения жидкости при этом наблюдаются?

8. Охарактеризуйте понятия «число (критерий) подобия», «определяемый критерий подобия», «определяющий критерий подобия». Каким путем могут быть получены (выведены) критерии подобия?

9. Приведите пример критериального уравнения теплоотдачи при свободной конвекции. Поясните величины, входящие в это уравнение. Каким путем получают критериальные уравнения?

10. Охарактеризуйте понятие «определяющий (характерный) размер». Что принимают в качестве характерного размера для вертикальных поверхностей при исследовании среднего коэффициента теплоотдачи? локального коэффициента теплоотдачи? Обоснуйте ответ с точки зрения теории пограничного слоя.

11. Охарактеризуйте понятие «определяющая температура». Из каких соображений ее выбирают? Как ее используют при расчете теплоотдачи?

12. Как влияет коэффициент объемного расширения среды на теплоотдачу при свободной конвекции? Как определить этот коэффициент для газов? для жидкостей?

13. Запишите формулу и поясните физический смысл числа Нуссельта.

14. Запишите формулу и поясните физический смысл числа Грасгофа.

15. Запишите формулу и поясните физический смысл числа Прандтля.

16. Запишите формулу и поясните физический смысл числа Релея.

17. Какие режимы движения жидкости наблюдаются на вертикальных поверхностях? От чего это зависит? Каковы условия (критерии) смены режимов?

18. Охарактеризуйте понятия «локальный коэффициент теплоотдачи» и «средний коэффициент теплоотдачи». Изобразите график изменения этих коэффициентов по высоте нагретой вертикальной поверхности. Поясните причины этих изменений на характерных участках. То же, по высоте охлажденной вертикальной поверхности.

19. Зависит ли величина коэффициента теплоотдачи от направления теплоотдачи (от стенки к жидкости или от жидкости к стенке)? В каких случаях и как это учитывается в критериальных уравнениях?

20. Зависит ли значение числа Прандтля для газа от температуры? Каково значение критерия Прандтля для двухатомных газов? для воздуха?

21. Что называют сложным теплообменом? Какова доля теплообмена излучением в проведенных опытах? Как рассчитать лучистую составляющую теплоотдачи? Как рассчитать конвективную составляющую теплоотдачи?

22. Поясните принцип работы экспериментальной установки и назначение ее элементов (по схеме экспериментальной установки).

23. Перечислите измерительные приборы и дайте характеристику измеряемым величинам, указав также единицы их измерения и роль этих величин в расчетах коэффициента теплоотдачи.

24. Поясните принцип измерения температуры с помощью термопар. Опишите порядок действий при определении температуры в точке измерения.

25. Поясните принцип измерения теплового потока электрометрическим методом. На какие составляющие раскладывается измеренный тепловой поток на внешней поверхности трубы?

26. Опишите порядок обработки экспериментальных данных для нахождения локального коэффициента теплоотдачи (на примере одного из выделенных участков вертикальной поверхности).

27. Опишите порядок определения коэффициентов критерияльного уравнения (на примере одной из характерных областей течения: ламинарной или турбулентной).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

2. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 320 с.

3. **Краснощеков Е.А., Сукомел А.С.** Задачник по теплопередаче. М.: Энергия, 1981. 240 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Свойства газов при температуре 20 °С

ВИД ГАЗА	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м²/с	Pr
CO ₂	1,66	8,42	0,77
H ₂	18,3	110,3	0,696
N ₂	2,59	15,87	0,716
Воздух	2,59	15,06	0,703

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ
ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ
ОКОЛО ВЕРТИКАЛЬНОГО ЦИЛИНДРА
МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ

Методические указания по выполнению лабораторной работы
при изучении дисциплины "Тепломассообмен"

Составитель ВАРЕНЦОВ Александр Анатольевич

Редактор Н.С. Работаева

Лицензия ИД №05285 от 4 июля 2001г.

Подписано в печать 12.04.04 Формат 60x84¹/₁₆.

Печать плоская. Усл.печ.л. 1,86. Тираж 100 экз. Заказ.

Ивановский государственный энергетический университет,

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в РИР ИГЭУ.