

Министерство образования и науки Российской Федерации
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Т.Н. Пинтя, Ю.И. Тартаковский, Г.Н. Матвеева

Термодинамика. Теплопередача

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве практикума*

Магнитогорск
2012

УДК 536.7 (075)

Рецензенты:

Генеральный директор ООО «Теплосервис» (г. Челябинск)

Б.В. Абрамов

Заведующий кафедрой общетехнических дисциплин

Магнитогорского государственного университета,

профессор, кандидат техн. наук

В.С. Славин

Пинтя, Т.Н.

Термодинамика. Теплопередача: практикум / Т.Н. Пинтя, Ю.И. Тартаковский, Г.Н. Матвеева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 53 с.

Выполнение студентами лабораторных работ позволит им глубже усвоить основные разделы теоретического курса, а также приобрести практические навыки самостоятельной работы с теплотехническим оборудованием и приборами, привить навыки научно-исследовательской работы, научить студентов анализировать и обобщать результаты исследований, что несомненно будет полезным в работе после окончания университета.

Описание лабораторных работ построено по единому плану. В лабораторных работах указаны цель работы, краткие теоретические сведения по изучаемым вопросам, описание экспериментальной установки, методические указания по выполнению работы, расчетные формулы для обработки результатов эксперимента.

УДК 536.7 (075)

© Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2012

© Пинтя Т.Н., Тартаковский Ю.И.,
Матвеева Г.Н., 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Практикум по разделам «Термодинамика» и «Теплопередача» включает 6 лабораторных работ и предназначен для студентов всех специальностей, изучающих теплотехнические дисциплины.

Практикум отвечает требованиям ГОС ВПО, соответствует учебным планам и рабочим программам специальностей 190205, 190701, 130402, 130403, 130404, 130406, 130408.

В разработке практикума и постановке лабораторных работ, помимо авторов пособия, принимала участие канд. техн. наук, доцент Н.Г. Маценко. Авторы выражают глубокую признательность рецензентам – генеральному директору ООО «Теплосервис» (г. Челябинск) Б.В. Агравову и профессору МаГУ, канд. техн. наук В.С. Славину за внимательное рассмотрение рукописи и высказанные предложения.

ВВЕДЕНИЕ

В практикум включены шесть лабораторных работ, которые охватывают значительную часть вопросов, изучаемых в разделах «Термодинамика» и «Теплопередача», составляющих теоретические основы теплотехники.

Подготавливая методические материалы к выполнению лабораторных работ, авторы стремились отразить в них основные задачи, стоящие перед лабораторными занятиями:

- связать теорию с практикой, подтвердив опытом теоретические положения;
- научить студентов обращаться с лабораторным оборудованием и приборами;
- привить навыки научно-исследовательской работы, научить студентов анализировать и обобщать результаты исследований;
- использовать занятия в лаборатории для контроля самостоятельной работы студентов, развития научного мышления и речи студентов.

Настоящий практикум содержит лабораторные работы по основным изучаемым темам (в скобках указаны номера в кафедральной системе нумерации лабораторных работ).

Раздел «Термодинамика»:

1. Законы и уравнение состояния идеального газа (лабораторная работа ТД №1).
2. Термодинамические процессы идеального газа (лабораторная работа ТД №12).
3. Реальные газы – водяной пар, диаграммы состояния P - V , T - S и h - S (лабораторная работа ТД №6).

Раздел «Теплопередача»:

1. Передача теплоты через стенку при стационарном тепловом режиме (лабораторная работа ТП №1).

2. Нагрев массивных тел при граничных условиях третьего рода (лабораторная работа ТП №3).

3. Исследование конвективного теплообмена при вынужденном продольном обтекании пластины потоком воздуха (лабораторная работа КТ №9).

Выполнение студентами этих работ позволит им глубже усвоить основные разделы теоретического курса, а также приобрести практические навыки самостоятельной работы с лабораторным оборудованием и приборами.

В настоящем практикуме сохраняется принятая на кафедре теплотехнических и энергетических систем нумерация лабораторных работ. Работы выполняются в ауд.371 (раздел «Термодинамика») и ауд.367 (раздел «Теплопередача»).

Все описания лабораторных работ построены по единому плану. В них формулируется цель работы, приводятся краткие теоретические сведения, дается описание лабораторной установки. В каждой лабораторной работе приведены рабочее задание, методические указания к выполнению и расчетные формулы. Для самопроверки студентов приводятся контрольные вопросы и список литературы.

Лабораторные работы выполняются бригадами из 3–4 студентов. Перед началом выполнения лабораторных работ студенты должны ознакомиться с инструкцией по технике безопасности. Лабораторные работы могут быть выполнены качественно только при хорошей подготовке к ним. Для этого необходимо предварительно ознакомиться с методическими указаниями, соответствующим разделом конспекта лекций и рекомендуемой литературой. Перед началом выполнения каждой лабораторной работы проводится собеседование со студентами с целью выяснения степени подготовленности их к данной лабораторной работе. Неподготовленные студенты к проведению лабораторной работы не допускаются.

Включение лабораторной установки в сеть производится только преподавателем. После окончания работы и проверки преподавателем полученных результатов, схема установки разбирается и рабочее место приводится в порядок лаборантом.

К каждому занятию студенты представляют индивидуальный отчет по выполненной предыдущей работе, в противном случае к очередной работе они не допускаются.

Отчет о работе должен содержать:

1. Номер и название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки и краткое ее описание.
4. Порядок проведения опыта.
5. Таблица наблюдений (измерений).

6. Обработка результатов эксперимента.

7. Анализ полученных результатов и выводы по работе.

После оформления лабораторной работы преподаватель беседует со студентами каждой бригады по теоретической части данной работы, обсуждает полученные результаты, выясняя понимание студентами сущности изучаемого закона, явления, процесса или механизма. Беседа может быть групповой, а «зачет» по работе индивидуальный, с учетом уровня подготовки студента, его индивидуальных особенностей.

РАЗДЕЛ «ТЕРМОДИНАМИКА»

Лабораторная работа ТД №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ОБЪЕМА ПАРА

1. Цель работы

Определение удельного объема пара исследуемой жидкости по методу Майера [1].

2. Теоретическая часть

Величины, характеризующие любое вещество в данном состоянии, называются **параметрами состояния** [2]. Три из этих параметров – удельный объем, абсолютное давление и абсолютная температура – являются основными.

Удельный объем – это объем единицы массы вещества, $\text{м}^3/\text{кг}$.

$$v = \frac{V}{M}.$$

Величина, обратная удельному объему, называется **плотностью** вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$.

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{M}{V}.$$

Абсолютное давление – это сила, действующая по нормали к поверхности тела и отнесенная к единице площади этой поверхности. В Международной системе единиц измерения СИ давление измеряется единицей $\text{Н}/\text{м}^2$, которая называется «паскаль» (Па). Абсолютное давление рассчитывается по следующим формулам

$$P = B + P_{\text{изб}} \text{ или } P = B - P_{\text{разр}},$$

где B – атмосферное (барометрическое) давление;

$P_{изб}$ – избыточное (манометрическое) давление, т.е. давление, которое показывает, насколько давление газа в сосуде выше атмосферного (измеряется манометром);

$P_{разр}$ – разрежение, или вакуум, – это давление, которое показывает насколько давление газа в сосуде ниже атмосферного (также измеряется манометром).

Температура характеризует тепловое состояние тела и определяет меру его нагретости. **Абсолютная температура** обозначается буквой T и измеряется по шкале Кельвина.

Основные параметры состояния связаны между собой термическим уравнением состояния. Для 1 кг идеального газа это уравнение имеет вид

$$Pv = RT,$$

где P – абсолютное давление, Па;

v – удельный объем, м³/кг;

T – абсолютная температура, К;

R – удельная (индивидуальная) газовая постоянная, Дж/кг·К.

$$R = \frac{\mu R}{\mu} = \frac{8314}{\mu},$$

где μR – универсальная газовая постоянная, равная 8314 Дж/кмоль·К;

μ – молекулярная масса газа, кг/кмоль.

Уравнение состояния идеального газа иначе называется уравнением Клапейрона, который в 1834 г. вывел его как следствие из законов Бойля-Мариотта, Гей-Люссака и Шарля.

Закон Бойля-Мариотта устанавливает зависимость между давлением и объемом идеального газа в изотермическом процессе ($T = const$). Для двух состояний газа соотношение между параметрами имеет вид

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1}{V_2} \text{ или } PV = const.$$

Закон Гей-Люссака устанавливает зависимость между температурой и объемом газа в изобарном процессе (при $P = const$)

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Закон Шарля справедлив для изохорного процесса идеального газа ($V = const$)

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Эти законы справедливы только для идеального газа, под которым подразумевается газ, между молекулами которого отсутствуют силы взаимодействия, а сами молекулы принимаются за материальные точки, не имеющие объема.

3. Описание экспериментальной установки

Схема установки представлена на рис. 1.

Известно, что изобарный процесс парообразования одновременно является изотермическим, поэтому система, в которой происходит фазовый переход «жидкость – пар», может быть использована в качестве термостата. На данной установке термостатирование осуществляется водой, кипящей при атмосферном давлении.

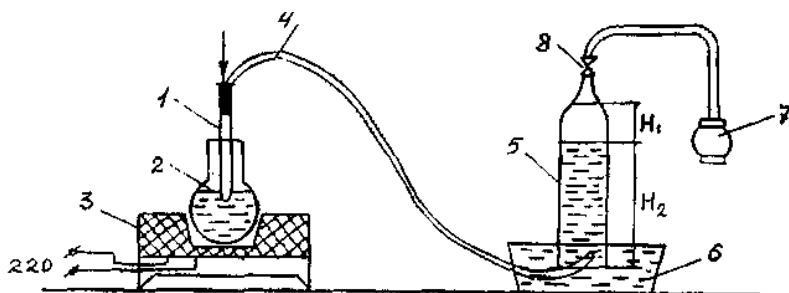


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Установка состоит из пробирки 1, помещенной в термостат 2. Обогрев термостата производят электронагревателем 3. Образующийся в пробирке пар исследуемой жидкости (четырёххлористый углерод CCL_4 или этиловый спирт C_2H_5OH – задается преподавателем) вытесняет воздух через трубку 4 в измерительную бюретку 5 емкостью 50 см^3 , которая открытым концом помещена в сосуд 6 с водой. Для заполнения измерительной бюретки водой служат емкость 7 и кран 8.

Температура пробирки и находящегося в ней воздуха принимается равной температуре кипения воды при атмосферном давлении.

4. Порядок проведения опыта

1. Открыв кран 8, с помощью емкости 7 заполнить измерительную бюретку 5 водой до верхней отметки.

2. Когда вода в термостате закипит, через иглу шприца ввести исследуемую жидкость в пробирку 1. Так как температура кипения исследуемой жидкости намного ниже температуры кипения воды (при атмосферном давлении $76,7^\circ\text{C}$ для жидкости CCL_4 и $78,3^\circ\text{C}$ для этилового

спирта), то она практически мгновенно превращается в пар и вытесняет воздух из пробирки, а он, в свою очередь, воду из бюретки.

3. После того, как в измерительной бюретке прекратится выделение пузырьков воздуха, измерить уровень воды в бюретке Н.

4. Измерить температуру воздуха в лаборатории, равную температуре воды в сосуде 6, а также барометрическое давление.

5. Результаты измерений занести в журнал наблюдений.

6. Рассчитать удельный объем пара исследуемой жидкости, полученный в опыте и сравнить с найденным по уравнению состояния идеального газа.

5. Обработка результатов измерения

По методу Майера объем пара исследуемой жидкости равен объему воздуха, вытесненного из пробирки.

Объем пара (воздуха) определяется в опыте по уравнению, м^3 ,

$$V_B = H_1 S \cdot 10^{-4},$$

где S – площадь сечения измерительной бюретки, $S = 1 \text{ см}^2$;

H_1 – высота столба воздуха, вытеснившего воду, м.

$$H_1 = 50 - H_2.$$

В измерительной бюретке воздух находится при температуре воды в сосуде. Давление воздуха в бюретке не равно барометрическому, так как в воздухе над уровнем жидкости присутствуют водяные пары. Кроме того, надо учесть давление, создаваемое столбом оставшейся в бюретке воды.

Поэтому рассчитанный объем пара (воздуха) необходимо привести сначала к температуре пара в пробирке, а затем к давлению в пробирке, равному барометрическому.

Для определения объема пара, который он занимал бы при температуре пара в пробирке, воспользуемся математическим выражением закона Гей-Люссака, м^3 ,

$$\frac{V_{II}}{V_B} = \frac{T_{II}}{T_B},$$

откуда

$$V_{II} = V_B \frac{T_{II}}{T_B},$$

где V_B – объем пара (воздуха, а затем вытесненной воды) при температуре в сосуде 6, м^3 ;

T_{II} – температура пара в пробирке, равная температуре кипения воды в термостате, К;

T_B – температура пара (воздуха, а затем воды) в измерительной бюретке, равная температуре воды в сосуде 6, К.

Для приведения объема пара к давлению пара в пробирке необходимо воспользоваться математическим законом Бойля-Мариотта, который для данного случая будет иметь вид, м^3 ,

$$\frac{V}{V_{II}} = \frac{P}{B},$$

откуда

$$V = V_{II} \cdot \frac{P}{B},$$

где V_{II} – объем пара, приведенный к температуре пара в пробирке и рассчитанный по закону Гей-Люссака, м^3 ;

P – действительное давление воздуха в измерительной бюретке, Па.

$$P = B - P_h - P_{II},$$

где B – барометрическое (атмосферное) давление, Па;

P_{II} – парциальное давление водяного пара в бюретке (берется из таблиц [3] как давление насыщенного пара при температуре воды в сосуде 6), Па;

P_h – давление, создаваемое столбом воды высотой H_2 , Па

$$P_h = g \rho H_2,$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

$\rho = 1000 \text{ кг / м}^3$ – плотность воды;

H_2 – высота столба воды, оставшейся в бюретке, м.

Удельный объем пара исследуемой жидкости равен, $\text{м}^3/\text{кг}$

$$v = \frac{V}{M_{ж}},$$

где V – действительный полный объем пара исследуемой жидкости, м^3 ;

$M_{ж}$ – масса введенной исследуемой жидкости, кг.

Массу введенной жидкости рассчитывают следующим образом, кг,

$$M_{ж} = V_{жс} \cdot \rho_{жс},$$

где $V_{жс}$ – объем исследуемой жидкости (задается преподавателем), см^3 ;

$\rho_{жс}$ – плотность исследуемой жидкости при температуре воздуха в лаборатории, г / см^3 .

Журнал наблюдений

Объем вве- денной жидкости $V_{ж}, \text{ м}^3$	Масса вве- денной жидкости $M_{ж}, \text{ кг}$	Высота столба воздуха в бюретке $H_1, \text{ м}$	Высота столба остав- шейся воды $H_2, \text{ м}$	Темпе- ратура воды в сосуде 6 $T_B, \text{ К}$	Парци- альное давление пара $P_{II}, \text{ Па}$	Баромет- рическое давление В,		Темпера- тура кипения воды в термостате $T_{II}, \text{ К}$
						мм.рт.ст	Па	

Рассчитанный удельный объем пара исследуемой жидкости сравнить с удельным объемом, найденным по уравнению состояния идеального газа, $\text{м}^3/\text{кг}$

$$v = \frac{RT}{P},$$

где R – удельная газовая постоянная для пара исследуемой жидкости, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

T – температура пара исследуемой жидкости в пробирке, равная температуре кипения воды в термостате, К;

P – давление пара исследуемой жидкости в пробирке, равное барометрическому, Па.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать законы идеальных газов: Бойля-Мариотта, Гей-Люссака, Шарля.
2. Написать уравнение состояния идеального газа для 1 кг, Мкг, 1 киломоля.
3. Какой газ можно считать идеальным?
4. Почему удельный объем, определенный опытным путем, отличается от найденного по уравнению состояния?
5. Объяснить физический смысл газовой постоянной, удельной (индивидуальной) и универсальной.

Библиографический список

1. Зубарев В.Н., Александров А.А. Практикум по технической термодинамике. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Теплотехника: учебник / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; под ред. В.Н. Луканина. 6-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2008. 671 с.
3. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1974.

Лабораторная работа ТД №6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ

1. Цели работы

1. Определение зависимости между давлением и температурой насыщения водяного пара.
2. Определение теплоты парообразования.

2. Теоретическая часть

Парообразование – процесс превращения вещества из жидкого состояния в газообразное [1]. Рассмотрим этот процесс на диаграммах состояния P - V , T - S и h - S , а также на фазовой диаграмме P - T (рис. 1).

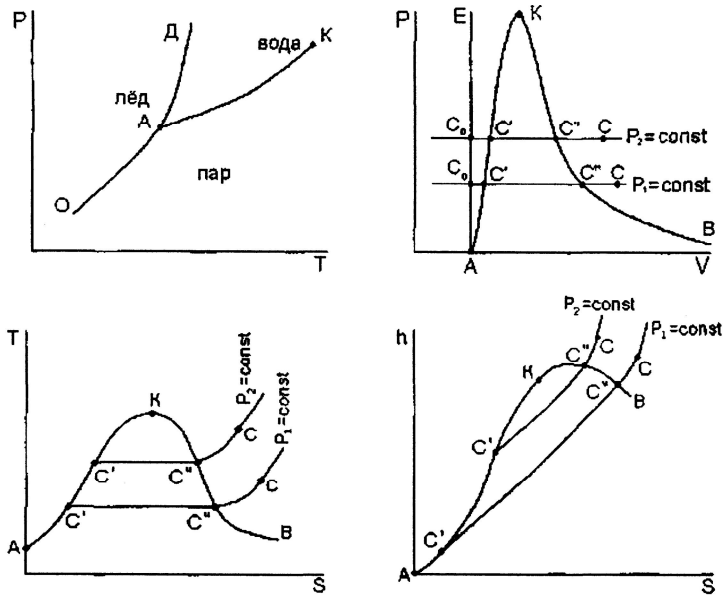


Рис. 1. Диаграммы состояния водяного пара

Начальное состояние воды, находящейся под давлением P и имеющей температуру 0°C , изобразится на диаграмме P - V точкой C_0 . При подводе теплоты к воде ее температура постепенно повышается до тех пор, пока не достигнет температуры кипения T_s , соответствующей данному давлению. Состояние кипящей жидкости изобразится на диаграммах точкой C' . При дальнейшем подводе теплоты начинается процесс парообра-

зования. В сосуде теперь находится двухфазная среда – **смесь кипящей воды и сухого насыщенного пара, называемая влажным насыщенным паром**. По мере подвода теплоты количество жидкой фазы уменьшается, а паровой – увеличивается. Температура смеси при этом остается неизменной и равной T_s , так как вся теплота расходуется на испарение жидкой фазы. Следовательно, процесс парообразования на этой стадии является изобарно-изотермическим. Наконец, в некоторый момент времени последняя капля воды превращается в пар, который заполняет весь объем сосуда.

Пар, в котором нет воды, но температура равна температуре насыщения T_s , называется **сухим насыщенным паром**. Состояние его изображается точкой C'' .

Насыщенным называется пар, находящийся в термическом и динамическом равновесии с жидкостью, из которой он образуется.

Динамическое равновесие заключается в том, что количество молекул, вылетающих из воды в паровое пространство, равно количеству молекул, конденсирующихся на ее поверхности. В паровом пространстве при равновесном состоянии находится максимально возможное при данной температуре число молекул. Пар является насыщенным в том смысле, что при изотермическом сжатии часть его конденсируется без изменения давления и плотности. При увеличении температуры количество молекул, обладающих энергией, достаточной для вылета в паровое пространство, увеличивается. Равновесие восстанавливается за счет возрастания давления пара, которое ведет к увеличению его плотности и, следовательно, количества молекул, конденсирующихся на поверхности воды. Отсюда следует, что давление насыщенного пара является монотонно возрастающей функцией его температуры или, что то же самое, температура насыщенного пара есть монотонно возрастающая функция его давления.

Массовая доля сухого насыщенного пара во влажном называется **степенью сухости пара** и обозначается буквой X . Массовая доля кипящей жидкости (воды) во влажном паре называется **степенью влажности** и обозначается буквой Y . Очевидно, что $X + Y = 1$.

Для кипящей жидкости $X = 0$, для сухого насыщенного пара $X = 1$. Все линии постоянной степени сухости выходят из критической точки и располагаются между пограничными кривыми. Для влажного насыщенного пара степень сухости изменяется от 0 до 1.

При сообщении сухому насыщенному пару теплоты при том же давлении его температура будет повышаться (точка C на рис. 1). Таким образом, **перегретым называется пар**, температура которого выше температуры насыщения при том же давлении.

Рассматривая процесс парообразования при более высоких давлениях, можно заметить следующие изменения. Точка C_0 остается на той же вертикали, так как вода практически несжимаема. Точка C' смещается вправо, поскольку удельный объем кипящей жидкости хоть и незначительно, но растет. Точка C'' смещается влево, так как сухой насыщенный пар при повышении давления сжимается.

При некотором значении давления удельные объемы кипящей жидкости и сухого насыщенного пара сравниваются. Эта точка называется критической и обозначается буквой K . В критической точке исчезают различия между жидкостью и паром. Все термодинамические параметры, характеризующие это состояние, называются критическими.

Критическая температура – это максимально возможная температура сосуществования жидкости и насыщенного пара. При сверхкритических температурах возможно состояние только перегретого пара.

Буквой A на фазовой диаграмме P - T обозначается тройная точка, в которой могут одновременно находиться в равновесии пар, вода и лёд. На P - V , T - S и h - S -диаграммах она разворачивается в прямую линию (изобару) AB .

Если соединить одноименные точки, то получим нулевую изотерму AE , каждая точка которой соответствует состоянию 1 кг воды при 0°C и давлению P , нижнюю пограничную линию AK ($X = 0$), представляющую зависимость удельного объема кипящей жидкости от давления при температуре насыщения, и верхнюю пограничную кривую KB ($X = 1$), описывающую зависимость удельного объема сухого насыщенного пара от давления.

Влево от кривой AK до нулевой изотермы AE лежит область воды, вправо от линии KB и выше критической точки – область перегретого пара, между пограничными кривыми AK и KB – область влажного насыщенного пара. Нижняя пограничная кривая AK соответствует состоянию кипящая жидкость, верхняя пограничная кривая KB соответствует состоянию сухой насыщенный пар.

Для процесса парообразования справедливо уравнение Клапейрона-Клаузиуса

$$\frac{dP}{dT} = \frac{r}{T(V' - V'')},$$

где r – теплота парообразования – это количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг кипящей жидкости в 1 кг сухого насыщенного пара при данном давлении.

При малых давлениях величина удельного объема сухого насыщенного пара V'' на несколько порядков больше величины удельного объема

кипящей жидкости V , поэтому разность $V'' - V$ можно с достаточной точностью заменить величиной V'' .

При малых давлениях пар можно рассматривать как идеальный газ: его удельный объем можно определить из уравнения состояния Клапейрона

$$V'' = \frac{RT}{P}.$$

С учетом этого условия уравнение Клапейрона-Клаузиуса примет вид

$$\frac{dP}{dT} = \frac{rP}{TRT} = \frac{rP}{RT^2},$$

отсюда

$$\frac{dP}{P} = \frac{rdT}{RT^2}.$$

Зависимость теплоты парообразования от температуры при малых давлениях оказывается относительно слабой, поэтому в ряде случаев можно считать ее практически независимой от температуры и, следовательно, при интегрировании последнего уравнения ее можно вывести за знак интеграла.

$$\ln \frac{P}{P_0} = -\frac{r}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right),$$

где $P_0 = 760$ мм рт. ст. – нормальное атмосферное давление;

T_0 – температура кипения при нормальном атмосферном давлении, К.

Из этого уравнения следует, что при невысоких давлениях зависимость $\ln P / P_0 = f(1/T)$ имеет линейный характер (рис. 2).

Тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс представляет собой отношение r/R , отсюда

$$r = R \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где R – удельная газовая постоянная водяного пара, кДж/(кг·К).

$$R = \frac{8,314}{18} = 0,462;$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\ln \frac{P_2}{P_0} - \ln \frac{P_1}{P_0}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}.$$

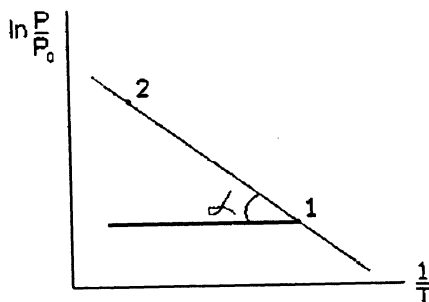


Рис. 2. Зависимость $\ln P / P_0 = f(1 / T)$

Для многих веществ линейный характер зависимости $\ln P / P_0 = f(1 / T)$ сохраняется и в области высоких давлений, где заведомо нельзя рассматривать пар как идеальный газ и нельзя пренебрегать величиной V , и там, где величина r существенно зависит от температуры.

3. Описание экспериментальной установки

Схема установки представлена на рис. 3. Установка состоит из толстостенного металлического сосуда высокого давления 1, внутрь которого залита вода. Сосуд и вода нагреваются от электронагревателя 2, включенного в сеть через автотрансформатор 3. Давление насыщенного пара измеряется образцовым манометром 4, температура — с помощью хромель-алюмелевой термопары 5 и милливольтметра 6.

4. Порядок проведения эксперимента

1. Подготовить журнал наблюдений (табл. 1).
2. Включить установку в сеть. Напряжение в опыте не должно превышать 150 В.
3. Следить за изменением показаний милливольтметра и манометра. При достижении давления насыщенного пара 75 кгс/см^2 (30 делений манометра) отключить автотрансформатор и записать первые показания приборов в журнал наблюдений.
4. Продолжать опыт, записывая значения давления через каждые два деления манометра, и соответствующие значения температуры насыщенного пара.

Таблица 1

Журнал наблюдений и расчетов

№ п/п	Избыточное давление насыщенного пара $P_{изб}$			Атмосферное давление P_0		Абсолютное давление P	Температура насыщенного пара T			Табличные значения	
	Показания манометра (число делений)	кг/см ²	10 ⁵ Па	мм рт. ст.	10 ⁵ Па	10 ⁵ Па	mV	°C	К	Давление $P_{табл}$, 10 ⁵ Па	Теплота парообразования $r_{табл}$, кДж/кг
1	30	75									
2	28	70									
.	.										
.	.										
.	.										
15	2										
16	0										

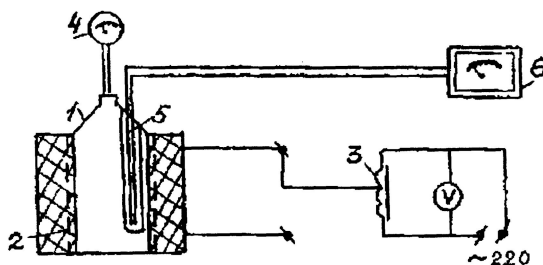


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

5. Записать в журнал наблюдений атмосферное давление P_0 и температуру окружающего воздуха в лаборатории T_0 .

5. Обработка результатов измерений

1. Построить опытную и табличную [2] зависимости давления от температуры насыщенного водяного пара $P = f(T)$. Значения температур откладывать на оси абсцисс. Сделать вывод.

2. Абсолютное давление P в опыте рассчитать по формуле, 10^5 Па,

$$P = P_0 + P_{\text{ИЗБ}} ,$$

где $P_{\text{ИЗБ}}$ – давление, измеренное по манометру, 10^5 Па.

3. Для каждой опытной точки рассчитать значения P / P_0 , $\ln(P / P_0)$ и $1/T$, занести в табл. 2 и построить эмпирическую зависимость $\ln(P / P_0) = f(1/T)$. При более точных расчетах этой зависимости необходимо использовать метод наименьших квадратов [3].

4. Определить тангенс угла наклона прямой и рассчитать теплоту парообразования по формуле

$$r = R \operatorname{tg} \alpha .$$

5. Полученное значение теплоты парообразования сравнить с табличным для измеренного интервала давлений (температур).

Таблица 2

Результаты расчетов

№ п/п	$1/T$, К	P / P_0	$\ln P / P_0$	Опытная теплота парообразования $r_{\text{оп}}$, кДж/кг
1				
2				
...				
15				
16				

Контрольные вопросы

1. Какой пар называется влажным насыщенным, сухим насыщенным, перегретым? Показать на диаграммах.
2. Что называется теплотой парообразования?
3. Чему эквивалентна теплота парообразования в диаграммах состояния P-V, T-S и h-S?
4. Какое уравнение используется для определения теплоты парообразования?

Библиографический список

1. Теплотехника: учебник / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; под ред. В.Н. Луканина. 6-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2008. 671 с.
2. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1974.
3. Пискунов Н.С. Дифференциальное исчисление. Т. 2. М.: Наука, 1966.

Лабораторная работа ТД №12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОЛИТРОПЫ

1. Цель работы

Определение показателя политропного процесса двумя способами на примере индикаторной диаграммы компрессора.

2. Теоретическая часть [1]

Политропными называют термодинамические процессы, удовлетворяющие уравнению

$$P \cdot V^n = const \quad (1)$$

при произвольном, постоянном для данного политропного процесса значении n . Величину n называют *показателем политропного процесса*.

Показатель политропы для различных политропных процессов может принимать любые значения от $-\infty$ до $+\infty$. Понятие политропного процесса обобщает все остальные известные нам термодинамические процессы: нетрудно убедиться, что изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы представляют собой частные случаи политропных процессов.

В самом деле, из уравнения (1) очевидно, что политропный процесс с показателем $n = 0$ представляет собой изобарный процесс $P = const$; с показателем $n = \pm\infty$ – изохорный процесс $V = const$; с показателем $n = k$ – адиабатный процесс $P \cdot V^k = const$; с показателем $n = 1$ – изотермический процесс $P \cdot V = const$.

На рис. 1 представлены P-V и T-S диаграммы, в которых нанесены кривые различных политропных процессов.

Понятие политропных процессов широко используется при изучении процессов сжатия и расширения в газовых двигателях и компрессорах. Реальные процессы сжатия и расширения в газовых двигателях и компрессорах часто не являются ни адиабатными, ни изотермическими, а занимают промежуточное положение между этими видами процессов. Поэтому обычно встречаемые на практике значения показателя политропы лежат в интервале от 1 до k .

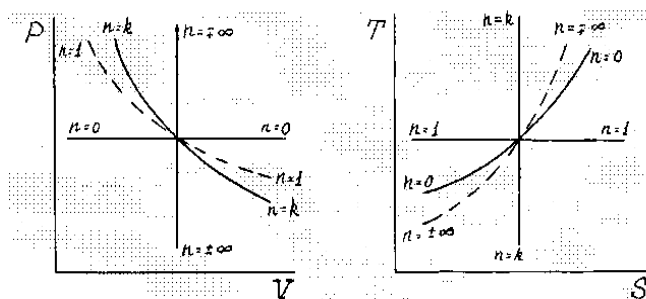


Рис. 1. P-V и T-S диаграммы политропных процессов

Индикаторная диаграмма

Индикаторную диаграмму можно снять с любой работающей поршневой машины при помощи особого прибора, называемого индикатором.

Индикаторная диаграмма представляет собой замкнутый контур, состоящий из ряда отдельных процессов, каждый из которых дает графическое изображение характера изменения давления и объема рабочего тела в различные периоды работы машины.

3. Описание экспериментальной установки

Индикаторная диаграмма реального одноступенчатого поршневого компрессора, изображенная на рис. 2, состоит из следующих отдельных процессов: 4-1 – всасывание рабочего тела (воздуха или другого газа); 1-2 – политропное сжатие рабочего тела; 2-3 – выталкивание сжатого газа в нагнетательный трубопровод; 3-4 – политропное расширение оставшегося в мертвом пространстве сжатого газа.

Длина индикаторной диаграммы дает в некотором масштабе объем, описываемый поршнем при его ходе из одного крайнего положения в другое, V_h . Этот объем называется рабочим объемом цилиндра компрессора; на диаграмме он измеряется в мм.

Пространство между крышкой цилиндра компрессора и поршнем, находящимся в ближайшем крайнем положении, называется мертвым

пространством; объем мертвого пространства V_0 также измеряется в мм. Отношение объема мертвого пространства к рабочему объему цилиндра называется относительным объемом

$$\xi = V_0 / V_h.$$

Перед снятием индикаторной диаграммы проводится линия атмосферного давления; на чертеже – задании и на рис. 2 это горизонталь $P = 1$ бар.

Величина m на индикаторной диаграмме представляет собой масштаб пружины индикатора, численно равный перемещению карандаша индикатора в мм при изменении давления в цилиндре машины на 1 бар (в технической системе единиц на 1 кг/см^2).

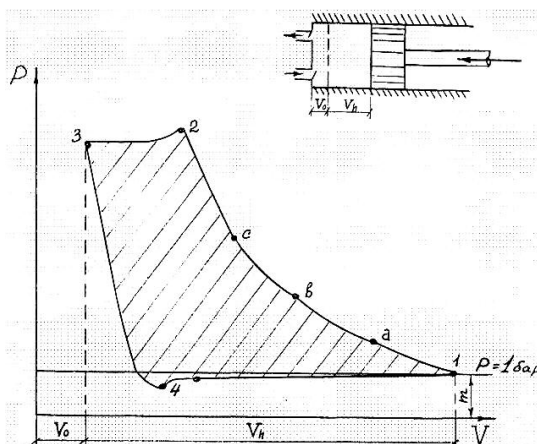


Рис. 2. Индикаторная диаграмма компрессора

Планиметр и его работа

Планиметр [2] используется для определения площадей любых плоских фигур, имеющих неправильную форму. Площадь плоских фигур правильной формы (круг, квадрат, треугольник и др.) рассчитывается по соответствующим формулам.

Схема полярного планиметра приведена на рис. 3. Полусный рычаг ОА может вращаться вокруг точки О, называемой полюсом. В точке рычаг ОА имеет короткую иглу, которую вкалывают в чертежную доску. Для закрепления положения полюса О на бумаге сверху накладывают небольшой грузик. На другом конце А рычага ОА имеется штифт для шарнирного соединения с обводным рычагом АВ. Рычаг АВ свободно вращается вокруг шарнира А. На конце В рычага АВ находится свободный штифт с рукояткой (или стекло с визирующей точкой). С помощью

рукоятки штифтом обводят замкнутую линию, ограничивающую измеряемую площадь. Для регулирования прибора рычаг АВ выполняют составным; длину его можно изменять посредством особого винта. С рычагом АВ связано измерительное колесо С. При обводе контура замкнутой фигуры измерительное колесо перемещается вместе с обводным рычагом, скользя или катаясь по плоскости. Измерительное колесо связано с механизмом, считающим число оборотов колеса (рис. 3). Шкала, нанесенная на измерительное колесо, разбита на 100 равных частей. Счетный диск Д связан с измерительным колесом червячной передачей с передаточным числом 10:1 и имеет 10 делений. Каждое деление счетного диска соответствует 100 делениям измерительного колеса. За один оборот измерительного колеса счетный диск поворачивается на одно деление. Нониус Е, имеющийся на счетном механизме, позволяет получить отсчеты показаний планиметра с точностью до тысячных долей оборота счетного диска.

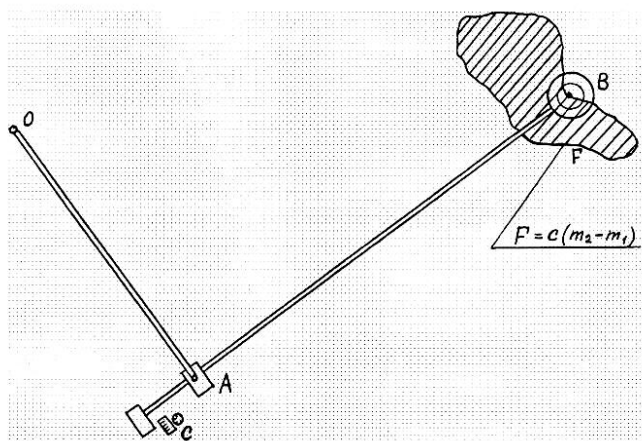


Рис. 3. Схема планиметра

Показания счетного механизма записывают в такой последовательности (рис. 4): первую цифру берут по циферблату счетного диска против неподвижного указателя (надо брать меньшую цифру); вторую и третью цифры берут по шкале, имеющейся на измерительном колесе (записывают меньшую из трех цифр, между которыми находится нулевой штрих нониуса); четвертую цифру определяют по нониусу. Так, в положении, указанном на рис. 4, отсчет показаний $m = 144,7$, так как по нониусу совпадает седьмой штрих.

Весь прибор опирается на чертежную доску (или поверхность стола) в трех точках: полюс О, конец штифта В и точка обвода измерительного колеса С, в которой оно касается плоскости фигуры (см. рис. 3).

Процесс планиметрирования заключается в следующем: на чертежной доске закрепляют лист с индикаторной диаграммой и устанавливают планиметр, соединив между собой разъемным шарниром обводной и полюсный рычаги прибора. Место для установки полюса О выбирают вне контура диаграммы с таким расчетом, чтобы при обводе всего контура измеряемой площади угол между рычагами ОА и АВ колебался около прямого, отклоняясь от 90° в обе стороны примерно на одинаковую величину. После этого совмещают конец штифта В (визирующую точку на стекле) с какой-либо точкой на контуре диаграммы, приняв ее за исходную, и производят начальный отсчет показаний счетчика планиметра. Далее обводят по часовой стрелке острием штифта контур фигуры, площадь которой желают найти, до возвращения штифта в исходную точку и снова делают отсчет показаний счетного механизма.

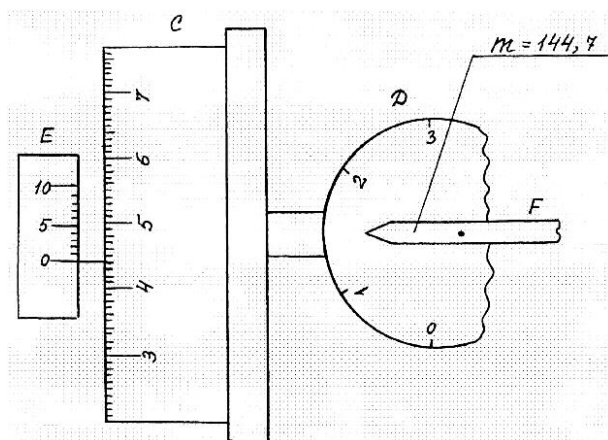


Рис. 4. Счетный механизм планиметра

Площадь обведенного контура определяют по формуле

$$F = C \cdot (m_2 - m_1),$$

где C – постоянная планиметра, представляет собой площадь в см^2 , описанную концом штифта при перемещении измерительного колеса на одно деление при данном соотношении длин рычагов ОА и АВ;

m_1 – показание счетного механизма до обвода контура;

m_2 – показание счетного механизма после обвода контура.

Значение постоянной планиметра C зависит от размеров и соотношения длин полюсного и обводного рычагов и в данной работе подлежит определению.

4. Порядок проведения опыта

1. Найти на индикаторной диаграмме компрессора площади прямоугольников W_1 и W_2 .
2. Определить постоянную планиметра C .
3. С помощью планиметра определить площадь W_0 по формуле (4).
4. Пользуясь линейкой, определить с точностью до 0,5 мм абсциссы и ординаты точек 1, а, в, ..., 2.
5. Произвести расчет показателя политропы двумя способами по формулам (3) и (5). Сравнить результаты.

5. Обработка результатов измерения

Показатель политропного процесса можно определить из соотношения

$$n = L' / L, \quad (2)$$

где L' – полезная или располагаемая работа;

L – работа расширения или сжатия.

На диаграмме P – V (рис. 5) работа процесса сжатия 1-2 или процесса расширения 3-4 измеряется площадью под кривой процесса; работа полезная измеряется площадью сбоку от кривой соответствующего процесса.

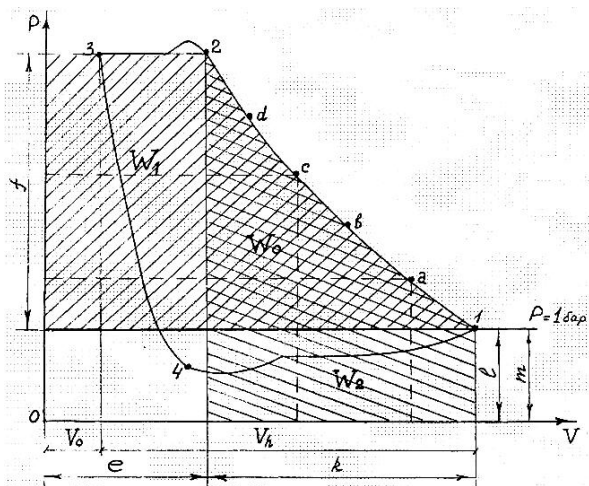


Рис. 5. Образец индикаторной диаграммы компрессора

Выражение (2) можно представить в виде

$$n = (W_1 + W_0) / (W_2 + W_0), \quad (3)$$

где $W_1 + W_0$ – площадь, эквивалентная полезной работе процесса 1-2;

$W_2 + W_0$ – площадь, эквивалентная работе сжатия процесса 1-2.

Площади W_1 и W_2 определяют путем непосредственного измерения линейкой длин сторон (см) соответствующих прямоугольников. На индикаторной диаграмме компрессора (см. рис. 5)

$$W_1 = e \cdot f, \quad W_2 = k \cdot l.$$

Площадь W_0 определяют с помощью планиметра. Для большей точности определения площади W_0 обвод контура производят два раза и берут среднюю по двум обводам разность показаний счетного механизма

$$W_0 = C \cdot 0,5 \cdot [(m_2 - m_1) + (m_2' - m_1')], \quad (4)$$

где C – постоянная планиметра;

m_1 – показание счетного механизма до обвода контура;

m_2 – показание счетного механизма после обвода.

В данной лабораторной работе для определения постоянной планиметра C вычерчивают квадрат со стороной $a = 10$ см. Площадь этого квадрата – a^2 , т.е. 100 см^2 . Устанавливают правильно планиметр (см. выше). Начальную точку обвода фиксируют тонким штрихом. Конец рычага B устанавливают в начальную точку и делают первую запись счетного механизма m_1 . После обвода по часовой стрелке записывают второе показание счетного механизма m_2 ; подсчитывают разность $(m_2 - m_1)$.

Делают второй (контрольный) обвод контура и вновь вычисляют величину $(m_2' - m_1')$. Если разности $(m_2 - m_1)$ и $(m_2' - m_1')$ отличаются друг от друга незначительно, то обвод контура считается удовлетворительным. Рассчитывают среднюю разность отсчетов счетного механизма для квадрата и определяют постоянную планиметра, $\text{см}^2/\text{дел.}$ из уравнения

$$C = 100 / (m_2 - m_1)_{\text{ср.}}$$

Подсчитав величины площадей W_1 , W_2 , W_0 для политропы сжатия 1-2, находят по формуле (3) значение показателя политропы.

Второй способ определения показателя политропы заключается в следующем: кривую сжатия 1-2 индикаторной диаграммы компрессора разбивают на несколько приблизительно равных отрезков; точки деления отмечают на кривой и называют их, начиная от точки 1, по порядку а, в, с, ..., 2.

С помощью линейки определяют абсциссы (объем) и ординаты (давление) соответствующих точек. Пользуясь уравнением политропного процесса $P_1 \cdot V_1^n = P_2 \cdot V_2^n$, находят значения показателя политропы по следующей формуле сначала для каждого отрезка

$$n = \frac{\lg P_1 - \lg P_2}{\lg V_2 - \lg V_1}, \quad (5)$$

а затем среднее значение для всей политропы сжатия 1-2

$$n = \frac{n_{1-a} + n_{a-e} + \dots + n_{o-2}}{z},$$

где z – число отрезков, на которые была разделена политропа сжатия 1-2.

Полученные двумя способами значения показателя политропы сравнить между собой.

Аналогично можно определить значение показателя политропы для кривой расширения 3-4.

Отчет по работе должен содержать:

- цель работы;
- индикаторную диаграмму компрессора;
- результаты измерений;
- определение постоянной планиметра;
- расчет показателя политропы.

Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется политропным?
2. Дать определения и написать уравнения основных термодинамических процессов.
3. Изобразить термодинамические процессы в P-V и T-S диаграммах и объяснить:
 - а) почему на P-V диаграмме адиабата изображается круче изотермы?
 - б) почему на T-S диаграмме изохора изображается круче изобары?
 - в) почему на T-S диаграмме адиабатный процесс изображается вертикальной линией $S = \text{const}$?
4. Чем отличается индикаторная диаграмма компрессора от P-V диаграммы?
5. Какой процесс сжатия в компрессоре (изотермический, адиабатный или политропный) является наиболее выгодным и почему?

Библиографический список

1. Теплотехника: учебник / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; под ред. В.Н. Луканина. 6-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2008. 671 с.
2. Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче / под ред. В.И. Крутова. М.: Высшая школа, 1988.

РАЗДЕЛ «ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»

Лабораторная работа ТП №1

ПЕРЕДАЧА ТЕПЛОТЫ ЧЕРЕЗ СТЕНКУ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ РЕЖИМЕ

1. Цели работы

1. Определить количество теплоты, передаваемой теплопроводностью через одно- и двухслойную стенки.
2. Определить потери теплоты с внешней поверхности одно- и двухслойной стенок конвекцией и излучением.
3. Сделать вывод о величине потерь теплоты через одно- и двухслойную стенки.

2. Теоретическая часть

Теплопроводность – процесс передачи теплоты микрочастицами при их непосредственном соприкосновении. При нагревании или охлаждении тела температура в каждой его точке непрерывно изменяется во времени*.

Для математического описания температурного поля тела используют дифференциальное уравнение теплопроводности (1), которое для одномерной задачи имеет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Различают два характерных случая температурного состояния тела: нестационарное и стационарное.

Температурное состояние тела, при котором температура является функцией времени, называется нестационарным (неустановившимся).

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \neq 0 \quad \text{и} \quad t \neq \text{const}.$$

Температурное состояние тела, неизменное во времени, называется стационарным (установившимся), при этом

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0.$$

* Теплотехника: учебник / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; под ред. В.Н. Луканина. 6-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2008. 671 с.

Температура в различных точках может быть и одинаковой, и разной. В таком состоянии тела приход теплоты равен ее расходу.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (1) при стационарном режиме для одномерного температурного поля принимает вид

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0. \quad (2)$$

Дважды интегрируя это уравнение, получим последовательно

$$\frac{dt}{dx} = C_1 \quad (3)$$

и
$$t = C_1 x + C_2. \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что распределение температуры по толщине стенки для стационарного теплового режима осуществляется по прямой линии.

Уравнение (4) есть общее решение уравнения (2). Для нахождения значения постоянных C_1 и C_2 следует задать граничные условия. Используем граничные условия первого рода, для этого необходимо знать температуры внутренней $t_{вн}$ и наружной $t_{н}$ поверхностей стенки.

$$\text{При } x = 0 \quad t = t_{вн}, \quad (5)$$

$$\text{При } x = \delta \quad t = t_{н}, \quad (6)$$

где δ – толщина стенки.

Подставив (5) в уравнение (4), находим $C_2 = t_{вн}$.

При подстановке условия (6) в уравнение (4) получаем

$$t_{н} = C_1 \delta + t_{вн},$$

откуда
$$C_1 = -\frac{t_{вн} - t_{н}}{\delta}. \quad (7)$$

Следовательно, уравнение (4) будет иметь вид

$$t = t_{вн} - \frac{t_{вн} - t_{н}}{\delta} x. \quad (8)$$

Уравнение (8) позволяет определить температуру в любой точке по толщине стенки при условии $\lambda = \text{const}$.

Для определения плотности теплового потока, проходящего через плоскую стенку путем теплопроводности, используется закон Фурье (6).

$$q = -\lambda \text{ grad } t = -\lambda \frac{dt}{dx}. \quad (9)$$

Из (3) и (7) следует, что

$$\frac{dt}{dx} = C_1 = -\frac{t_{вн} - t_n}{\delta},$$

тогда

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{вн} - t_n). \quad (10)$$

Коэффициент теплопроводности λ (Вт/мК) характеризует количество теплоты, переданное через единицу поверхности в единицу времени при градиенте температур в один градус на 1 м толщины стенки.

Отношение $k = \lambda/\delta$ называется тепловой проводимостью стенки, ее размерность $Вт/м^2 \cdot град$. Отношение $R = \delta/\lambda$ называется внутренним тепловым (термическим) сопротивлением стенки, оно имеет размерность $\frac{м^2 \cdot град}{Вт}$.

Если стенка многослойная, то плотность теплового потока, передаваемого от внутренней поверхности стенки к наружной, следует рассчитывать по формуле

$$q = \frac{t_{вн} - t_n}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}}, \quad (11)$$

где $\frac{\delta_1}{\lambda_1}, \frac{\delta_2}{\lambda_2}$, – внутренние тепловые сопротивления отдельных слоев стенки, имеющих различные величины коэффициента теплопроводности.

Если температура наружной поверхности стенки выше температуры окружающей среды, то будет происходить процесс отвода теплоты с поверхности стенки излучением и свободной конвекцией, причем при стационарном режиме тепловой поток, передаваемый теплопроводностью q_b , должен быть равен сумме тепловых потоков, передаваемых с поверхности излучением $q_{изл}$ и конвекцией q_k .

$$q_t = q_{изл} + q_k. \quad (12)$$

Плотность теплового потока, переданного от наружной поверхности стенки излучением, определяется по закону Стефана-Больцмана.

$$q_{изл} = \varepsilon_c c_0 \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 \right], \quad (13)$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\frac{Вт}{м^2 K^4}$;

ε_c – степень черноты стенки – отношение излучательной способности реального (серого) тела к излучательной способности абсолютно черного тела при той же температуре;

$T_n, T_{ж}$ – абсолютные температуры наружной поверхности стенки и окружающей среды, К.

Движение при свободной (естественной) конвекции осуществляется под действием разности плотностей холодного и нагретого воздуха в поле действия массовых сил (сил земного притяжения).

Передача теплоты конвекцией описывается законом Ньютона–Рихмана

$$q_k = \alpha_k (t_n - t_{ж}), \quad (14)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, $Вт/м^2 K$;

$t_n, t_{ж}$ – температуры наружной поверхности стенки и окружающей среды, °С.

Коэффициент теплоотдачи α_k зависит от большого числа факторов: природы возникновения движения (свободное или вынужденное), режима движения (ламинарный или турбулентный), физических параметров среды ($\lambda, \nu, C_p, \rho, a$), температуры среды, скорости движения, размера и формы поверхности, разности температур поверхности и окружающей среды Δt и т.д.

Коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность теплообмена конвекцией и определяет количество теплоты, переданное “с” или “на” единицу поверхности в единицу времени при разности температур между поверхностью и средой в один градус.

Для определения коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции можно использовать экспериментальную зависимость между безразмерными величинами (числами подобия) следующего вида:

$$Nu = C (Gr Pr)^n \varepsilon, \quad (15)$$

где C и n – опытные константы, которые приведены в табл. 1;

ε – поправочный коэффициент, зависящий от положения поверхности в пространстве.

Если теплоотдающая поверхность нагретой стороной обращена вверх, то $\varepsilon = 1,3$, если вниз, то $\varepsilon = 0,7$.

Числами подобия называют безразмерные комплексы, составленные из разнородных размерных физических величин. В уравнение (15) входят следующие числа подобия:

Nu – число подобия Нуссельта, характеризующее перенос теплоты в пограничном слое газа (жидкости), примыкающем к стенке. По физическому смыслу оно является безразмерным коэффициентом теплоотдачи;

Gr – число Грасгофа, характеризующее отношение подъемных сил к силам вязкости;

Pr – число подобия Прандтля, характеризующее соотношение инерционных свойств среды – гидромеханических и тепловых.

Таблица 1

Значения постоянных C и n в уравнении $Nu = c(Gr \cdot Pr)^n$

$Gr \cdot Pr$	C	n
$< 10^{-3}$	0,45	0
$10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$> 2 \cdot 10^7$	0,135	1/3

3. Описание экспериментальной установки

Установка состоит из однослойной магнезитовой стенки (кирпича) толщиной 65 мм и двухслойной стенки, состоящей из шамотного (верхний слой) и магнезитового (нижний слой) кирпичей общей толщиной 130 мм (65 + 65). Источником теплоты является электронагреватель. По толщине стенок вмонтированы хромель-алюмелевые термопары, как это схематично показано на рис. 1. Термопары через переключатель подсоединены к милливольтметру, показания которого записываются в журнал наблюдений.

В однослойную стенку вмонтированы три термопары, номера которых соответствуют точкам на переключателе 1, 2, 3. В двухслойную стенку вмонтированы шесть термопар, по три в каждом слое: в магнезитовом кирпиче номера термопар соответствуют точкам 4, 5, 6 переключателя, в шамотном кирпиче номера термопар соответствуют точкам 7, 8, 9 переключателя.

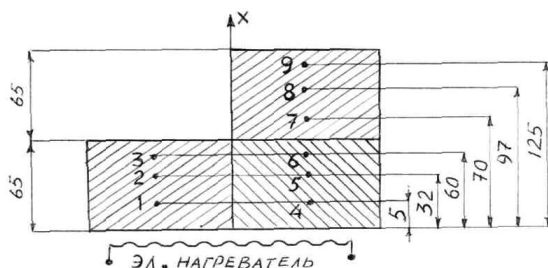


Рис. 1. Схема расположения термопар в стенках

4. Порядок проведения опыта

1. Для достижения стационарного теплового состояния необходимо установку включить за 1 ч до работы.

2. Через каждые пять минут записывать в журнал наблюдений показания милливольтметра. Всего сделать четыре замера, быстро переключая термопары с первой до последней, девятой.

3. Перевести с помощью градуировочной таблицы показания милливольтметра в градусы Цельсия, прибавив к каждому показанию температуру окружающей среды.

5. Обработка результатов измерения

1. Найти средние значения температуры для каждой из точек стенки: 1, 2, ..., 9.

2. Построить график в координатах $t - x$, где x – толщина слоя; она определяется расстоянием от начала оси абсцисс до точки, соответствующей месту установки термопары. Провести прямые линии через точки 1, 2, 3 в однослойной стенке; через точки 4, 5, 6, а затем через точки 7, 8, 9 – в двухслойной стенке (образец построения графика представлен на рис. 2).

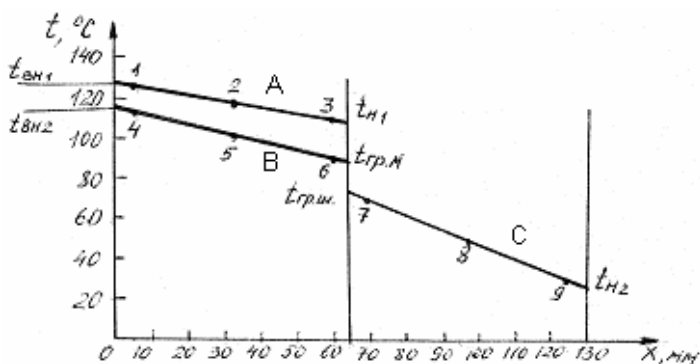


Рис. 2. Распределение температуры по толщине одно- и двухслойных стенок

Чтобы определить температуру внутренней поверхности обеих стенок $t_{вн1}$ и $t_{вн2}$, нужно продолжить линии A и B до пересечения с ординатой ($x = 0$); для определения температуры наружной поверхности однослойной стенки $t_{н1}$ необходимо продолжить линию A до границы $x = 65$ мм, а для определения температуры наружной поверхности двухслойной стенки $t_{н2}$ – линию C необходимо продолжить до границы $x = 130$ мм.

Температура на границе раздела двух кирпичей теоретически должна быть одинаковой для шамотного и магнезитового кирпичей ($t_{гр.ш} = t_{гр.м}$) и должна соответствовать точке пересечения линий B и C. Если в результате опыта этого не получилось, надо выявить возможные причины несовпадения.

3. Определить средние температуры однослойной стенки и каждого слоя (материала) двухслойной стенки как средние арифметические.

Для однослойной стенки $\bar{t}_{м1} = 0,5(t_{вн1} + t_{н1})$.

Для двухслойной стенки $\bar{t}_{м2} = 0,5(t_{вн2} + t_{зп})$;

$$\bar{t}_{и2} = 0,5(t_{зп} + t_{н2})$$

$$t_{зп} = 0,5(t_{зп.и} + t_{зп.м}),$$

где $t_{гр.ш}$ – температура поверхности шамотного кирпича на границе с магнезитовым кирпичом;

$t_{гр.м}$ – температура поверхности магнезитового кирпича на границе с шамотным кирпичом.

4. Найти значения коэффициентов теплопроводности шамотного кирпича по $\bar{t}_{и2}$ и магнезитового по $\bar{t}_{м1}$ и $\bar{t}_{м2}$, соответствующие их средним температурам

$$\lambda_{ш} = 0,84 + 0,6 \cdot 10^{-3} \bar{t}_{и2} \cdot \text{Вт/м} \cdot \text{К};$$

$$\lambda_{м} = 4,65 - 1,7 \cdot 10^{-3} \bar{t}_{м} \cdot \text{Вт/м} \cdot \text{К}.$$

5. Определить плотность теплового потока, передаваемого через стенку теплопроводностью:

для однослойной стенки по формуле

$$q_t = \frac{t_{вн1} - t_{н1}}{\delta_{ш} / \lambda_{ш}};$$

для двухслойной стенки по формуле

$$q_t = \frac{t_{вн2} - t_{н2}}{\frac{\delta_{и}}{\lambda_{и}} + \frac{\delta_{м}}{\lambda_{м}}}.$$

6. Определить потери теплоты излучением $q_{изл}$ с наружной поверхности, используя уравнение (13):

$$\text{однослойной стенки} \quad q_{изл} = C_0 \varepsilon_c \left[\left(\frac{T_{н1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 \right];$$

$$\text{двухслойной стенки} \quad q_{изл} = C_0 \varepsilon_c \left[\left(\frac{T_{н2}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 \right],$$

где $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

ε_c – степень черноты стенки (в данной работе $\varepsilon_c = 0,8$);

$T_{н1}$, $T_{н2}$, $T_{ж}$ – абсолютные температуры наружной поверхности однослойной и двухслойной стенок и окружающей среды, К.

7. Определить число подобия Грасгофа для однослойной и двухслойной стенки

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t ,$$

где g – ускорение силы тяжести, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

l – определяющий размер (для горизонтальных плоских поверхностей берется размер меньшей стороны), $l = 0,115 \text{ м}$;

ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; определяется по температуре пограничного слоя

$$t_{\text{пс}} = 0,5(t_{\text{н}} + t_{\text{ж}});$$

β – коэффициент объемного расширения,

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{ж}}} = \frac{1}{273 + t_{\text{ж}}} ;$$

$\Delta t = t_{\text{н}} - t_{\text{ж}}$ – разность температур наружной поверхности стенки и окружающей среды, град.

8. Число подобия Прандтля Pr определить при температуре пограничного слоя $t_{\text{пс}}$.

9. Рассчитать число Нуссельта для однослойной и двухслойной стенки

$$Nu = c(Gr \cdot Pr)^n \varepsilon ,$$

где числа C и n – опытные константы, зависящие от комплекса $(Gr \cdot Pr)$; они приведены в табл. 1;

ε – поправочный коэффициент.

Так как теплоотдающая поверхность обращена кверху, то в уравнение подобия вводится поправка $\varepsilon = 1,3$, т.е. полученное по расчету значение Nu (или α) увеличивается на 30%.

Значения числа Прандтля Pr , кинематической вязкости ν и коэффициента теплопроводности λ для воздуха при различных температурах приведены в (см. приложение).

10. Определить коэффициент теплоотдачи свободной конвекцией $\alpha_{\text{к}}$ из формулы

$$\alpha_{\text{к}} = Nu \frac{\lambda}{l} .$$

11. Определить потери теплоты конвекцией $q_{\text{к}}$ для одно- и двухслойной стенок по формуле (14)

$$q_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} (t_{\text{н}} - t_{\text{ж}}) .$$

12. Вычислить суммарные потери теплоты с наружной поверхности одно- и двухслойной стенок

$$q_{\Sigma} = q_{изл} + q_{к}.$$

13. Сравнить полученные результаты, занеся их в табл. 2.

14. Составить журнал наблюдений.

Таблица 2

Сравнение результатов опыта

Стенка	Плотность теплового потока		Погрешность по отношению к q_b , %
	отдаваемого в атмосферу конвекцией и излучением q_{Σ} , Вт/м ²	передаваемого внутри стенки теплопроводностью q_b , Вт/м ²	
Однослойная			
Двухслойная			

Контрольные вопросы

1. Механизмы переноса теплоты в металлах; в твердых телах – диэлектриках.

2. Дифференциальное уравнение теплопроводности при стационарном и нестационарном режимах.

3. Условия однозначности.

4. Методы решения дифференциального уравнения теплопроводности.

5. Закон Фурье.

6. Коэффициент теплопроводности, физический смысл, его размерность.

7. Формула для определения теплового потока плоской стенки: однослойной и двухслойной.

8. Внутреннее сопротивление стенки.

9. От чего зависит коэффициент теплоотдачи α ?

10. Виды конвекции.

11. Закон Ньютона–Рихмана.

12. Закон Стефана–Больцмана.

13. Физический смысл коэффициента излучения абсолютно черного тела C_0 и степени черноты ε .

14. Должно ли быть равенство плотностей тепловых потоков, переданных теплопроводностью через стенку и конвекцией и излучением от стенки, и почему?

15. Физический смысл чисел подобия Nu, Gr, Pr.

16. Безразмерное уравнение в числах подобия, описывающее свободную конвекцию.

17. Чем обусловлена свободная конвекция?

Журнал наблюдений

Но- мер опы- та	Однослойная стенка						Двухслойная стенка												Темпера- тура воздуха в лабора- тории
	1		2		3		4		5		6		7		8		9		
	мВ	°C	мВ	°C	мВ	°C	мВ	°C	мВ	°C	мВ	°C	мВ	°C	мВ	°C	мВ	°C	
1																			
2																			
3																			
4																			
Сред- нее																			

Лабораторная работа ТП №3

НАГРЕВ МАССИВНЫХ ТЕЛ ПРИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕТЬЕГО РОДА

1. Цели работы

1. Оценить изменение температуры в центре и на поверхности образца в процессе нагрева опытным путем.
2. Определить графоаналитическим методом температуру в центре и на поверхности образца в конце заданного периода нагрева.
3. Сравнить расчетные значения температуры с опытными в конце процесса нагрева изделия.

2. Теоретическая часть

При нагревании или охлаждении тела температура в каждой точке его непрерывно меняется во времени*. Тепловое состояние тела, при котором температура является функцией координат и времени, называется нестационарным (неустановившимся).

$$t = f(x, y, z, \tau).$$

В таком режиме работает кладка печей периодического действия (печи с выдвижным подом, нагревательные колодцы, мартеновские печи), а также насадка регенераторов.

Процесс нестационарной теплопроводности внутри твердого тела в одномерном случае (плоская бесконечная стенка) описывается дифференциальным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{град}$;

C_p – удельная массовая теплоемкость, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{град}$;

ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Коэффициент температуропроводности характеризует скорость изменения температуры внутри тела и показывает отношение способности

* Теплотехника: учебник / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; под ред. В.Н. Луканина. 6-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2008. 671 с.

тела проводить теплоту теплопроводностью к способности ее аккумулировать.

Для получения конкретного решения уравнения (1) необходимо задать условия однозначности. В данной работе нагревание тела производится при граничных условиях третьего рода. В этом случае задаются температура окружающей среды $t_{\text{ж}}$ и закон теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. При передаче теплоты на поверхность тела конвекцией плотность теплового потока определяется законом Ньютона–Рихмана

$$q_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} (t_{\text{ж}} - t_{\text{пов}}), \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м²·град;

$t_{\text{ж}}$, $t_{\text{пов}}$ – температура окружающей среды (жидкости или газа) и поверхности тела (стенки), °С.

Если тепловой поток на поверхность тела передается излучением, он определяется по закону Стефана–Больцмана

$$q_{\text{изл}} = C_0 \varepsilon_{\text{прив}} \left[\left(\frac{T_{\text{жс}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где $\varepsilon_{\text{прив}}$ – приведенная степень черноты тепловоспринимающей поверхности и кладки печи;

$C_0 = 5,67$ Вт/м²К⁴ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$T_{\text{ж}}$, $T_{\text{пов}}$ – абсолютная температура окружающей среды и поверхности тела, К.

Внутри тела теплота передается теплопроводностью по закону Фурье

$$q_{\text{г}} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}. \quad (5)$$

Граничное условие третьего рода можно представить в виде уравнения теплового баланса на поверхности

$$C_0 \varepsilon_{\text{прив}} \left[\left(\frac{T_{\text{жс}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right] - \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (6)$$

или по аналогии с законом конвекции

$$\alpha_{\text{изл}} (t_{\text{ж}} - t_{\text{пов}}) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (7)$$

где $\alpha_{\text{изл}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением (условный), Вт/м² гр.

$$\alpha_{изл} = \frac{C_0 \varepsilon_{прив} \left[\left(\frac{T_{жс}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{нос}}{100} \right)^4 \right]}{t_{жс} - t_{нос}}. \quad (8)$$

Дифференциальное уравнение (1) с заданными условиями однозначности дает полное математическое описание задачи нестационарной теплопроводности.

Из величин, входящих в уравнение (1), можно составить комплекс

$$F_0 = \frac{a \tau}{\delta^2}, \quad (9)$$

который называется числом Фурье и характеризует безразмерное время нагревания (или охлаждения) тела (значение x заменено толщиной прогрева δ).

Из граничного условия (7) можно составить комплекс

$$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda} = \frac{\delta / \lambda}{1 / \alpha}, \quad (10)$$

который называется числом Био и представляет собой отношение внутреннего теплового сопротивления δ / λ к внешнему теплопроводности $1 / \alpha$.

В этих выражениях:

τ – время нагревания, с;

δ – определяющий размер (прогреваемая толщина), м.

Решение задачи может быть представлено в виде зависимости, связывающей между собой безразмерные величины, характерные для рассматриваемого процесса.

$$\Theta = f(X, Fo, Bi), \quad (11)$$

где $\Theta = \frac{t - t_{жс}}{t_0 - t_{жс}}$ – безразмерная (относительная избыточная) температура

в некоторой точке тела;

$X = \frac{x}{\delta}$ – безразмерная координата;

t_0 – начальная температура тела.

Для определения температуры составлены номограммы, связывающие Θ с Bi и Fo при $X=0$ (середина пластины) и $X=1$ (поверхность пластины), которые для малых значений Bi приведены на рис. 1 и 2.

Все тела, в зависимости от характера распределения температуры внутри них, делятся на термически тонкие и термически массивные. Критерием термической массивности тел является число Био.

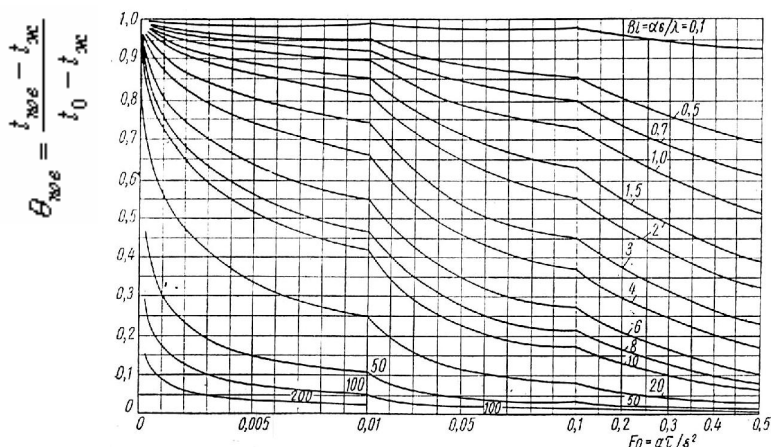


Рис. 1. Зависимость безразмерной температуры от чисел Bi и Fo для нагрева поверхности пластины при граничном условии третьего рода

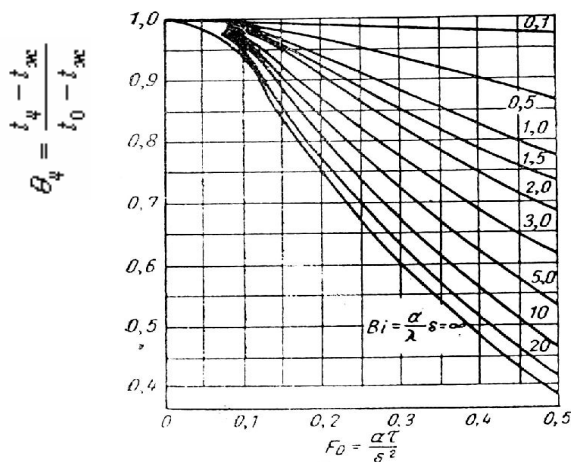


Рис. 2. Зависимость безразмерной температуры от чисел Bi и Fo для нагрева центра пластины при граничном условии третьего рода

Для термически тонких тел $Bi \rightarrow 0$, в тонких телах перепад температур по сечению практически отсутствует. К тонким относят тела с малым внутренним тепловым сопротивлением (в пределе $\delta/\lambda \rightarrow 0$). В них тепловое сопротивление переносу теплоты теплопроводностью (внутреннее) от его поверхности к середине значительно меньше теплового сопротивления теплоотдачи (внешнего), т.е. $\delta/\lambda \ll 1/\alpha$

Для массивных тел $Bi \rightarrow \infty$, к массивным относятся тела с относительно большим тепловым сопротивлением (в пределе $\delta/\lambda \rightarrow \infty$). При нагревании и охлаждении их наблюдается значительный перепад температур по сечению и требуется производить выдержку для выравнивания температуры.

Из опыта работы нагревательных устройств установлено, что к тонким телам можно отнести такие, у которых $Bi < 0,25$, а при $Bi \geq 0,25$ тела следует считать массивными.

3. Описание установки

Установка состоит из муфельной печи А, температура которой измеряется термопарой 1 в комплекте с регистрирующим прибором В (рис. 3).

В печь помещается шамотный кирпич С с двумя термопарами: термопара 2 измеряет температуру середины кирпича, термопара 3 – температуру поверхности. Выводы термопар подключены к тому же прибору В. Номера термопар соответствуют точкам переключателя D.

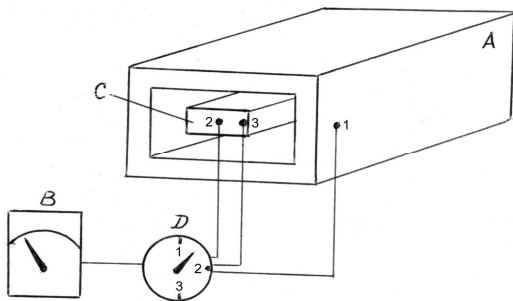


Рис. 3. Схема установки:

А – печь; В – милливольтметр; С – кирпич; D – переключатель;
1, 2, 3, – точки замера температуры

4. Порядок выполнения работы

1. Включить электрическую печь и нагреть ее до температуры 500–600°C (включение осуществляется только лаборантом или преподавателем).

2. Подготовить журнал наблюдений (табл. 1).
3. Поместить кирпич в центр печи, вывести термопары 2 и 3 через отверстие дверцы, подключить термопары к регистрирующему прибору.
4. Снимать показания милливольтметра для каждой из трех точек: первые две минуты через 30 с, затем через 1 мин. Общее время нагрева задается преподавателем (12–14 мин).
5. Полученные данные занести в журнал наблюдений.
6. С помощью градуировочной таблицы перевести милливольты в градусы Цельсия. Так как холодные спаи термопар находятся при комнатной температуре, для получения истинных значений температуры в точках 1, 2, 3 следует сделать перерасчет

$$t_{\text{ист}} = t_{\text{изм}} + t_{\text{ос}}, \quad (12)$$

где $t_{\text{ист}}$ – истинное значение температуры, °С;

$t_{\text{изм}}$ – значение температуры по градуировочной таблице, °С;

$t_{\text{ос}}$ – температура окружающего воздуха, °С (по термометру в лаборатории).

Таблица 1

Журнал наблюдений

Время опыта, мин	Показания прибора, mV			Температура $t_{\text{ист}}$, град			
	Печь	Середин на кирпича	Поверхность кирпича	Печь	Середин на кирпича	Поверхность кирпича	Воздух
0							
0,5							
1							
1,5							
....							
12							

5. Расчетная часть

1. На одном графике в координатах t – τ построить три экспериментальные кривые:

$$t_{\text{ж}} = t_{\text{печи}} = f_1(\tau);$$

$$t_{\text{ц}} = f_2(\tau);$$

$$t_{\text{пов}} = f_3(\tau),$$

где $t_{\text{ц}}$ – температура середины (центра) кирпича, °С;

$t_{\text{пов}}$ – температура поверхности кирпича, °С.

2. Вычислить среднеарифметическое значение температуры печи за период нагрева $\bar{t}_{\text{печи}}$ и в расчетах использовать ее как $\bar{t}_{\text{печи}} = \text{const}$.

3. Вычислить коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{изл}$ по формуле (8)

$$\alpha_{изл} = \frac{C_{прив} \left[\left(\frac{\bar{T}_{печи}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{пов}}{100} \right)^4 \right]}{\bar{t}_{печи} - t_{пов}},$$

где $t_{пов}$, $T_{пов}$ – температура поверхности кирпича на конец опыта соответственно, °С и К;

$C_{прив}$ – приведенный коэффициент излучения, Вт/(м² · К⁴);

$C_{прив} = C_0 \varepsilon_{прив}$;

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$C_0 = 5,67$ Вт/(м² · К⁴);

$\varepsilon_{прив}$ – приведенная степень черноты.

Для системы муфель-кирпич (система «тело и оболочка») $\varepsilon_{прив}$ рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_{прив} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \frac{F_1}{F_2}}, \quad (13)$$

где $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,8$ – степень черноты поверхности кирпича и муфеля;

$\frac{F_1}{F_2} = \varphi$ – угловой коэффициент излучения (отношение поверхности

теплообмена кирпича и муфеля), для данной системы $\varphi = 0,27$.

4. Вычислить число Био (Bi) по формуле (10).

$$Bi = \frac{\alpha_{изл} \delta}{\lambda},$$

где δ – условная толщина прогреваемого слоя: она составляет 0,032 м (половина толщины кирпича);

λ – коэффициент теплопроводности кирпича при средней температуре его по массе $\bar{t}$ в конце периода нагрева, Вт/м·град.

Средняя по массе температура вычисляется по формуле

$$\bar{t} = t_{пов} - 2/3(t_{пов} - t_{ц}). \quad (14)$$

Коэффициент теплопроводности для шамотного кирпича рассчитывается по формуле

$$\lambda = 0,84 + 0,6 \cdot 10^{-3} \bar{t}, \text{ Вт/м·град.} \quad (15)$$

5. Вычислить число подобия Фурье (Fo) по формуле (9).

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2},$$

где τ – время нагревания, с;

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho} \text{ – коэффициент температуропроводности, м}^2/\text{с};$$

C_p – удельная массовая теплоемкость, Дж/кг·град;

ρ – плотность, кг/м³.

Для шамотного кирпича

$$C_p = (0,88 + 0,00023 \bar{t}) \cdot 10^3, \text{ Дж/кг·град}; \quad (16)$$

$$\rho = 1800 \text{ кг/м}^3.$$

6. По рассчитанным значениям Fo и Bi , используя номограммы на рис. 1 и 2, определить безразмерные температуры поверхности $\Theta_{пов}$ и середины кирпича $\Theta_{ц}$.

7. Рассчитать температуры поверхности $t_{пов}$ и середины $t_{ц}$ кирпича в конце периода нагрева, используя значения $\Theta_{пов}$ и $\Theta_{ц}$, найденные с помощью номограмм

$$t_{пов} = \bar{t}_{\text{печи}} - \Theta_{пов} (\bar{t}_{\text{печи}} - t_0);$$

$$t_{ц} = \bar{t}_{\text{печи}} - \Theta_{ц} (\bar{t}_{\text{печи}} - t_0),$$

где t_0 – начальная температура кирпича (при $\tau = 0$), равная температуре воздуха в лаборатории.

8. Сравнить расчетные значения температур с полученными в опыте. Занести результаты в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные результаты работы

Общее время нагрева, мин	Температура в конце периода нагрева, °С			
	Поверхности $ t_{пов} $		Середины $ t_{ц} $	
	Опытная	Расчетная	Опытная	Расчетная

Контрольные вопросы

1. Какой тепловой режим называется нестационарным, какова его математическая запись?

2. Написать дифференциальное уравнение теплопроводности для нестационарного режима.

3. Математическая постановка задачи нестационарной теплопроводности при граничных условиях третьего рода.
4. Дать характеристику условий однозначности.
5. Какие тела термически тонкие, термически массивные?
6. Физический смысл чисел подобия Bi , Fo .
7. Объяснить понятие «безразмерная температура» Θ .
8. Суть графоаналитического метода расчета процесса нагрева (охлаждения) массивных тел.
9. Как изменяется температура в центре и на поверхности тонких и массивных тел в процессе их нагрева?
10. Объяснить физический смысл коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и теплоемкости.
11. Объяснить закон Ньютона–Рихмана.
12. Объяснить закон Стефана–Больцмана.
13. Чему равен коэффициент излучения абсолютно черного тела? Что он выражает?
14. Что такое степень черноты тела?
15. Какие теплообменные аппараты работают в нестационарном тепловом режиме?

Лабораторная работа КТ №9

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ПРОДОЛЬНОМ ОБТЕКАНИИ ПЛАСТИНЫ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

1. Цели работы

1. Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи α при вынужденном продольном обтекании пластины потоком воздуха.
2. Установление зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости потока.
3. Представление опытных данных в виде уравнения подобия в безразмерных переменных $Nu = C Re^n$.

2. Теоретическая часть

Конвективный теплообмен – это процесс теплообмена между жидкостью или газом и поверхностью твердого тела при их непосредственном соприкосновении.* Он осуществляется одновременным действием теплопроводности и конвекции. Конвекция возможна только в текучей среде и происходит при перемещении или перемешивании неравномерно нагретых объемов среды.

* Теплотехника: учебник / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; под ред. В. Н. Луканина. 6-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2008. 671 с.

Мерой интенсивности процесса теплообмена между поверхностью тела и обтекающим ее теплоносителем является **коэффициент теплоотдачи**, который можно выразить из закона Ньютона–Рихмана

$$\alpha = \frac{Q}{(t_c - t_{жс})F} = \frac{q}{(t_c - t_{жс})}. \quad (1)$$

В задачах конвективного теплообмена коэффициент теплоотдачи является искомой величиной, определяемой экспериментально.

Интенсивность конвективного теплообмена и, следовательно, величина коэффициента теплоотдачи зависят от следующих факторов:

- природы возникновения движения;
- режима движения жидкости;
- природы и физических свойств среды;
- формы и размеров поверхности и др.

При вынужденной конвекции режим движения определяют по числу Рейнольдса. Влияние на конвективный теплообмен физических свойств среды учитывается числом Прандтля. При обтекании поверхности потоком среды в результате действия сил трения (сил вязкости) происходит торможение пристенного слоя жидкости. Вследствие этого образуется гидродинамический пограничный слой, в котором скорость изменяется от $w = 0$ вблизи поверхности до $w_0 = \text{const}$ во внешнем невозмущенном потоке (рис. 1).

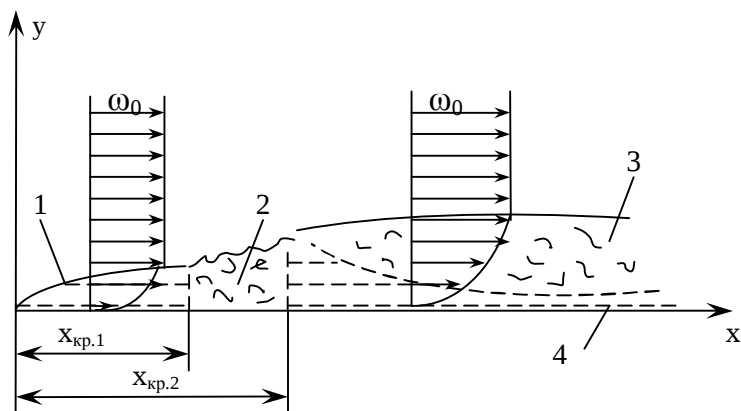


Рис. 1. Развитие пограничного слоя около пластины, обтекаемой вынужденным потоком: 1 – ламинарный пограничный слой; 2 – переходная область; 3 – турбулентный пограничный слой; 4 – вязкий (ламинарный) подслой; w_0 – скорость набегающего потока; $x_{кр.1}$ и $x_{кр.2}$ – координаты области перехода от ламинарного к турбулентному режиму

Течение жидкости в пограничном слое может иметь ламинарный и турбулентный характеры, а толщина слоя постепенно возрастает по направлению движения жидкости.

Переход ламинарного режима течения в турбулентный происходит на некотором участке поверхности $x = x_{кр2} - x_{кр1}$. Область переходного течения не всегда может быть точно определена. Поэтому в инженерных расчетах часто полагают, что переход ламинарного течения в турбулентное происходит при определенном значении $x_{кр}$, т.е. зону переходного режима заменяют точкой. Ее положение при продольном обтекании пластины определяют по критическому значению числа Рейнольдса, равному

$$Re_{кр} = w \cdot x_{кр} / \nu = 10^5. \quad (2)$$

В условиях неизоэнтальпического течения ($t_c \neq t_{ж}$) происходит прогрев или охлаждение пристенного слоя, т.е. образуется тепловой пограничный слой, в пределах которого имеет место изменение температуры от t_c вблизи поверхности до $t_{ж} = \text{const}$ за пределами пограничного слоя.

Конвективный теплообмен между средой и поверхностью тела (теплообмен в пограничном слое) характеризуется числом Нуссельта, в которое входит искомая величина коэффициента теплоотдачи α .

Количественную связь между числами подобия представляют в виде степенных зависимостей, получаемых путем обработки опытных данных следующего вида:

$$Nu = C Re^n Pr^m, \quad (3)$$

где C , n , m – экспериментальные значения.

Для конкретного теплоносителя при условии, что температура жидкости (газа) изменяется в узких пределах, влиянием изменения числа Прандтля на число Нуссельта можно пренебречь, и уравнение (3) приобретает вид

$$Nu = C Re^n. \quad (4)$$

Значения коэффициента C и показателя степени n зависят от режима движения и формы поверхности. Определение этих величин является задачей экспериментального исследования процессов конвективного теплообмена.

С целью определения параметров C и n в уравнении (4) прологарифмируем последнее выражение

$$\lg Nu = \lg C + n \lg Re. \quad (5)$$

Если опытные данные представить в виде $\lg Re$ и $\lg Nu$, то экспериментальная зависимость будет изображаться прямой линией (рис. 2). Ис-

комая величина n является тангенсом угла наклона прямой и определяется из выражения

$$n = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\lg Nu_B - \lg Nu_A}{\lg Re_B - \lg Re_A}. \quad (6)$$

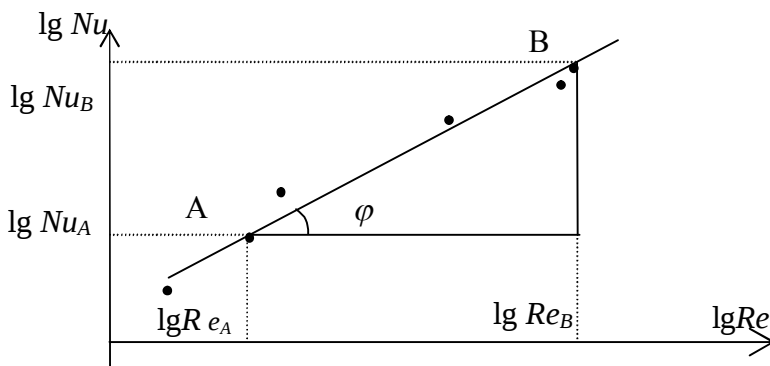


Рис. 2. Определение показателя n в уравнении подобия

Коэффициент уравнения C при известном показателе степени n определяется подстановкой в уравнение (4) любой пары опытных значений Re и Nu , расположенных на данной прямой.

При ламинарном режиме ($Re \leq Re_{кр}$) и граничном условии $q = \text{const}$, которое реализуется в данном эксперименте (электрический обогрев поверхности), средний коэффициент теплоотдачи рассчитывается по уравнению подобия

$$Nu_l = 0,7 Re_l^{0,5} Pr_{ж}^{0,33}.$$

Для турбулентного пограничного слоя ($Re > Re_{кр}$) справедливо следующее расчетное соотношение для среднего коэффициента теплоотдачи:

$$Nu_l = 0,037 Re_l^{0,8} Pr_{ж}^{0,43},$$

где l — длина поверхности.

3. Экспериментальная установка

В работе определяется средний коэффициент теплоотдачи при вынужденном продольном обтекании пластины воздухом. На поверхности пластины реализуется условие $q = \text{const}$. Схема опытной установки представлена на рис. 3. Плоская пластина 1 размещена по оси канала прямоугольного сечения 2. Воздух подается в установку с помощью вентилятора 3, установленного на входе в канал. Расход воздуха изменяется с помощью заслонок 4, устанавливаемых на входном патрубке вентилятора.

Скорость движения воздуха в канале определяется с помощью анемометра 5. Включение вентилятора производится правым переключателем 6. Температура подаваемого воздуха $t_{ж1}$ измеряется термометром, установленным непосредственно в помещении лаборатории.

Исследуемая пластина имеет размеры $l \cdot b = 140 \cdot 120$ мм. Она состоит из асбестоцементного основания, на которое намотана проволока из нихрома, являющаяся электрическим нагревателем. Нагревание пластины осуществляется переменным током. Потребляемая мощность регулируется автотрансформатором 7. Включение нагревателя производится левым переключателем 8. О подаче напряжения к нагревателю свидетельствует сигнальная лампа 9. Величина тока и напряжение измеряются амперметром и вольтметром 10. Температура поверхности пластины измеряется в пяти точках по длине пластины с помощью термопар. Термопары сплава хромель–алюмель подключены через переключатель термопар 11 (точки 1–5 переключателя) к потенциометру 12. Температура воздуха на выходе из канала $t_{ж2}$ измеряется термометром 13.

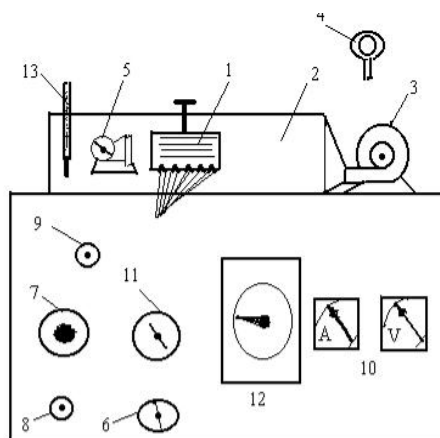


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

4. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством опытной установки.
2. Подготовить журнал наблюдений (табл. 1).
3. Включить нагреватель (переключатель 8). Установить с помощью автотрансформатора 7 напряжение 100–110 В.
4. Включить вентилятор (переключатель 6). Время нагрева 10–15 мин. Эксперимент выполняют, начиная с максимального расхода воздуха (входной патрубок вентилятора полностью открыт).

Таблица 1

Результаты измерений и расчетов

I = A				U = В						t _{o.c.} = °C							
Номер изме- рения	Опытные данные									Расчетные данные							
	Температура, °C									W, м/с	V, $\frac{м^3}{с}$	Q, Вт	$\frac{\alpha, Bm}{м^2 K}$	NNu	RRe	lg Nu	lg Re
	t _{ж1}	t _{ж2}	$\overline{t_{жс}}$	t _{с1}	t _{с2}	t _{с3}	t _{с4}	t _{с5}	$\overline{t_c}$								
1																	
2																	
3																	
4																	

5. По достижении стационарного теплового режима (постоянных значений температур пластины и воздуха) произвести измерение температуры в пяти точках нагревателя, температуры воздуха на выходе из канала, показания анемометра, значения электрических параметров нагревателя.

Холодные спаи термопар находятся при температуре воздуха в помещении, поэтому температура пластины определяется как

$$t_c = t_{c \text{ изм}} + t_{0.c..}$$

6. Опыты повторить при тех же значениях тока и напряжения, но при других расходах воздуха (регулируется путем смены заслонок на входном патрубке вентилятора). Последнее измерение производят при минимальном расходе воздуха (заслонка с наименьшим отверстием). Показания приборов записывают каждый раз по достижении стационарного теплового состояния (через 5–6 мин. после смены заслонок).

5. Порядок обработки и предоставления материала

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1. Рассчитать объемный расход воздуха

$$V = w \cdot f,$$

где w – скорость движения воздуха в канале, м/с;

f – площадь поперечного сечения канала, м²;

$f = 0,145 \cdot 0,15$, м² (0,145 и 0,15 – размеры канала).

2. Определить тепловой поток, получаемый воздухом от пластины, Вт,

$$Q = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_{ж2} - t_{ж1}),$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;

c_p – изобарная теплоемкость воздуха, Дж/кг·К.

Физические параметры выбирают по средней температуре воздуха $\overline{t_{жс}}$.

3. Рассчитать значение коэффициента теплоотдачи для каждой скорости движения воздуха, имевшей место в опытах.

$$\alpha = \frac{Q}{(\overline{t_c} - \overline{t_{жс}})F},$$

где $\overline{t_c} - \overline{t_{жс}}$ – разность средних температур пластины и обтекающего ее воздуха;

F – поверхность пластины (нагревателя), м²;

$F = 2 \cdot l \cdot b$, м². ($l = 0,14$ м, $b = 0,12$ м – размеры пластины).

4. Вычислить числа подобия:

$$\text{Рейнольдса } Re = w \cdot l / \nu;$$

$$\text{Нуссельта } Nu = \alpha \cdot l / \lambda,$$

где l – длина пластины (определяющий размер), м.

Найденные значения чисел Рейнольдса позволяют установить режим движения воздуха в пограничном слое у поверхности пластины ($Re_{кр} = 10^5$).

5. Определить значения $\lg Re$ и $\lg Nu$. По опытным данным построить графическую зависимость $\lg Nu = f(\lg Re)$. Определить показатель степени n , используя метод графического построения (рис. 2 и ф-ла 6).

6. Найти значение постоянной C уравнения подобия (4).

$$C = \frac{Nu}{Re^n}.$$

Отчет по выполненной работе должен содержать:

- цель работы, теоретические основы методики проведения эксперимента;
- схему опытной установки;
- журнал записи наблюдений и расчетных данных;
- обобщение опытных данных методом теории подобия.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под процессом конвекции?
2. Физическая природа конвективного теплообмена в условиях свободной и вынужденной конвекции.
3. Что называется коэффициентом теплоотдачи, от каких факторов он зависит?
4. Закон Ньютона–Рихмана.
5. Число Нуссельта, его физический смысл.
6. Режимы движения воздуха в пограничном слое.
7. Число Рейнольдса, его физический смысл.
8. Общий вид уравнения подобия для свободной и вынужденной конвекции. Определяемые и определяющие числа подобия.
9. Механизм переноса теплоты в ламинарном и турбулентном пограничных слоях.
10. Число Прандтля, его физический смысл.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Физические свойства сухого воздуха ($B = 1,01 \cdot 10^5$ Па)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \frac{\text{КДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	23,3	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	17,95	0,698
60	1,08	1,005	2,90	27,2	18,97	0,698
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	22,10	0,690
100	0,948	1,009	3,21	33,6	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	27,80	0,684
160	0,815	1,016	3,64	43,9	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	34,05	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	79,38	0,678
600	0,404	1,114	6,22	138,3	96,89	0,699
700	0,382	1,135	6,71	163,4	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	177,1	0,719

Примечание. Приведенные в таблице значения ν и λ следует уменьшать в 10^6 и 10^2 раз соответственно. Например, при температуре пограничного слоя $t_{\text{гс}} = 40^\circ\text{C}$ кинематическая вязкость воздуха $\nu = 16,96 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, а коэффициент теплопроводности $\lambda = 2,75 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м град}$.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	3
Раздел «Термодинамика»	5
Лабораторная работа ТД №1. Определение удельного объема пара	5
Лабораторная работа ТД №6. Определение теплоты парообразования	11
Лабораторная работа ТД №12. Определение показателя политропы	18
Раздел «Теплопередача»	26
Лабораторная работа ТП №1. Передача теплоты через стенку при стационарном тепловом режиме	26
Лабораторная работа ТП №3. Нагрев массивных тел при граничных условиях третьего рода	36
Лабораторная работа КТ №9. Исследование конвективного теплообмена при вынужденном продольном обтекании пластины потоком воздуха	44
Приложение	52

Учебное издание

ПИНТЯ Татьяна Николаевна
ТАРТАКОВСКИЙ Юрий Иосифович
МАТВЕЕВА Галина Николаевна

Термодинамика. Теплопередача

Практикум

Редактор Т.А. Колесникова
Компьютерная верстка Л.М. Неделковой

Подписано в печать 9.11.2012. Рег. № 46-12. Формат 60х84/16. Бумага тип. № 1.
Плоская печать. Усл.печ.л. 3,50. Тираж 100 экз. Заказ 702



Издательский центр ФГБОУ ВПО «МГТУ»
455000, Магнитогорск, пр. Ленина, 38
Полиграфический участок ФГБОУ ВПО «МГТУ»

Т.Н. Пинтя, Ю.И. Тартаковский, Г.Н. Матвеева

Термодинамика. Теплопередача

Магнитогорск 2012