

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра электротехники

В. М. ОВЧИННИКОВ, В. В. МАКЕЕВ

ТЕПЛОТЕХНИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области транспорта и транспортной деятельности
для студентов специальности 6-05-0715-08
«Подвижной состав железнодорожного транспорта»
в качестве пособия по учебной дисциплине
«Теплотехника и теплопередача»*

Гомель 2025

УДК 621.1.016(075.8)
ББК 31.3
О-35

Рецензенты: кафедра промышленной теплоэнергетики и экологии
ГГТУ им. П. О. Сухого (зав. кафедрой – канд. техн.
наук, доцент *Е. Н. Макеева*);
начальник службы локомотивного хозяйства Белорус-
ской железной дороги *Д. П. Гольнев*

Овчинников, В. М.

О-35 Теплотехника и теплопередача : пособие / В. М. Овчинников, В. В. Ма-
кеев ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т
трансп. – Гомель : БелГУТ, 2025. – 75 с.
ISBN 978-985-891-210-9

Рассматриваются основы теплотехнических измерений и используемые приборы, принцип действия двух- и четырехтактных дизелей, основные параметры и характеристика современных тепловозных дизелей, приводятся методика экспериментальных испытаний дизелей и применяемое оборудование. Исследуются процессы теплопроводности одно- и многослойной стенки, приводится установка для определения теплопроводности материала, процессы теплообмена при свободной конвекции с составлением уравнения теплопередачи. Даются основы теории теплового подобия и методика составления критериального уравнения для свободной конвекции на основе экспериментальных данных.

Предназначено для студентов специальности 6-05-0715-08 «Подвижной состав железнодорожного транспорта», изучающих дисциплину «Теплотехника и теплопередача».

УДК 621.1.016(075.8)
ББК 31.3

ISBN 978-985-891-210-9

© Овчинников В. М., Макеев В. В, 2025
© Оформление. БелГУТ, 2025

ВВЕДЕНИЕ

В изданном в 2022 году учебно-методическом пособии «Тепловые машины и теплообменные аппараты железнодорожного подвижного состава» изложены теоретические основы знаний по дисциплине «Теплотехника и теплопередача», необходимые инженеру-механику для последующего изучения специальных дисциплин, а также для энергоэффективной эксплуатации и проектирования теплотехнических устройств и оборудования.

В данном пособии изложены основные как теоретические, так и методические указания при проведении исследовательских опытных работ, которые необходимы для иллюстрации и закрепления лекционного материала по определённой теме. При этом студенты осваивают измерительную технику, приобретают навыки проведения экспериментальных исследований и общаются к научным разработкам.

До начала работ на опытных установках студенты обязаны ознакомиться с правилами внутреннего распорядка и техники безопасности и строго выполнять их. После инструктажа по технике безопасности необходимо расписаться в соответствующем журнале.

К каждой опытной работе студенты должны подготовиться заранее, ознакомиться с описанием работы и рекомендованной литературой. Неподготовленные студенты к выполнению данной работы преподавателем не допускаются. Получив разрешение преподавателя, можно приступить к проведению работы и снятию показаний приборов.

Предварительно студенческая группа разбивается на несколько бригад, количество которых соответствует числу опытов. Выполнение каждого опыта осуществляется в присутствии лаборанта и преподавателя. Причём каждый последующий опыт проводится после предварительного ознакомления преподавателя с полученными экспериментальными данными.

По каждой выполненной опытной работе составляется отчёт. В отчёте приводятся расчётные формулы, таблицы с рассчитанными и измеренными величинами, анализ полученных результатов, графики, диаграммы, выводы. На графиках должны быть указаны экспериментальные точки. Выполненная и оформленная работа должна быть защищена. К выполнению следующей опытной работы студент может приступить после защиты предыдущей.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО ОПЫТНЫМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕПЛОТЕХНИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА»

Эксперимент является важнейшим элементом исследования, т. к. позволяет проверить достоверность результатов теоретических изысканий, установить закономерность процессов и разработать методику инженерных расчётов.

В соответствии с учебным планом по дисциплине «Теплотехника и теплопередача» проводятся учебные занятия по следующим исследовательским темам.

- 1 Теплотехнические приборы и измерения.
- 2 Изучение конструкции и теплотехнические испытания дизельного двигателя внутреннего сгорания.
- 3 Исследование процесса теплопроводности.
- 4 Исследование процесса теплообмена при свободной конвекции для вертикальной поверхности и составление критериального уравнения.
- 5 Составление критериального уравнения для вертикальной поверхности при свободной конвекции.

В первой работе изучается принцип действия и устройство современных приборов для измерения теплотехнических параметров.

Во второй работе изучается принцип действия и устройства двигателей внутреннего сгорания (ДВС), принципиальное отличие бензиновых (газовых) ДВС от дизельных, приводится испытание дизелей при различных режимах нагрузки, даётся оценка их эффективности и экологической безопасности.

В третьей работе изучается наиболее простой процесс теплообмена – теплопроводность: даётся теоретическое обоснование, физический смысл, производится лабораторная оценка теплопроводности исследуемого материала.

В четвёртой и пятой исследовательских работах изучается наиболее часто встречающийся процесс теплообмена – конвекция, но этот вид теплообмена практически не поддаётся теоретическому исследованию. При изменении этого физического явления обязателен эксперимент. Проведение этого эксперимента основано на теории подобия теплообмена и осуществляется в пятой работе, в которой составляется критериальное уравнение.

2 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Измерительные приборы воспринимают, считают, считывают, измеряют, наблюдают, а потом могут записывать, хранить и показывать все исследуемые величины. С измерениями человек сталкивается на протяжении всей своей жизни. Общим для всех измерений является экспериментальное сравнение измеряемой величины с относительной ей величиной, принятой за единицу. Измерения осуществляются с помощью специальных технических средств, различных по устройству и принципу действия, которые называются измерительными приборами.

Измерение – это нахождение значения физической величины опытным путём с помощью специальных технических средств.

Значение физической величины – это выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для неё единиц. Различают истинное и действительное значения физической величины.

Истинное значение – это значение физической величины, которое идеальным образом характеризует её в количественном и качественном отношении.

Действительное значение – это значение физической величины, полученное экспериментальным путём, близкое к истинному значению.

На практике вместо истинного значения приближённо принимают действительное значение. Истинное значение применяют только при теоретических исследованиях.

Погрешность результата измерений – отклонение результата измерений X от действительного значения измеряемой величины X_d .

Абсолютная погрешность измерений ΔX – погрешность измерений, которая определяется разностью между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины:

$$\Delta X = X - X_d, \quad (2.1)$$

где X – измеренное прибором значение величины;

X_d – действительное значение измеряемой величины.

Относительная погрешность измерительного прибора ε – погрешность, которая определяется отношением абсолютной погрешности измерительного прибора к действительному значению измеряемой физической величины.

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X_d} \rho \nu^k. \quad (2.2)$$

Относительная величина измерения служит для сравнения измерения по точности с результатом измерений этой же физической величины другими средствами измерений.

Приведённая погрешность измерительного прибора определяется отношением абсолютной погрешности измерительного прибора к нормирующему значению X_n :

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_n} \cdot 100 \%. \quad (2.3)$$

Нормирующее значение принимается равным верхнему пределу измерений для средств измерений с односторонней шкалой.

Чаще всего класс точности прибора принимают численно равным допускаемой приведённой основной погрешности, выражаемой в процентах:

$$K = \frac{\Delta y}{y_n} \cdot 100 \% = \delta. \quad (2.4)$$

2.1 Измерение температуры и приборы

Температурой называют физическую величину, характеризующую степень нагретости тела. Она является не экстенсивной (параметрической), а интенсивной (активной) величиной. Поэтому не представляется возможным создание эталона температуры подобно тому, как созданы эталоны экстенсивных величин (длина, масса и др.).

Изменить температуру можно только косвенным путём, основываясь на зависимости от температуры таких физических термометрических свойств тел, которые поддаются непосредственному измерению (длина, объём, плотности и т. д.). Средство измерения температуры называют *параметром*. Для создания термометра необходимо иметь температурную шкалу, т. е. конкретную функциональную числовую связь температуры со значениями измеряемого термометрического свойства.

Для построения первых температурных шкал (Фаренгейт, Реомюр, Цельсий) выбирали две опорные, или реперные, точки t_1 и t_2 , представляющие собой температуры фазового равновесия химически чистых веществ.

Показания термометров, имеющих разные термометрические вещества (ртуть, спирт и др.), использующих одно и то же термометрические свойство и равномерную градусную шкалу, совпадают лишь в реперных точках, а в других точках показания расходятся. Это объясняется тем, что связь между температурой и термометрическим свойством на самом деле нелинейна и эта нелинейность различна для разных термометрических веществ.

В 1848 г. Кельвином была создана термодинамическая шкала, не зависящая от термометрических свойств веществ. Термодинамическая шкала температур основана на использовании второго закона термодинамики и называется *абсолютной шкалой температур*. Чтобы абсолютная температура имела определенное значение, было предложено принять разность

термодинамических температур между точками кипения воды и таяния льда равной 100° . Таким образом, один градус термодинамической температуры равен $1/100$ части работы, совершаемой в цикле Карно между температурой кипения воды и таяния льда (при условии, что в обоих циклах количество теплоты, отдаваемой холодильнику, одинаково).

Температура таяния льда по абсолютной термодинамической шкале $T_0 = 273,15$ К. Любая температура в шкале Кельвина определяется как $T = 273,15 \text{ К} + t$ (где t – температура, $^\circ\text{C}$). Один градус Кельвина (1 К) соответствует одному градусу Цельсия (1°C), так как обе шкалы базируются на одинаковых реперных точках.

2.1.1 Жидкостные термометры расширения

Принцип работы жидкостных термометров расширения основан на использовании различных коэффициентов теплового расширения термометрической жидкости и материала оболочки термометра. В качестве рабочих веществ применяют ртуть, этиловый спирт, толуол и др.

Жидкостные термометры являются местными показывающими приборами, точность показаний которых во многом зависит от способа установки. Неправильная установка термометра приводит к большой потере тепла в окружающую среду и может вызвать занижение показаний на 10–15 %.

При точных измерениях температур с помощью ртутных термометров к их показаниям вводят поправки:

- основную Δt (принимается из свидетельства термометра);
- на температуру выступающего столбика ртути Δt_b по формуле

$$\Delta t_b = \alpha_b (t_t - t_b) n, \quad (2.5)$$

где α_b – температурный коэффициент видимого расширения ртути в стекле, K^{-1} ;

t_t – показания ртутного термометра, $^\circ\text{C}$;

t_b – средняя температура выступающего столбика ртути, $^\circ\text{C}$.

n – число градусов в выступающей части ртутного столбика.

Цена деления шкалы технических термометров расширения находится в пределах от $0,5$ до 10°C . Для лабораторных термометров цена деления шкалы находится в пределах от $0,1$ до 2°C (повышенной точности – от $0,01$ до $0,1^\circ\text{C}$). Допускаемая погрешность технических термометров не должна быть больше цены деления шкалы.

2.1.2 Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления рабочего (термометрического) вещества в замкнутом объёме (термосистеме) от температуры. Манометрический термометр состоит из термобаллона 1, деформационного элемента 3 и капиллярной трубки 2, соединяющей последней с термобаллоном (рисунок 2.1). Чувствительный

элемент термометра (термобаллон) погружается в объект измерения, и термометрическое вещество в баллоне достигает температуры измеряемой среды. При изменении температуры рабочего вещества в термобаллоне изменяется

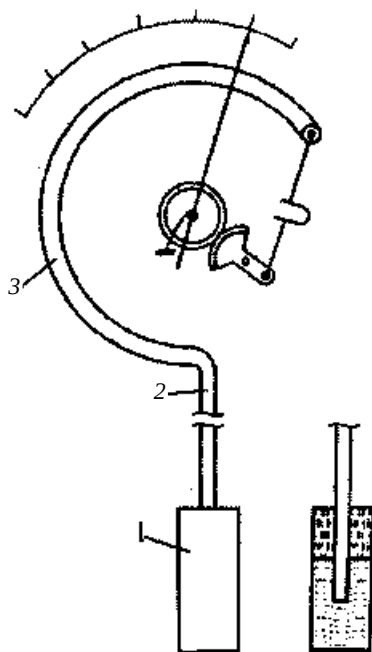


Рисунок 2.1 – Схема манометрического термометра

давление, которое через капиллярную трубку передаётся на пружинный манометр.

Термобаллон представляет собой цилиндр, изготовленный из латуни или специальных сталей, стойких к химическому воздействию измеряемой среды. Геометрические размеры термобаллона зависят от типа термометров и от задач измерения. Так, диаметр термобаллона находится в пределах 5–30 мм, а его длина 60–500 мм. Капилляр представляет собой медную или стальную трубку с внутренним диаметром 0,1–0,5 мм, а его длина может быть от нескольких сантиметров до 60 метров.

В соответствии с агрегатным состоянием рабочего вещества в термосистеме манометрические термометры подразделяют на газовые (диапазон измерения – 150–600 °С), жидкостные (диапазон измерения – 50–600 °С) и конденсационные (диапазон измерения – 25–300 °С). Погрешности измерения манометрическими термометрами включают:

– основную, вызываемую несовершенством работы деформационного элемента;

– дополнительные, вызываемые изменениями барометрического давления, температуры окружающего воздуха у газовых и жидкостных термометров, гидростатического давления при установке термобаллона и пружины на разных высотах.

2.1.3 Термометры сопротивления

Измерение температуры термометрами сопротивления основано на свойстве металлов и полупроводников изменять своё электрическое сопротивление при изменении температуры. К металлическим термометрам сопротивления предъявляется ряд требований, основными из которых являются стабильность градуировочной характеристики, а также её воспроизводимость, обеспечивающая взаимозаменяемость изготавливаемых термомет-

ров. К числу не основных, но желательных требований относятся линейность функции $R_t = f(t)$, по возможности высокое значение температурного коэффициента электрического сопротивления $\alpha = \frac{1}{R_t} \cdot \frac{dR_t}{dt}$, большое удель-

ное сопротивление и невысокая стоимость материала. Установлено, что чем чище металл, тем в большей степени он отвечает указанным основным требованиям и тем больше значения R_{100} / R_0 (где R_{100} и R_0 – электрические сопротивления металла при 100 °С и 0 соответственно).

Платина является наилучшим материалом для термометров сопротивления, так как легко получается в чистом виде, обладает хорошей воспроизводимостью, химически инертна в окислительной среде при высоких температурах, имеет достаточно большой температурный коэффициент сопротивления ($\alpha = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), высокое удельное сопротивление $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Платиновые термометры сопротивления используются для измерения температуры от –260 до +1100 °С. В интервале температур от 0 до 650 °С сопротивление и температура связаны зависимостью

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t - \beta t^2), \quad (2.6)$$

где $\alpha = 3,96847 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$, $\beta = -5,847 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}$.

К недостаткам платины можно отнести нелинейность функции $R_t = f(t)$ и её высокую стоимость. Выпускаются платиновые термометры сопротивления следующих градуировок: 1П; 5П; 10П; 50П 100П; 500П. Число в условном обозначении показывает сопротивление термометра при 0 °С, а буква – материал чувствительного элемента.

Медь – один из недорогих металлов, легко получаемых в чистом виде. Медные термометры сопротивления предназначены для измерения температуры в диапазоне от –50 до +200 °С. При более высоких температурах медь активно окисляется. Зависимость сопротивления от температуры линейна в широком диапазоне температур и имеет вид

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (2.7)$$

где $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$, значение отношения R_{100} / R_0 составляет 1,4260–1,4280.

Конструкция технических термометров с металлическим термопреобразователем сопротивления приведена на рисунке 2.2.

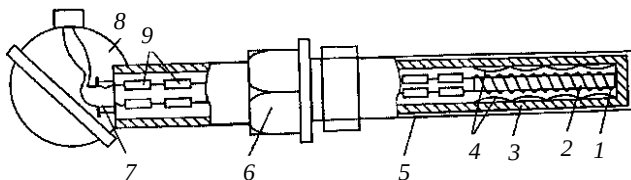


Рисунок 2.2 – Конструкция термометра с металлическим преобразователем

Тонкая проволока, или лента 1, из платины или меди наматывается на каркас 2 из керамики, слюды, кварца, стекла или пластмассы. Бифилярная намотка необходима для исключения индуктивного сопротивления. После намотки проволоки каркас покрывают слюдой. Длина намотки с платиновой проволокой – 50–100 мм, а с медной – 40 мм. Каркас для защиты от повреждений помещают в тонкостенную алюминиевую гильзу 3, а для улучшения теплопередачи от измеряемой среды к намотанной части каркаса между последней в защитной гильзой 3 устанавливают упругие металлические пластины 4 или массивный металлический вкладыш. Гильзу 3 с её содержимым помещают во внешний, обычно стальной, замкнутый чехол 5, который устанавливается на объекте измерения с помощью штуцера 6. На внешней стороне чехла располагается соединительная головка 8, в которой находится изоляционная колодка 7 с винтами для крепления выводных проводов, идущих от каркаса через изоляционные бусы 9.

2.1.4 Термоэлектрические термометры

Принцип действия основан на возникновении термо-ЭДС в двух разнородных проводниках при различных температурах мест их соединения. Термоэлектрические термометры имеют широкий диапазон измерения от –200 до +2200 °С (кратковременно до 2500 °С), могут измерять температуру в точке объекта или измеряемой среды, отличаются достаточно высокой точностью и стабильностью характеристик преобразования, но несколько уступают по этим показателям термометрам сопротивления (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Основные параметры термоэлектрических термометров

Тип термометра	Материал термоэлектродов	Диапазон длительного измерения температуры, °С	Допускаемая кратковременная температура, °С	Термоэлектродные (компенсационные) провода
ТВР	Вольфрамрений (15 % рения) – вольфрачений (20 % рения)	0–2200	2500	–
ТПР	Платинородий (30 % родия) – платинородий (6 % родия)	300–1600	1800	–
ТПП	Платинородий (10 % родия) – платина	0–1300	1600	Медь – сплав ТП (99,4 % Cu + 0,6 % Ni)
ТХА	Хромель – алюмель	–2000...1300	1300	Медь – константан
ТХК	Хромель – копель	–200...600	800	Хромель – копель
ТМК	Медь – копель	–200...100	100	Медь – копель

К числу недостатков можно отнести необходимость стабилизации или автоматического введения поправки на температуру свободных концов и необходимость применения специальных термоэлектродных проводов для подключения термометров к вторичным приборам.

На рисунке 2.3, *а* показано устройство стандартного термоэлектрического термометра.

В жёсткой защитной гильзе 1 расположены термоэлектроды 3 с надетыми на них изоляционными бусами 4. Спай 2 касается дна защитной гильзы или может быть изолирован от него с помощью керамического наконечника.

К термоэлектродам в головке 8 винтами 6 на розетке 5 подсоединяются удлинительные провода 7. Защитная гильза с содержимым вводится в объект измерения и крепится на нём с помощью штупера 9. Для обеспечения надёжного контакта спай 2 изготавливают сваркой, резе – пайкой или скруткой (для высокотемпературных ТЭП). Защитную гильзу 1 выполняют в виде цилиндрической или конической трубки из газонепроницаемых материалов диаметром примерно 15–25 мм и длиной в зависимости от потребности объекта измерения от 100 до 2500–3500 мм.

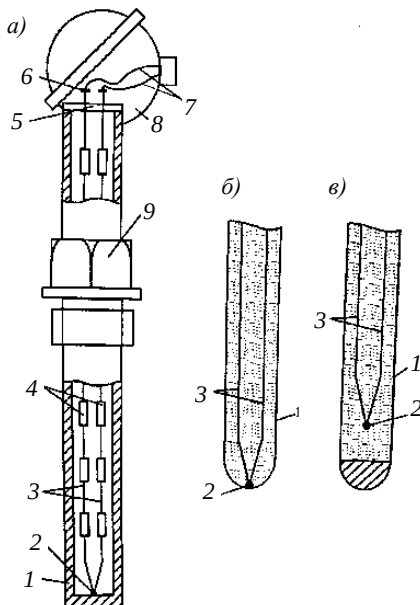


Рисунок 2.3 – Конструкция термоэлектрических термометров:
а, б – с малой инерционностью;
в – с большей инерционностью

Материалом для защитной гильзы обычно служат различные стали. Для более высоких температур используются гильзы тугоплавких соединений, а также кварц и фарфор. В настоящее время широкое применение находят термоэлектрические термометры кабельного типа (см. рисунок 2.3, *б, в*). В тонкостенной оболочке 1 размещены термоэлектроды 3, изолированные друг от друга, а также от стенки оболочки термостойким керамическим порошком 4. Рабочий спай 2 может иметь контакт с оболочкой (см. рисунок 2.3, *б*) или изолируется от нее (см. рисунок 2.3, *в*). Оболочку выполняют из высоколегированной нержавеющей стали с наружным диаметром 0,5–6 мм, длиной 10–30 м. Благодаря указанным размерам кабельные термоэлектрические термометры являются весьма гибкими при достаточной механической прочности. Выпускаемые хромель-алюмелевые и хромель-копелевые кабельные термометры можно использовать в интервале температур от –50 до 300 °С при давлении 40 МПа. Внутри оболочки кабеля помещены от одного до трёх ТЭП.

2.1.5 Пирометры

Пирометрами называются устройства для бесконтактного измерения температуры, использующие тепловое электромагнитное излучение нагретых тел. Нагретые объекты являются источниками инфракрасного (теплого) получения. При этом существует прямая связь – чем сильнее нагрето тело, тем мощнее излучение. Люди не видят ИК-излучения, а пирометры определяют инфракрасные лучи и по их интенсивности устанавливают температуру предмета. Такие возможности устройства позволяют контролировать и регулировать температурные показатели промышленных и бытовых объектов.

Большинство твёрдых и жидких тел имеет сплошной спектр излучения, т. е. излучает волны всех длин λ в диапазоне от 0 до ∞ . Видимое глазами человека излучение, называемое светом, охватывает диапазон длин волн 0,40–0,75 мкм. Невидимые лучи охватывают инфракрасный участок спектра, т. е. диапазон от 0,75 до 400 мкм, за которыми следует постепенный переход в радиоволновый диапазон. Луч с $\lambda < 0,40$ мкм также невидим и относится к ультрафиолетовому диапазону, за которым следуют рентгеновские и гамма-лучи.

В пирометрах излучения используют в основном лучи видимого и инфракрасного диапазона. Измерение температуры тел по их тепловому излучению основывается на закономерностях, полученных для абсолютно чёрного тела.

Интенсивность суммарного излучения E_T , Вт/м², чёрного тела различных температурах может быть найдена по уравнению Стефана – Больцмана:

$$E_T = \sigma T^4, \quad (2.8)$$

где σ – постоянная, равная $5,75 \cdot 10^{-16}$ Вт/м².

Это уравнение положено в основу измерения температуры по интенсивности суммарного излучения (радиации) нагретого тела посредством приборов, называемых *пирометрами суммарного излучения*.

Пирометры делят на несколько групп:

– по основному принципу действия:

– оптические, которые работают в спектре видимого света и теплового (инфракрасного) излучения;

– *радиометры*, или *пирометры инфракрасные*, – устройства полного излучения нагретого тела, которое включает видимое и невидимое испускание лучей. Для точности измерений в радиационных пирометрах применяют лазер;

В зависимости от измеряемого диапазона:

– высокотемпературные – от 400 °С и выше;

– низкотемпературные – от –50 до +500 °С и выше.

Большое распространение имеют **оптические пирометры с «исчезающей» нитью**. В таких пирометрах спектральная яркость излучения измеряемого тела (на длинах волн $\lambda = 0,65$ мкм) сравнивается со спектральной яркостью излучения на тех же длинах волн нити электрической (пирометрической) лампы накаливания. На рисунке 2.4 дано изображение нити лампы на фоне измеряемого раскалённого тела.

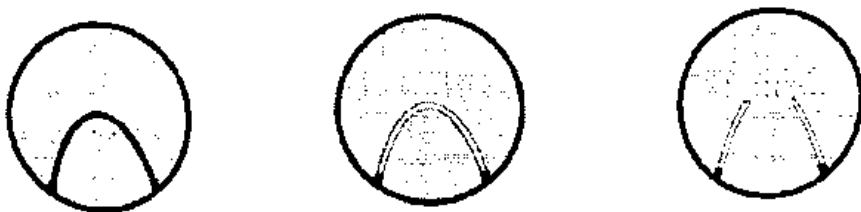


Рисунок 2.4 – Изображение нити пирометрической лампы на фоне измеряемого раскалённого тела

На рисунке 2.5 представлена схема оптического пирометра с «исчезающей» нитью. Электрическая (пирометрическая или фотометрическая) лампа 1 питается от батареи Б. Сила питающего тока, мА, определяется по миллиамперметру, шкала которого градуируется в градусах яркостной температуры. Сила тока регулируется реостатом R с помощью поворотного кольца 4. Для фокусирования изображения тела с плоскостью нити служит объектив 5. Окуляр 2 предназначен для корректирования изображения нити по глазу наблюдателя. Красный светофильтр 3 служит для выделения определённой спектральной области излучения. Во избежание перекаливания нити её нельзя нагревать выше 1400°C . Поэтому при измерении более высоких температур необходимо использовать ослабляющий светофильтр 6.

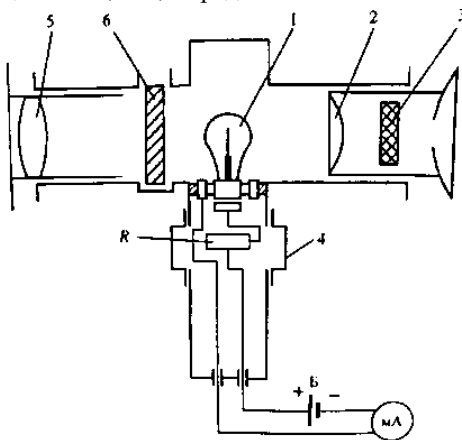


Рисунок 2.5 – Схема оптического (квазимонохроматического) пирометра

В этом случае температуре нити будут соответствовать другие, более высокие, температуры измеряемого тела.

Оптические пирометры применяют в диапазоне температур от 700 до 8000°C . Минимальное расстояние от объекта измерения до объекта пирометра равно $0,7$, а максимальное – $5\text{--}6$ м.

Измерение температуры радиационными пирометрами основано на улавливании теплового излучения и на концентрировании его на термочувствительном элементе с помощью собирающей линзы (рефракторные приборы) или вогнутых зеркал (рефлекторные приборы). На рисунке 2.6 приведена схема радиационного пирометра рефракторного типа. Излучение от объекта 1 концентрируется линзой 2 объектива через диафрагму 3 на рабочих концах термобатареи 4. Фокусировка телескопа пирометра на объект измерения производится окуляром 7. При высокой температуре объекта для защиты глаз перед окуляром в поле зрения вводят красное стекло 6. Катушка 5, выполненная из медной и никелевой проволоки, служит для компенсации влияния изменения температуры свободных концов термобатареи.

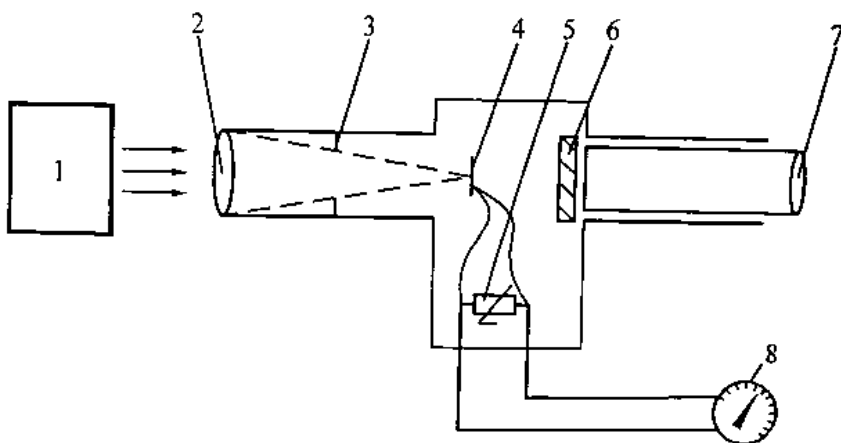


Рисунок 2.6 – Схема радиационного пирометра рефракторного типа

Наиболее удобными конструкциями в настоящее время являются портативные переносные и стационарные пирометры, разработанные и откалиброванные для измерения температур в различных отраслях промышленности.

Принцип их действия: оптическая система пирометра, наведённая на выбранный для измерения объект, фокусирует излучаемую или инфракрасную энергию на один или несколько фоточувствительных детекторов. Детектор конвертирует инфракрасную энергию в электрический сигнал, который обрабатывается микропроцессором и пересчитывается в значение температуры на основе калибровочных характеристик и коэффициента излучения датчика. Это значение температуры может выводиться на цифровой дисплей пирометра, или быть представлено в виде аналогового сигнала, или, в случае интеллектуального датчика, конвертироваться в цифровой выходной сигнал и с использованием прикладного программного обеспечения отображаться на дисплее компьютера.

Пирометры широко применяются в следующих сферах: металлообработка, электро- и теплоэнергетика, строительство, работа электрооборудования, рефрижераторное оборудование, пищевая промышленность, контроль температуры человека и др.

2.1.6 Тепловизоры

Тепловизор (тепло + лат. *visio* – зрение, видение) – устройство для наблюдения за распределением температуры исследуемой поверхности. Распределение температуры отображается на дисплее как цветная картинка, где разным температурам соответствуют разные цвета. Изучение тепловых изображений называется термографией.

Тела, нагретые до температур окружающей среды ($-50...+50\text{ }^{\circ}\text{C}$), имеют максимум излучения в среднем инфракрасном диапазоне (длина волны 7–14 мкм). Для технических целей интересен также диапазон температур до сотен градусов, излучающий в диапазоне 3–7 мкм. Температуры около тысячи градусов и выше не требуют тепловизоров для наблюдения, их тепловое свечение видно невооружённым глазом.

Тепловизор позволяет косвенно судить о температуре объекта по его электромагнитному излучению в определённом диапазоне инфракрасного спектра. Отклонение оптических свойств реальных материалов от свойств идеального абсолютно чёрного тела затрудняет однозначное преобразование излучения, регистрируемого тепловизором, в точное значение температуры реального объекта.

Формула Планка описывает зависимость испускаемого телом электромагнитного излучения от температуры тела в идеальном случае, то есть в случае т. н. абсолютно чёрного тела. Однако реальные тела чаще всего отличаются от абсолютно чёрного тела, обладая индивидуальными свойствами отражения (рассеяния), пропускания (поглощения) и испускания электромагнитных волн. Свойства отражения (рассеяния) и пропускания определяют паразитную засветку объекта измерения от окружающих нагретых предметов, что может приводить к завышению показаний бесконтактного датчика температуры. Свойство поглощения излучения определяет подогрев объекта излучением окружающих нагретых предметов. Различие в свойстве испускания излучения реальных материалов и абсолютно чёрного тела приводит к занижению показаний температуры.

Устройство тепловизоров в общем схоже, они состоят:

- из объектива (линзы);
- ИК детектора-микроболометра;
- МЭО – модуля электронной обработки;
- дисплея;
- окуляра (рисунок 2.7).

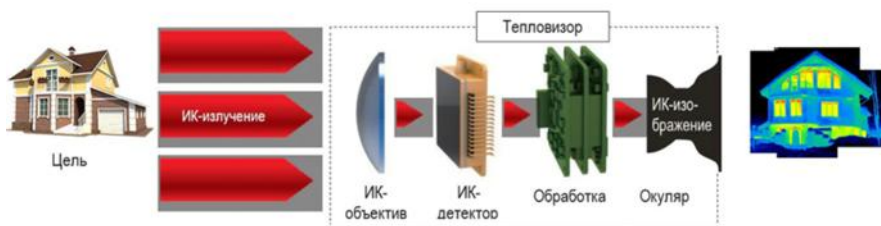


Рисунок 2.7 – Внешний вид тепловизора

Тепловизоры работают на основе принципа детектирования инфракрасного излучения, которое излучается различными объектами: людьми, животными, растениями, а также различными предметами. Тепловизоры обнаруживают, измеряют это излучение, преобразовывая его в изображение, которое видит пользователь (рисунок 2.8).

Процесс работы тепловизора начинается с того, что его оптика собирает инфракрасное излучение, проходящее через объектив. Затем этот сигнал передаётся в детектор, который измеряет интенсивность излучения и конвертирует его в электрический сигнал. Этот сигнал передаётся в процессор, который обрабатывает данные и создаёт изображение.

Окуляр имеет все тепловизоры за исключением тепловизионных насадок и инженерных приборов. В случае с насадками функцию окуляра выполняет оптический прицел, в tandem с которым она установлена.

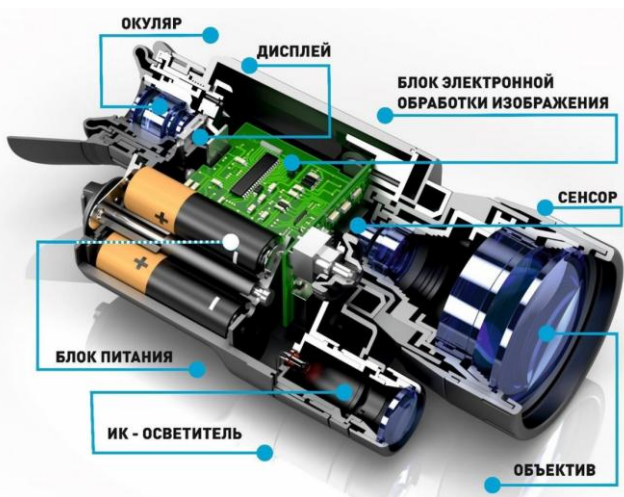


Рисунок 2.8 – Схема устройства тепловизора

Области применения.

1 Контроль утечки энергоресурсов. Тепловизоры нашли широкое применение как на крупных промышленных предприятиях, где необходим тщательный контроль за тепловым состоянием объектов, так и в небольших организациях, занимающихся поиском неисправностей сетей различного назначения. Особенно широкое применение тепловизоры получили в строительстве при оценке теплоизоляционных свойств конструкций. Так, с помощью тепловизора можно определить области наибольших теплопотерь в доме.

2 Прибор ночного видения. Тепловизоры используются как тепловизионный прицел для стрелкового оружия.

Тепловизоры применяются вооружёнными силами в качестве приборов ночного видения для обнаружения теплоконтрастных целей (живой силы и техники) в любое время суток, в том числе при использовании противником обычных средств оптической маскировки в видимом диапазоне (камуфляж). Тепловизор стал важным элементом прицельных комплексов ударной армейской авиации и бронетехники. Применяются и тепловизионные прицелы для ручного стрелкового оружия, хотя в силу высокой цены широкого распространения они пока не получили.

3 Пожарные и спасательные службы. Тепловизоры применяются пожарными и спасательными службами для поиска пострадавших, выявления очагов горения, анализа обстановки и поиска путей эвакуации.

4 Медицина. Кожа человека имеет высокий коэффициент излучения ($\sim 0,98$), близкий к коэффициенту излучения абсолютно чёрного тела, что делает наблюдение при помощи тепловизора за температурой кожи человека информативным. Низкий коэффициент отражения кожи в тепловом ИК диапазоне минимизирует влияние нагретых предметов окружающей среды. Тепловизор позволяет регистрировать как статическое распределение температуры, так и динамику температурного распределения кожи. Поверхностное распределение температуры кожи обусловлено состоянием подкожных сосудов, мышц, внутренних органов, жировой прослойки. Физиология терморегуляции может зависеть как от окружающих условий, так и от физической или эмоциональной нагрузки, а также от действия фармакологических препаратов.

С целью предотвращения эпидемий с 2008 года тепловизоры начали использовать для выделения из толпы лиц с высокой температурой, которой сопровождаются острые респираторные заболевания. Пандемия COVID-19, распространившаяся в мире в 2020 году, увеличила спрос на тепловизоры для бесконтактного измерения температуры тела в общественных местах и местах скопления людей. Однако существуют нюансы использования тепловизоров для измерения температуры. Следует учитывать, что тепловизор измеряет температуру открытых кожных покровов, и потому его показания

могут зависеть не только от температуры тела, но и от других факторов, в частности, климатических условий.

5 Металлургия и машиностроение. При контроле температуры сложных процессов, характеризующихся неравномерным нагревом, нестационарностью и неоднородностью коэффициента теплового излучения, тепловизоры эффективнее пирометров, поскольку анализ получаемой термограммы или температурного поля осуществляется мощной зрительной системой человека. Для улучшения достоверности измерения температуры нагреваемых металлов необходимо правильно выбирать спектральный диапазон регистрации теплового излучения. Коэффициент теплового излучения ϵ металлов, нагреваемых свыше 400 °С, сильно изменяется за счёт окисления их поверхности атмосферным кислородом.

6 Другие области применения:

- поиск перегрева электроцепей;
- астрономические инфракрасные телескопы;
- система ночного вождения для облегчения контроля дорожной обстановки водителем;
- контроль электроцепей на предмет перегрева проводников и плохого контакта;
- ветеринарный контроль.

2.2 Измерение давления и приборы

Давление – это отношение силы, действующей перпендикулярно к поверхности, к площади этой поверхности $p = F / S$.

Давление – величина, определяющая термодинамическое состояние вещества. В жидкости и газе давление характеризует внутреннюю энергию среды. Во многих ТП давление является одним из основных параметров, характеризующих режим работы различных аппаратов.

Различают следующие виды давления: атмосферное, абсолютное, избыточное и вакуум (разряжение).

Атмосферное (барометрическое) давление P_6 создаётся массой воздушного столба земной атмосферы.

Абсолютное давление P_a отсчитывается от абсолютного нуля давления, за которое принимают давление внутри сосуда, из которого полностью откачен воздух. Оно может быть и выше, и ниже атмосферного.

Избыточным давлением P_n называется разность между абсолютным и барометрическим давлениями:

$$P_n = P_a - P_6. \quad (2.9)$$

Средства измерения давления классифицируются по виду измеряемого давления и принципу действия.

Манометры избыточного давления служат для измерения избыточного давления.

Манометры абсолютного давления служат для измерения давления, отсчитываемого от абсолютного нуля давления.

Барометры служат для измерения атмосферного давления.

Вакууметры служат для измерения вакуума (разряжения).

Мановакууметры служат для измерения избыточного давления и вакуума.

Напорометры – манометры малых избыточных давлений (до 40 кПа).

Тягомеры – вакууметры с верхним пределом –40 кПа.

Тягонапорометры – мановакууметры с диапазоном измерений от –40 кПа до +20 кПа.

Дифференциальные манометры (ДМ) служат для измерения разности давлений (до 0,63 МПа).

2.2.1 Жидкостные приборы измерения давления

Жидкостные манометры имеют простую конструкцию и обеспечивают сравнительно высокую точность измерений. Они используются для поверки и градуировки манометров других видов, предназначенных для измерения небольших избыточных давлений, атмосферного давления, вакуума и разности давлений.

Двухтрубчатые U-образные манометры (рисунок 2.9) имеют две вертикальные сообщающиеся трубки (1 и 2), закреплённые на металлической шкале 3 с нулём посередине. Трубки заполняются рабочей жидкостью до нулевого уровня. В трубку 1 (плюсовая камера) подаётся измеряемое (большее) давление, а трубка 2 (минусовая камера) сообщается с атмосферой. При измерении разности давлений к обеим трубкам подводятся измеряемые давления, отсчёты производят по смещению жидкости от нулевого уровня в обеих трубках:

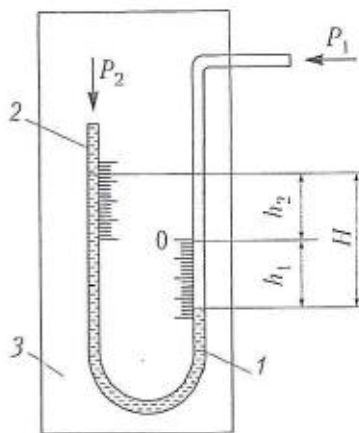


Рисунок 2.9 – U-образный манометр:
1, 2 – трубки; 3 – металлическая шкала

$$H = h_1 + h_2, \quad (2.10)$$

где H – высота столба жидкости, уравновешивающего разность давлений P_1 и P_2 ;

$$P_1 - P_2 = \rho g H, \quad (2.11)$$

ρ – плотность рабочей жидкости;

g – местное ускорение свободного падения.

В качестве рабочих жидкостей используются вода, спирт, керосин, ртуть, трансформаторное масло и др. Плотность рабочей жидкости должна быть выше плотности измеряемого вещества.

Чувствительность U-образного манометра

$$S = \frac{\Delta H}{\Delta P} = \frac{1}{\rho g} = k. \quad (2.12)$$

Таким образом, с увеличением плотности ρ рабочей жидкости чувствительность манометра снижается.

U-образные манометры с водяным заполнением используют для измерения давления, разрежения, разности давлений воздуха и неагрессивных газов до ± 10 кПа. При заполнении их ртутью можно измерять давление воды, жидкостей и газов до 0,1 МПа.

К недостаткам манометров данного типа относятся неточность отсчёта положения мениска жидкости, который производится дважды (на двух трубках), влияние температуры окружающей среды, неточность определения местного ускорения свободного падения g . Всё это приводит к увеличению погрешности при измерениях.

Чашечные манометры (однотрубные) (рисунок 2.10) являются разновидностью U-образного манометра. У них одна трубка заменена широким сосудом – чашей (плюсовая камера).

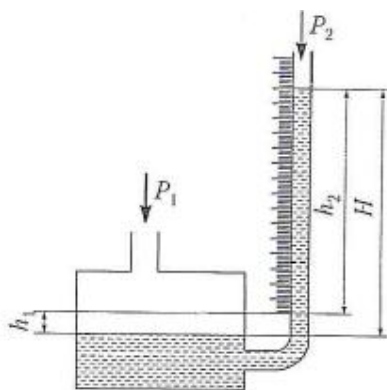


Рисунок 2.10 – Чашечный манометр

Площадь сечения чаши S_1 значительно больше, чем площадь сечения сообщающейся с ней трубки S_2 , поэтому изменением уровня жидкости h_1 в чаше при измерениях можно пренебречь.

Микроманометр с наклонной трубкой (рисунок 2.11) используется для измерения избыточного давления и разности давлений до 3 МПа.

Он является разновидностью однотрубного чашечного манометра, у которого трубка может изменять угол наклона α , что позволяет изменять

диапазон измерений. Если l – длина участка шкалы, то высота столба жидкости, уравновешивающего давление, $h = l \sin \alpha$, тогда

$$P = l \rho g \sin \alpha. \quad (2.13)$$

Чем меньше угол α , тем больше диапазон измерения, точнее показания прибора. Класс точности 0,5–1,5.

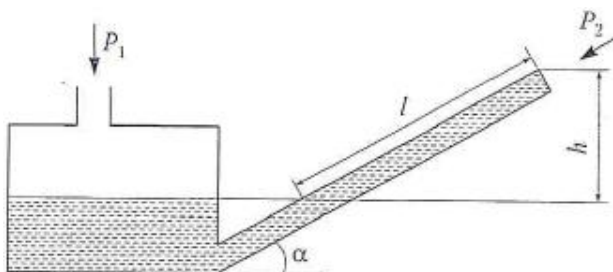


Рисунок 2.11 – Микроманометр с наклонной трубкой

2.2.2 Деформационные средства измерения давления

Принцип действия деформационных средств измерения давления основан на использовании упругой деформации чувствительного элемента и развиваемой им силы. Они работают в диапазоне давлений 10^1 – 10^9 Па.

Трубчатая пружина (манометрическая трубка) – упругая, запаянная с одного конца пружина (трубка). Открытый её конец, в который через штуцер подаётся давление, жёстко закрепляется, а другой, запаянный, остаётся свободным (рисунок 2.12). Она применяется для преобразования измеряемого давления, поданного во внутреннее пространство пружины, в пропорциональное перемещение её свободного конца. Под действием избыточного давления трубка раскручивается. Трубка обычно имеет овальное сечение. Изогнутая трубка имеет центральный угол γ , который под действием силы N на ее оси изменяется в пределах $\Delta\gamma = 40 \dots 60^\circ$:

$$N = \sqrt{N_t^2 + N_r^2}, \quad (2.14)$$

где N_t и N_r – касательная и радиальная составляющие силы N , пропорциональной давлению P / $N = kP$.

Коэффициент k зависит от геометрических размеров трубки (радиуса кривизны R , размеров полуосей овального сечения a , h толщины стенки) и её материала. Изменяя эти величины, можно изменять угол раскручивания $\Delta\gamma$ и соответственно чувствительность измерения. Увеличения $\Delta\gamma$ можно достигнуть и увеличением числа витков трубчатой пружины. Перемещение свободного конца пружины происходит под действием изгибающего момента $M = \pi r^2 l P$, где r – радиус внутреннего канала трубки; l – расстояние от центра канала до центра тяжести трубки. Основным недостатком трубчатых пружин – малый угол раскручивания.

Сильфон представляет собой тонкостенный цилиндрический стакан с поперечными гофрами (см. рисунок 2.12, б). Его рабочий диапазон давлений меньше, чем у манометрической пружины. Для увеличения диапазона внутри сильфона помещается цилиндрическая пружина, но это уменьшает чувствительность.

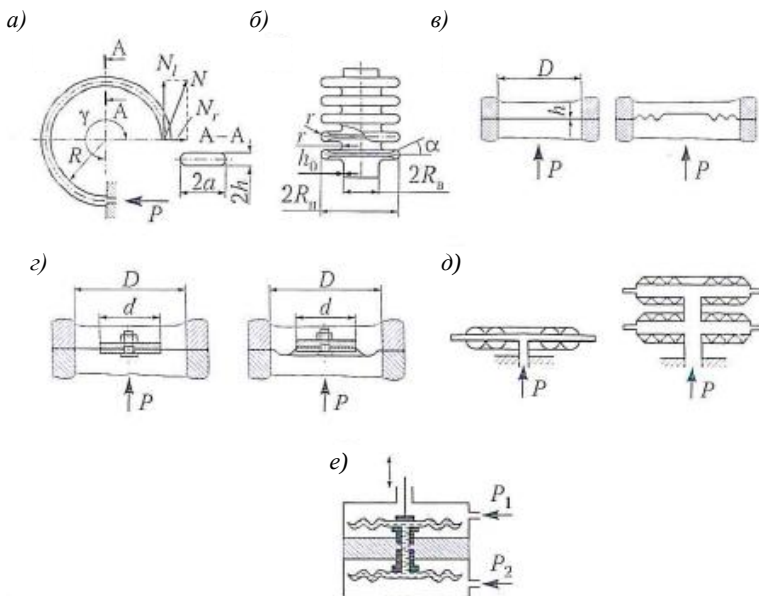


Рисунок 2.12 – Деформационные чувствительные элементы:

a – трубчатая пружина (R – радиус кривизны; γ – центральный угол; a, h – полуоси овального сечения; P – давление; N_t, N_r – касательная и радиальная составляющие силы N); *б* – сифон (h_0 – толщина стенки; $2R_v, 2R_n$ – внутренний и наружный диаметры) с гофрами радиусом закругления r и углом уплотнения α ; *в* – плоская и гофрированная мембраны (h – толщина, D – диаметр); *г* – плоская и гофрированная эластичные мембраны (D – диаметр) с жёстким центральным металлическим диском диаметром d ; *д* – гофрированная мембранная коробка и мембранный блок из них; *е* – мембранный блок с жидкостным заполнением

Наименьший диапазон измеряемых давлений имеют *мембраны* – круглые тонкие пластины, защемлённые по контуру. Они бывают упругими и эластичными, плоскими и гофрированными. Под действием давления они прогибаются по центру, а величина прогиба зависит от геометрических размеров и материала мембраны. Изготавливаются мембраны из стали, бронзы и различных сплавов (см. рисунок 2.12, *в*).

Эластичные мембраны предназначены для измерения малых давлений и разности давлений и могут изготавливаться из ткани, резины, тефлона и других материалов. Их перестановочное усилие определяется эффективной площадью $F_{эф}$ мембраны и равно $N = PF_{эф}$, а прогиб не превышает 10 % от возможного. Для увеличения перестановочного усилия в эластичных мембранах применяют жесткий центр с металлическим диском (см. рисунок 2.12, *г*).

Для получения большего прогиба используют соединение мембран в мембранные коробки и блоки (см. рисунок 2.12, *д*).

Для предотвращения повреждения чувствительного элемента при воздействии односторонних нагрузок при измерении перепада давления применяют мембранные блоки с жидкостным заполнением, тогда мембраны складываются, а жидкость перетекает из одного блока в другой (см. рисунок 2.12, е).

Статистические характеристики всех деформационных ЧЭ нелинейные. Для линеаризации сильфонов и мембран используется гофрирование.

Гофры бывают треугольными, трапецеидальными, синусоидальными. Для линеаризации также увеличивают жёсткость (цилиндрические пружины в сильфонах, дополнительные диски в эластичных мембранах), что уменьшает их чувствительность.

Кроме того, имеется упругое последствие (уменьшение деформации после снятия давления), а также остаточная деформация, что даёт значительную погрешность. Поэтому для технических манометров верхний предел измерений ограничен половиной предельного давления.

Деформационные СВИ давления имеют самое широкое применение, так как обладают высокой точностью, просты по конструкции, надёжны, ремонтпригодны и имеют низкую стоимость. На основе рассмотренных выше деформационных ЧЭ строятся различные аналоговые ИП для измерения давления: показывающие, самопишущие, электроконтактные, сигнализирующие и др.

Измерительные приборы с одновитковой трубчатой пружиной предназначены для измерения избыточного давления и разряжения неагрессивных жидких и газообразных сред.

Для передачи перемещения свободного конца трубчатой манометрической пружины, деформируемой под действием давления, к стрелке манометра используют секторные и рычажные передаточные механизмы, которые осуществляют преобразование перемещения её конца в несколько градусов в угловое перемещение стрелки на 270–300°. Рычажные передаточные механизмы используют в вибраустойчивых манометрах невысокой точности. Секторные передаточные механизмы применяют в образцовых приборах, не использующихся при вибрациях.

Манометр (рисунок 2.13) состоит из трубчатой пружины 5, держала 1, наконечника 10, штуцера 14, платы 2, на которой закреплена спиральная пружина 7, шкала 3 и установлено зубчатое колесо 8 с закреплённой на нём стрелкой 4.

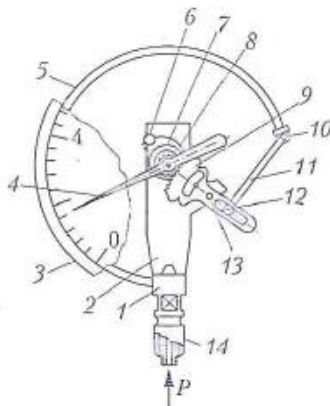


Рисунок 2.13 – Устройство манометра:

- 1 – держало; 2 – плата; 3 – шкала;
- 4 – стрела; 5 – трубчатая пружина;
- 6 – колонка крепления спиральной пружины на плате; 7 – спиральная пружина;
- 8 – зубчатое колесо; 9 – зубчатый сектор;
- 10 – наконечник; 11 – тяга;
- 12 – регулировочный винт; 13 – ось вращения зубчатого сектора; 14 – штуцер

В зацеплении с зубчатым колесом 8 находится зубчатый сектор 9, который связан через ось 13 его вращения тягой 11 с наконечником трубчатой пружины 10. В кулисе сектора 9 имеется регулировочный винт 12. Диапазон измерений манометров – от 0 до 0,1 МПа и от 0 до 10^3 МПа. Класс точности – 0,4–4,0.

Мановакууметры имеют аналогичную конструкцию, но шкала в них имеет нуль посередине: слева – измерение вакуума, справа – избыточного давления.

Вакууметры конструктивно аналогичны манометрам с одновитковой пружиной. Диапазон измерения давлений у вакууметров – от $-0,1$ до 0 МПа.

2.2.3 Грузопоршневые манометры

Принцип действия грузопоршневого манометра основан на уравнивании усилия, развиваемого измеряемым давлением на неуплотнённом поршне, силой тяжести груза, который нагружает поршень. Поршень расположен в цилиндре, заполненном рабочей жидкостью (маслом) с малым зазором между поршнем и стенками цилиндра. Таким образом, поршень находится во взвешенном состоянии и может оказывать на жидкость давление, обусловленное весом поршня и груза на нём. Поршневые манометры бывают с простым, дифференциальным поршнем и мультипликатором.

Грузопоршневой манометр 1 имеет простой поршень 2 и гидравлический пресс 3 (рисунок 2.14, а). Сверху поршня находится тарелка с грузами 4.

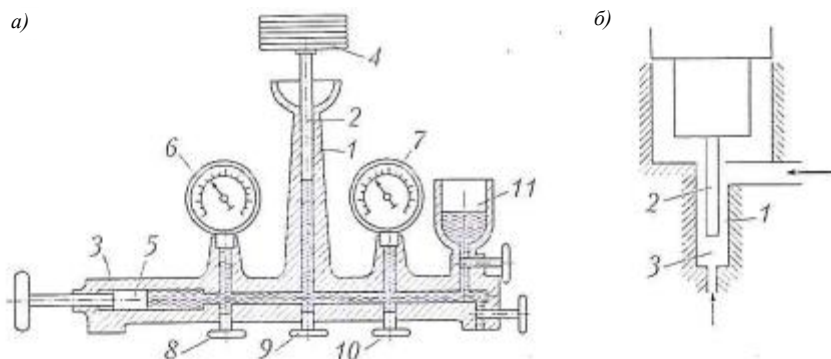


Рисунок 2.14 – Схема образцового грузопоршневого манометра:

- а – схема грузопоршневого манометра: 1 – грузопоршневой манометр; 2 – простой поршень; 3 – гидравлический пресс; 4 – тарелка с грузами; 5 – поршень; 6 – манометр; 7 – проверяемый манометр; 8–10 – вентили; 11 – бачок; б – измерительная камера: 1 – камера; 2 – дифференциальный поршень; 3 – цилиндрическая камера

Внутри пресса 3 имеется поршень 5 для создания внутри грузопоршневого манометра определенного давления. Полость пресса 3 сообщается с манометром 6 и проверяемым манометром 7 через каналы, которые пере-

квиваются вентилями 8–10. Пресс заполняется жидкостью через бак 11. При измерении давления, создаваемого прессом 3, тарелку 4 нагружают до тех пор, пока поршень 2 не придет в равновесие, о чем судят по рискам на поршне 2. Это давление равно

$$P = \frac{m}{F_{\text{пр}}} \left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{г}}} \right) g, \quad (2.15)$$

где $m = m_{\text{г}} + m_{\text{п}}$ – масса груза и поршня;

$\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{г}}$ – плотность воздуха и плотность груза соответственно;

$F_{\text{пр}}$ – приведенная площадь поршня (0,5 см²);

g – местное ускорение свободного падения.

Приведённая площадь поршня является основным параметром грузопоршневого манометра. Для исключения влияния на результаты измерения сил трения поршню придают вращение. Класс точности – 0,02; 0,05; 0,2.

Для измерения более высокого давления (до 0,5 МПа) применяют дифференциальный поршень 2 с меньшей приведенной площадью (0,2 см²), что позволяет не увеличивать вес грузов при измерении давлений.

2.2.4 Электрические манометры

Ионизационные манометры (рисунок 2.15) служат для измерения давлений в диапазоне 10^{-1} – 10^{-8} Па. Такой манометр представляет собой стеклянную манометрическую лампу, внутри которой находится катод 1, окружённый анодной сеткой 2. Концентрически сетка 2 окружена цилиндрическим ионным коллектором 3, в цепи которого находится миллиамперметр 4. К аноду 2, к катоду 1 и коллектору 3 подводится напряжения от источников питания (см. рисунок 2.15, а). Измеряемый газ прокачивают через манометр.

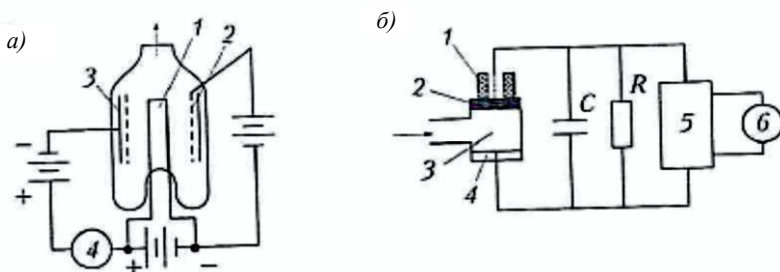


Рисунок 2.15 – Ионизационные манометры:

а – ионизационный манометр: 1 – катод; 2 – анод; 3 – коллектор; 4 – миллиамперметр;

б – радиоизотопный манометр: 1 – защитные экраны; 2 – коллектор;

3 – ионизационная камера; 4 – излучатель изотопов; 5 – усилитель; 6 – ИП

Действие ионизационного вакуумметра основано на ионизации молекул газа (давление которого измеряется), протоком электронов, испускаемых

раскалённым катодом 1. Вылетая из катода 1, они притягиваются положительно заряженным анодом 2. При движении электроны, сталкиваясь с молекулами измеряемого газа, ионизируют его. Положительно заряженные ионы попадают на отрицательно заряженный коллектор 3 и создают коллекторный ток I_k , пропорциональный величине анодного тока I_a и давлению газа P :

$$I_k = kI_a P, \quad (2.16)$$

где k – коэффициент, зависящий от размера баллона лампы и состава газа.

Нижний предел измерения давления ограничен фоновым током, вызываемым мягким рентгеновским излучением анода и фотоэлектронной эмиссией коллектора. Для снижения нижнего предела измерения давления используют магнитные электроразрядные манометры с холодным катодом, где траектория движения электронов формируется внешним магнитным полем.

2.2.5 Радиоизотопные манометры

В радиоизотопных манометрах (см. рисунок 2.15, б) для ионизации измеряемого газа применяют α -излучение, обладающее наивысшей ионизационной способностью. Радиоизотопный манометр состоит из ионизационной камеры 3 (через нее прокачивают газ, давление которого измеряют), радиоактивного излучателя изотопов 4, коллектора ионов газа 2, защитных экранов 1, усилителя ионного тока 5 и ИП 6.

Рассмотренные ионизационные манометры малоинерционны, в них отсутствует погрешность гистерезиса, а показания в виде электрического СИИ можно передавать на расстояние.

2.2.6 Тепловые манометры

Тепловые манометры служат для измерения давлений в диапазоне $1-10^4$ Па. Они представляют собой неуравновешенный мост, который питается от ИПС. В другой диагонали моста находится ИП-милливольтметр. В мосту сопротивления R_1-R_3 постоянные, а сопротивлением R_4 является вольфрамовая нить, нагреваемая до 200°C . Она находится в камере, через которую прокачивается газ (его давление измеряют) (рисунок 2.16, а). В тепловых манометрах используется зависимость, состоящая в том, что при низких абсолютных давлениях (или глубоком вакууме) длина свободного пробега молекул соизмерима с геометрическими размерами измерительной камеры. В этом случае теплопроводность газа обуславливается его давлением. При давлениях, меньших 10^3 Па, теплопроводность газа линейно уменьшается при снижении давления. При изменении давления газа изменяется его теплопроводность, что изменяет температуру электрического сопротивления R_4 , а следовательно, и величину самого сопротивления, что вызывает разбаланс моста. Это влечёт изменение напряжения в измерительной диагонали моста, пропорциональное изменению давления, которое фиксируется милливольтметром.

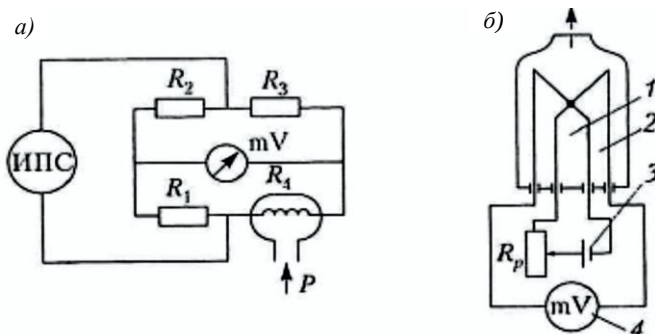


Рисунок 2.16 – Схема тепловых манометров:

а – тепловой манометр; б – термопарный манометр:

1 – нагревательный элемент; 2 – термопара; 3 – источник питания; 4 – милливольтметр

В термопарных тепловых манометрах (см. рисунок 2.16, б) измеряется температура нагревательного элемента 1, который нагревается до 200 °С от источника питания 3 и конструктивно объединён с термопарой 2. Нагревательный элемент 1 и термопара 2 находятся в баллоне (через него прокачивается газ, давление которого измеряется). ТермоЭДС термопары 2, сопряженной с нагревательным элементом 1, определяется давлением окружающего газа, так как температура элемента 1 зависит от теплопроводности окружающего газа. При уменьшении давления газа его теплопроводность уменьшается, что влечёт уменьшение температуры элемента 1, а следовательно, и уменьшение величины термоЭДС, вырабатываемой термопарой. ТермоЭДС измеряется милливольтметром, включённым в цепь термопары и отградуированным в единицах давления. Тепловые манометры градуируются по определённому газу для уменьшения систематической погрешности.

2.2.7 Тензометрические приборы

Отдельным видом бесшкальных первичных преобразователей давления являются тензометрические преобразователи, обладающие простотой устройства, высокой точностью, надёжностью и быстродействием, незначительными габаритами и массой, большой виброустойчивостью.

Действие измерительных тензопреобразователей основано на явлении тензоэффекта, суть которого состоит в изменении электрического сопротивления упругого тела при его деформации. Тензопреобразователи могут выполняться из металлической проволоки, но наиболее широкое применение получили полупроводниковые тензопреобразователи, представляющие собой тонкую плёнку монокристаллического кремния (полупроводник), наклеенного или напылённого на поверхность пластинки из монокристаллического сапфира (электрический изолятор). Они обладают более высокой тензочувствительностью, чем металлические тензорезисторы. Применение тонкоплёночных полупроводни-

ковых тензорезисторов с усилительным устройством в микроэлектронном исполнении позволяет с помощью усилителя получить пропорциональный давлению унифицированный входной сигнал постоянного тока 0–5 мА.

Связь между изменением сопротивления тензорезистора и его деформацией устанавливается соотношением

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}, \quad (2.17)$$

где $\frac{\Delta R}{R}$ — относительное изменение сопротивления тензорезистора;

K — постоянный коэффициент, зависящий от материала тензорезистора;

$\frac{\Delta l}{l}$ — относительное изменение длины тензорезистора.

Совершенствование технологии изготовления полупроводниковых тензорезисторов создало возможность изготавливать их непосредственно на кристаллическом элементе, выполненном из кремния или сапфира. Упругие элементы кристаллических материалов обладают упругими свойствами, приближающимися к идеальным. Сцепление тензорезистора с мембраной за счёт молекулярных сил позволяет отказаться от использования клеящих материалов и улучшить метрологические характеристики преобразователей. На рисунке 2.17, *а* показана сапфировая мембрана 4 с расположенными на ней однополосковыми тензорезисторами с положительной 1 и отрицательной 2 чувствительностью. Положительной чувствительностью обладает тензорезистор, у которого отношение $\Delta R / R > 0$, если же $\Delta R / R < 0$, то чувствительность отрицательная. Структура однополоскового тензорезистора приведена на рисунке 2.17, *б*.

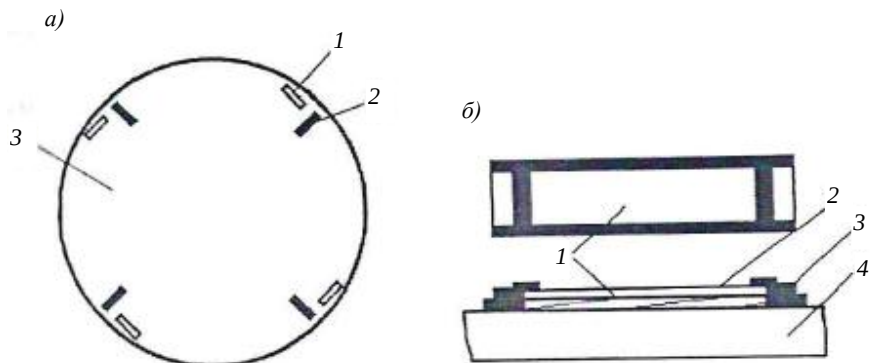


Рисунок 2.17 – Схема тензорезисторных чувствительных элементов:
1 – тензорезистор; 2 – защитное покрытие; 3 – металлизированные токоведущие дорожки;
4 – упругий элемент преобразователя (сапфировая мембрана)

Тензорезисторы можно располагать на мембране так, что при деформации они будут иметь разные по знаку приращения сопротивления. Это позволяет создавать мостовые схемы и в каждое из плеч включать тензорезисторы с соответствующим значением $\Delta R / R$.

На рисунке 2.18 приведена схема тензорезисторного измерительного преобразователя разности давлений. Мембранный тензомодуль 4 представляет собой металлическую мембрану, к которой сверху припаяна сапфировая мембрана с четырьмя напылёнными кремниевыми тензорезисторами, образующими плечи неравновесного моста. Тензомодуль закреплен на основании 2 и отделён от измеряемой среды двумя разделительными металлическими мембранами 1 и 3. Замкнутые полости между тензомодулем и мембранами заполнены полиметилсилоксановой жидкостью. Измеряемая разность давлений $P_1 - P_2$ воздействует на тензомодуль через указанные мембраны и жидкость. Через герметичные выводы 5 тензомодуль подключается к встроенному электронному устройству, предназначенному для преобразования изменения сопротивления тензорезисторов в унифицированный токовый выходной сигнал (0–5; 0–20 или 4–25 мА), который по двухпроводной линии дистанционной передачи поступает к блоку питания 7. Одновременно по этой линии передаётся выходной токовый сигнал. Блок питания служит для повышения мощности выходного сигнала до уровня, необходимого для подключения внешней нагрузки R_n и формирования заданного уровня выходного сигнала (0–5; 0–20 или 4–25 мА).

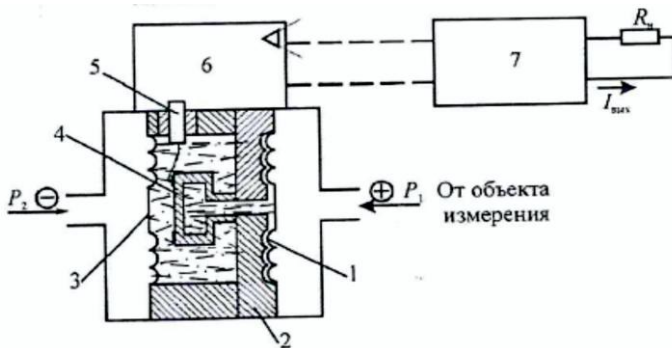


Рисунок 2.18 – Схемы тензорезисторных измерительных преобразователей разности давлений с унифицированным токовым выходным сигналом

В тензорезисторных преобразователях избыточного давления, абсолютного давления и разрежения используются аналогичные измерительные блоки. Отличие состоит в том, что измерительный преобразователь подключается к объекту «плюсовой» камерой, а «минусовой» сообщается с атмосферой. У измерительных преобразователей абсолютного давления «минусовая» камера вакуумирована.

2.3 Удельный объём

Параметром термодинамической системы является удельный объём рабочего тела, которым является газ. Два ранее рассмотренных термических параметра однозначно определяют состояние гомогенной системы, поэтому третий параметр V является однозначной функцией первых двух. Следовательно, $v = f(P, T)$; $T = \varphi(P, v)$; $P = \varphi(v, T)$.

Третий термический параметр – удельный объём v , или объём единицы массы вещества, $\text{м}^3/\text{кг}$, т. е. $v = V / m$, или $v = 1 / \rho$, где ρ – плотность вещества.

Таким образом, удельный объём вещества является величиной, обратной плотности этого вещества при известных P и T , $v = 1/\rho$ ($\text{м}^3/\text{кг}$).

Для 1 кг идеального газа Клапейроном установлено уравнение состояния

$$pv = RT, \quad (2.18)$$

в котором газовая постоянная R , Дж/(кг·К) имеет для каждого газа своё постоянное значение.

Любой реальный газ тем ближе к идеальному, чем ниже его давление и выше температура. Например, окружающий нас воздух можно считать идеальным газом.

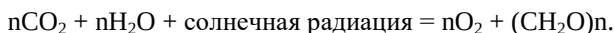
Контрольные вопросы

- 1 Назовите термодинамические параметры тела.
- 2 Что такое температура вещества?
- 3 Объясните физический смысл температуры вещества.
- 4 На чём основан принцип работы жидкостных термометров расширения?
- 5 В каких случаях используются спиртовые и ртутные термометры?
- 6 На чём основан принцип действия манометрических термометров?
- 7 Привести схему манометрического термометра.
- 8 На каком свойстве основано измерение температуры термометрами сопротивления?
- 9 В каких случаях используются платиновые и медные термометры сопротивления?
- 10 На чём основан принцип действия термоэлектрических термометров?
- 11 Что положено в основу измерения температуры пирометром?
- 12 Сферы применения пирометров.
- 13 Основные элементы устройства тепловизора.
- 14 Область применения тепловизоров.
- 15 Назовите область применения тепловизоров при работе по специальности.
- 16 Что такое давление газа? Дайте его физическое объяснение.
- 17 Назовите виды давления газа.
- 18 Назовите разновидности манометров.
- 19 Схемы жидкостных приборов измерения давления.
- 20 Конструкция и принципы действия деформационных манометров.
- 21 Принцип действия и назначение грузопоршневых манометров.
- 22 Устройство электрических манометров.
- 23 Принцип действия и область применения тепловых манометров.
- 24 Принцип действия и область применения измерительных тензопреобразователей.
- 25 Математическая связь термических параметров «удельный объём» и «плотность вещества».

3 ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

3.1 Тепловой баланс и основные технические показатели дизельного двигателя внутреннего сгорания

Химическая энергия дизельного топлива – это законсервированная солнечная энергия, которая миллионы лет назад с помощью фотосинтеза аккумулировалась в биологических объектах в виде углеводов. В обобщённом виде реакцию фотосинтеза можно представить так:



Образовавшиеся в результате углеводороды являются топливом, которое при сжигании позволяет получить теплоту. Эта теплота с помощью ДВС преобразуется в полезную для человека механическую работу, сопровождаемую потерями. Тепловой баланс дизельного ДВС выглядит следующим образом.

Полезная работа составляет 40–50 % теплоты сгорания дизельного топлива. Потери в среднем составляют: с уходящими газами – 30–35 %, с охлаждающей водой – 18–23,5 %, механические потери (на трение) – 2,0–2,5 %, КПД соответствует 50 %.

Экономические показатели представляют собой различные КПД. Наиболее часто используемыми являются:

1) *термический* КПД η_t теоретического цикла, который определяет степень совершенства термодинамического цикла дизельного ДВС (цикла со смешанным, т. е. изохорно-изобарным подведением теплоты):

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1}, \quad (3.1)$$

где l_u – работа цикла;

q_1 – количество подведённой теплоты;

2) *относительный внутренний* КПД η_{oi} , который характеризует степень отклонения реальных процессов сжатия и расширения от теоретических (адиабатных) вследствие необратимости;

3) *индикаторный* КПД η_i , который оценивает степень совершенства действительной работы ДВС без учёта механических потерь (определяется по индикаторной диаграмме, т. е. диаграмме изменения давления газов цилиндра, т. к. записывается с помощью специального прибора – индикатора):

$$\eta_i = \eta_t + \eta_{oi}; \quad (3.2)$$

4) *механический КПД* η_m , который учитывает потери энергии на трение элементов (например, поршня о стенки цилиндра) и привод вспомогательных механизмов, а также «насосные потери» (на совершение хода всасывания и хода выпуска) в ДВС;

5) *эффективный КПД* η_e , который характеризует работу ДВС с учётом всех потерь и отклонений реального рабочего процесса от теоретического:

$$\eta_e = \eta_i \eta_m = \eta_i \eta_{oi} \eta_m. \quad (3.3)$$

Зная КПД, легко определить соответствующие им (теоретический, индикаторный, эффективный) удельные расходы энергоносителя (топлива), кг/(кВт·ч),

$$b = 3600 / (Q_n^p \eta), \quad (3.4)$$

где $Q_n^p = 42500$ КДж/кг·К – низшая теплота сгорания дизельного топлива.

Рассмотрим основные понятия тепловозных дизелей.

3.2 Принцип действия 2- и 4-тактных дизелей

В двигателе внутреннего сгорания поступательное движение поршня в каждом цилиндре преобразуется при помощи кривошипно-шатунного механизма в механическую работу в виде вращения коленчатого вала двигателя. Крайние положения поршня называются внутренней (верхней) ВМТ и наружной (нижней) НМТ мёртвыми точками.

Мёртвой точкой называется крайнее положение в цилиндре, при котором скорость поршня равна нулю.

Основными геометрическими размерами цилиндра двигателя являются диаметр цилиндра D и ход поршня S – путь, пройденный поршнем от ВМТ до НМТ. Ход поршня равен двум радиусам кривошипа: $S = 2R$. В цилиндре V_c – объём камеры сжатия; V_s – рабочий объём; V_a – полный объём:

$$V_a = V_c + V_s. \quad (3.5)$$

Отношение полного объёма цилиндра к объёму камеры сжатия называют теоретической (геометрической) степенью сжатия:

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}. \quad (3.6)$$

Для 2-тактных двигателей отношение объёма над поршнем в момент начала фактического сжатия в цилиндре к объёму камеры сжатия называют действительной степенью сжатия:

$$\varepsilon = \frac{V_c + V_s(1 - \Psi_a)}{V_c}, \quad (3.7)$$

где Ψ_a – доля потеряннного хода (характеризует часть хода поршня, когда он движется от НМТ до момента перекрытия впускных или выпускных окон цилиндра).

Для 4-тактного двигателя $\Psi_a = 0$.

Принцип действия 4-тактного двигателя.

Рассмотрим принцип действия 4-тактного двигателя на примере анализа зависимости $P = f(V)$.

Графическое изображение зависимости давления в цилиндре от его объёма $P = f(V)$ называется индикаторной диаграммой.

Четырёхтактный ДВС. На рисунке 3.1 показана схема работы четырёхтактного бескрейцкопфного (тронкового) дизеля без наддува. В четырёхтактном ДВС рабочий цикл осуществляется за четыре такта или за два оборота коленчатого вала. Тактом называется основной процесс, имеющий место в цилиндре при ходе поршня от одной мёртвой точки к другой.

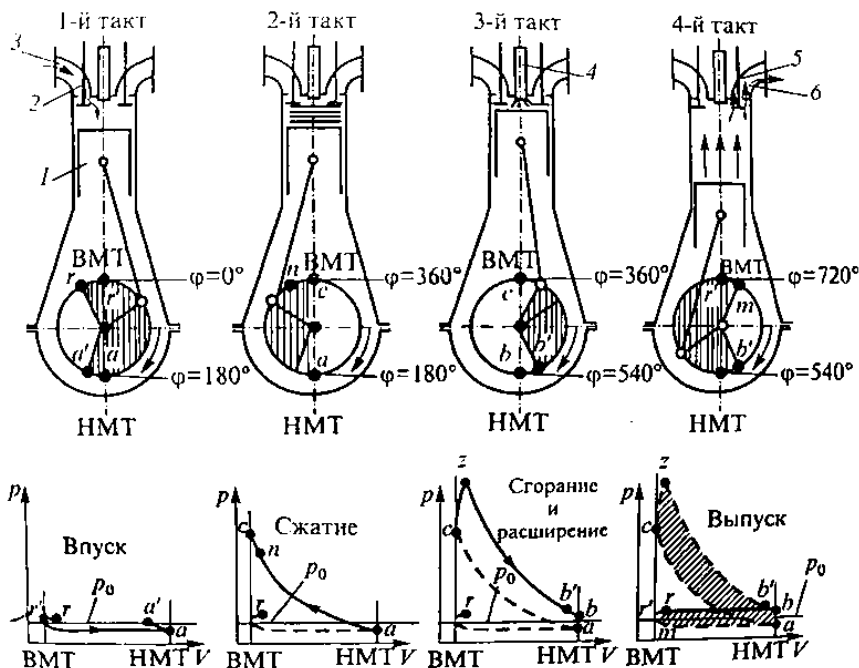


Рисунок 3.1 – Схема работы дизеля:

1 – поршень; 2 – впускной клапан; 3 – впускной патрубок; 4 – форсунка;
5 – выпускной клапан; 6 – выпускной патрубок

Отличительная особенность дизеля с наддувом заключается в том, что за время первого такта свежий заряд воздуха засасывается не из окружающей среды, а поступает во впускной патрубок при повышенном давлении из специального компрессора наддува. В современных дизелях компрессор очень часто приводится в движение газовой турбиной, работающей на отра-

ботавших газах двигателя. Агрегат, состоящий из газовой турбины и компрессора, называют турбокомпрессором наддува. В дизелях с наддувом линия наполнения обычно идёт выше линии выпуска (четвертого такта).

Первый такт (I) – наполнение (впуск). Поршень движется от ВМТ к НМТ. Давление воздуха на впуске $P_s = 0,13 \dots 0,3$ МПа. Температура воздуха на впуске $T_s = 310 \dots 340$ К.

Второй такт (II) – сжатие и первая фаза сгорания. Поршень движется от НМТ к ВМТ. Давление воздуха в конце сжатия $P_c = 4 \dots 10$ МПа. Температура воздуха в конце сжатия $T_c = 800 \dots 1000$ К, что на $160 \dots 220$ К превышает температуру самовоспламенения топлива. В конце такта подается топливо в цилиндр двигателя.

Третий такт (III) – вторая фаза сгорания и расширение (рабочий ход). Максимальное давление газов в цилиндре $P_z = 5,5 \dots 14$ МПа. Максимальная температура газов в цилиндре $T_z = 1700 \dots 2000$ К. Поршень движется от ВМТ к НМТ. В течение этого такта совершается положительная работа.

Четвертый такт (IV) – выпуск. Поршень движется от НМТ к ВМТ. Давление газов в конце выпуска $P_v = 0,4$ МПа. Температура газов в конце выпуска $T_v = 700 \dots 800$ К.

Принцип действия 2-тактного двигателя.

В двухтактных двигателях очистка рабочего цилиндра от продуктов сгорания и наполнение его свежим зарядом, т. е. процессы газообмена, происходят только в тот период, когда поршень находится в районе НМТ при открытых органах газообмена. Выпуск газов из цилиндра происходит через окна или клапаны. Впуск (продувка) свежего заряда в цилиндр в современных двухтактных двигателях осуществляется только через окна. Выпускное и продувное окна размещены в нижней части втулки рабочего цилиндра, а выпускные клапаны – в крышке цилиндра.

Первый такт – впуск, сжатие и первая фаза сгорания. Поршень движется от НМТ к ВМТ. В конце такта подаётся топливо в цилиндр двигателя для сгорания.

Второй такт – вторая фаза сгорания, расширение, выпуск. Поршень движется от ВМТ к НМТ. В конце такта происходит выпуск отработавших газов.

Рабочий цикл в 2-тактном двигателе происходит, в отличие от четырёхтактного, за два хода поршня. Если четырёхтактный двигатель только половину времени, затраченного на рабочий цикл, работает как тепловой двигатель (такты сжатия и расширения), то двухтактный работает как тепловой двигатель практически всё время.

Основным недостатком двухтактных двигателей является малое время, отводимое на процессы газообмена, которые происходят только при движении поршня вблизи НМТ. В результате этого в цилиндре образуются зоны, в которых остаются отработавшие газы, участвующие затем в новом рабочем цикле.

Для ликвидации этого явления стремятся увеличить время продувки, т. е. время одновременного открытия продувочных и выпускных органов, и обеспечить лучшую организацию воздушных потоков. Как правило, применяется прямоточно-щелевая схема организации воздушных потоков (дизель типа Д100) и прямоточная клапанно-щелевая схема (продувочные окна и выпускные клапаны) в дизелях типа 14Д40.

3.3 Группа основных параметров дизеля

В группу основных параметров двигателя входят, прежде всего, мощность N , угловая скорость вращения коленчатого вала ω и тактность. Мощность индикаторная N_i и эффективная N_e зависит от величин соответственно среднего индикаторного P_i и эффективного P_e давлений, а также от рабочего объема цилиндра V_s и числа цилиндров z .

Эффективная мощность двигателя, кВт, определяется соотношением

$$N_e = \frac{P_e \omega z V_s}{\pi \tau} \cdot 10^{-3}, \quad (3.8)$$

где τ – коэффициент тактности.

Рабочий объем цилиндра, м^3 ,

$$V_s = \frac{p D^2}{4} S, \quad (3.9)$$

где D – диаметр поршня, м;

S – ход поршня, м.

Тогда

$$N_e = \frac{P_e \omega z D^2 S}{4 \tau} \cdot 10^{-3}, \quad (3.10)$$

Коэффициент тактности принимается равным двум для 2-тактных и четырем – для 4-тактных двигателей.

Среднее индикаторное (эффективное) давление.

Среднее индикаторное (эффективное) давление представляет собой условное постоянное давление, которое, действуя на поршень в течение одного хода поршня, совершает работу, равную индикаторной (эффективной) работе за цикл. Среднее индикаторное P_i (эффективное P_e) давление характеризует нагрузку двигателя, степень использования рабочего объема цилиндра, полноту и своевременность сгорания топлива, степень наддува и совершенство всей конструкции. Обычно среднее эффективное давление и средняя скорость поршня C_m выбираются на основании опыта конструирования, доводки и эксплуатации существующих двигателей.

Зона допустимых значений среднего эффективного давления P_e тепловозных дизелей в зависимости от эффективной мощности представлена на рисунке 3.2.

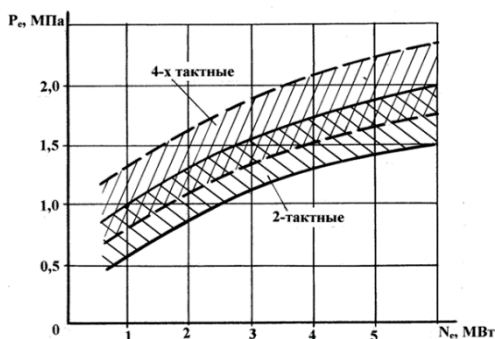


Рисунок 3.2 – Зона допустимых значений среднего эффективного давления P_e тепловозных дизелей в зависимости от эффективной мощности

Средняя скорость поршня, м/с, является параметром, определяющим степень быстроходности, долговечности дизеля и рассчитывается по соотношению

$$C_m = \frac{S\omega}{p}. \quad (3.11)$$

Для существующих тепловозных двигателей:

- 4-тактных $C_m = 7,4 \dots 10,5$ м/с;
- 2-тактных $C_m = 7,2 \dots 8,3$ м/с.

Двигатели с высокими значениями C_m характеризуются меньшими габаритами и массой. Для их изготовления применяются материалы повышенного качества и износостойкости, повышается класс точности изготовления дизелей, в процессе эксплуатации для смазки используются высококачественные сорта масел с присадками с тем, чтобы сохранить моторесурс на требуемом уровне.

Число цилиндров в зависимости от общей мощности, размеров цилиндра и тактности колеблется от 6 до 24 для 4-тактных и 10–16 для 2-тактных.

У 4-тактных двигателей исходя из условий уравнивания и необходимой равномерности крутящего момента применяют чётное число цилиндров (6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 и 20). При числе цилиндров от 6 до 8 обычно применяют рядное расположение. При числе цилиндров больше 8 переходят к V-образному их расположению.

Диаметры цилиндров, м, построенных тепловозных дизелей изменяются в пределах:

- для 4-тактных дизелей с нераздельной камерой сгорания $D = 0,170 \dots 0,300$ м;
- для 2-тактных дизелей $D = 0,150 \dots 0,250$.

При больших диаметрах цилиндров имеют место высокая теплонапряженность, значительная масса деталей кривошипно-шатунного механизма и поршня вследствие высоких нагрузок.

На рисунке 3.3 показана зона преимущественных диаметров цилиндров D и степени сжатия ϵ дизелей в зависимости от эффективной мощности N_e

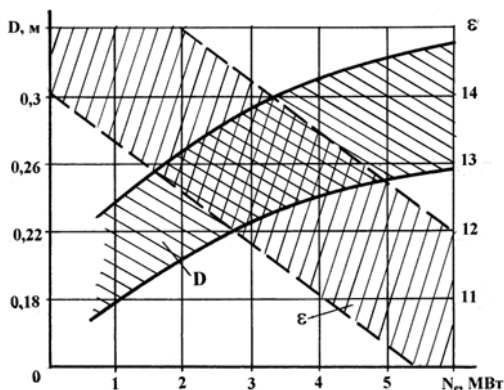


Рисунок 3.3 – Зона преимущественных диаметров цилиндров D и степени сжатия ϵ дизелей в зависимости от эффективной мощности N_e

Особым параметром, характеризующим конструкцию двигателя, является отношение хода поршня S к диаметру D . Для тепловозных дизелей:

- $S / D = 1,0 \dots 1,3$ для 4-тактных дизелей;
- $S / D = 1,2 \dots 1,7$ для 2-тактных дизелей с клапанно-щелевой продувкой;
- $S / D = 1,2 \dots 1,4$ для 2-тактных дизелей с противоположно-движущимися поршнями (прямоточной продувкой).

В двигателях средней быстроходности обычно применяют увеличенные отношения S / D , так как при прочих равных условиях с увеличением S / D уменьшается диаметр цилиндра, нагрузка на детали кривошипно-шатунного механизма, увеличивается высота камеры сгорания, что ведёт к улучшению процесса сгорания, но при этом увеличивается высота двигателя.

У быстроходных дизелей величина S / D меньше. При этом уменьшаются средняя скорость поршня и высота двигателя. Однако с понижением S / D ухудшаются условия протекания процессов смесеобразования.

3.4 Процессы газообмена тепловозных дизелей

Для осуществления рабочего цикла необходимо удалить из цилиндра продукты сгорания после завершения процесса расширения и заполнить цилиндр свежим воздухом для обеспечения сгорания топлива в очередном цикле. Очистка и наполнение цилиндра являются процессами газообмена,

продолжительность которых определяется фазами газораспределения, т. е. моментами открытия и закрытия выпускных и впускных органов (окон или клапанов).

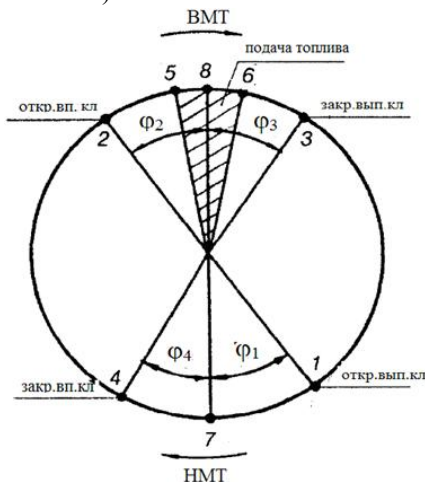


Рисунок 3.4 – Диаграмма фаз газораспределения 4-тактного дизеля

клапаны закрываются позже НМТ на угол φ_4 .

Общая продолжительность газообмена соответствует $400\text{--}520^\circ$ угла поворота коленчатого вала.

В период перекрытия клапанов (2–3) в цилиндре могут происходить процессы продувки, двойного выпуска и двойного наполнения, в зависимости от соотношения давлений в наддувочном ресивере P_s , в цилиндре $P_{\text{ц}}$ и в выпускном коллекторе $P_{\text{г}}$.

При $P_s > P_{\text{ц}} > P_{\text{г}}$ происходит продувка цилиндра. Избыток продувочного воздуха в расчётах оценивают коэффициентом продувки, который представляет собой отношение массы воздуха, которые поступают в цилиндр за цикл, к массе воздуха, остающегося в цилиндре в составе заряда к началу сжатия:

$$\varphi_a = \frac{G_s}{G_L}. \quad (3.12)$$

Коэффициент продувки 4-тактных дизелей с наддувом находится в пределах $\varphi_{\text{п}} = 1,05 \dots 1,35$.

Как правило, фазы газораспределения не рассчитываются, а выбираются в соответствии с фазами аналогичных двигателей. После доводки и испытаний эти принятые фазы корректируют. Углы (φ_1 и φ_2 называют фазами опережения открытия, а φ_3 и φ_4 – запаздывания закрытия выпускного и впускного клапанов.

На рисунке 3.4 изображена диаграмма фаз газораспределения 4-тактного дизеля.

Период газообмена включает в себя свободный выпуск газов (1–7), выпуск (7–8), наполнение (8–7) и дозарядку (7–4). В период перекрытия клапанов, когда одновременно открыты впускной и выпускной клапаны, на фазы выпуска и наполнения накладывается фаза продувки (2–3). Период топливоподачи – (5–6).

Продолжительность периода газообмена превышает длительность тактов впуска и выпуска, так как выпускные клапаны открываются раньше НМТ на угол φ_1 , а впускные

На рисунке 3.5 изображена диаграмма фаз газораспределения 2-тактного дизеля.

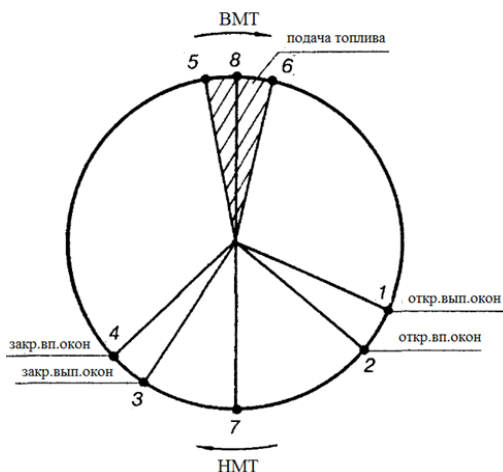


Рисунок 3.5 – Диаграмма фаз газораспределения 2-тактного дизеля

В двухтактном двигателе процессы газообмена протекают за $120\text{--}150^\circ$ поворота коленчатого вала, занимая часть процесса выпуска газов и часть хода сжатия. Свободный выпуск протекает от момента открытия выпускных окон до момента открытия впускных окон (1–2), а дозарядка – соответственно (3–4).

По сравнению с 4-тактными дизелями, процесс газообмена имеет ряд принципиальных отличий:

- время газообмена в 2,5–3,5 раза меньше, чем для 4-тактных дизелей;
- нет насосных ходов поршня, которые облегчают организацию качественного газообмена;
- значительная часть процессов выпуска и наполнения протекает одновременно, что способствует перемешиванию отработавших газов с воздухом.

В результате указанных отличий качество протекания процессов газообмена у 2-тактных дизелей значительно ниже, о чём свидетельствуют более высокие значения коэффициента остаточных газов ($\gamma_r = 0,04\text{...}0,09$).

Суммарный коэффициент избытка воздуха α_Σ – отношение массы воздуха, который поступает в цилиндр за цикл, к массе воздуха, теоретически необходимого для сгорания цикловой порции топлива.

Для дизельных двигателей $\alpha_\Sigma = 2,8\text{...}3,6$.

3.5 Современные тепловозные дизели

В таблице 3.1 приведены современные тепловозные дизели с указанием страны, фирмы и основных показателей как маневровых, так и маршрутных тепловозов.

Таблица 3.1 – Тепловозные дизельные двигатели

Страна, завод	Параметр									
	Марка дизеля	Тип по ГОСТ 10150-88	Мощ- ность, кВт	Номинальная частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Удельный рас- ход топлива по ГОСТ 22602-91 (ИТС623-II), г/(кВт·ч)	Расход масла на угар, г/(кВт·ч)	Ресурс до первой переборки, ч	Ресурс до капи- тального ремонта, ч	Масса, кг	Тепловоз
<i>Мощность двигателя – 500 кВт</i>										
Россия: Завод им. Маминых	211ДЗ	6ЧН21/21	552	1400	214	1,22	15000	45000	4550	ТГМ4, ТГМ4А
Звезда	M721	6ЧН18/20	550	1600	216	2,0	4000	11000	1800	ДЛ-2, АЧ-2
США: Cummins	QSK19	6ЧН15,7/15,9	522	2100	221	<0,5	–	20000	1845	GSL
САТ	3406Е	16ЧН13,7/16,5	429	2100	–	–	4000	20000	1300	–
Германия: MAN	D2842, L6607	12ЧН12,8/14,2	500	2100	200	–	–	20000	1350	–
MTU	396	8ЧН16,5/18,5	500	2100	210	0,75	8000	20000	3010	DE1000, ME07
<i>Мощность двигателя – 1000 кВт</i>										
Россия: ОАО «КЗ»	Д49	8ЧН26/26	1000	750	200	1,10	23500	70000	16000	ТЭМ2 мо- дернизация
ОАО «ПДЗ»	1ПДГ4Д	6ЧН31,8/33	993	750	197	1,09	23500	70000	17000	ЧМЭЗ, ТЭМ18, ТЭМ2
Украина: ГП завод им. Мальшева	Д80	12ЧН26/27	993	750	205	1,63	18800	74500	17000	ЧМЭЗ
США: Cummins	QSK45	12ЧН 15,9/15,9	1007	1800	204	–	4000	20000	5813	–
САТ	3500	12ЧН 17/19	1000	1800	208,2	1,80	–	–	6240	–
Германия: MTU	396	12ЧН16,5/18,5	1000	1800	215	1,00	8000	20000	3850	DE2000

<i>Мощность двигателя – 1500 кВт</i>										
Россия: ОАО «КЗ»	Д49	12ЧН26/26	1470	750	198	1,10	300	1500	17000	М62 модернизация
УДМЗ, завод им. Маминых	ДМ21	12ЧН21/21	1500	1600	211	1,03	(20000)	(70000)	9900	–
РУМО	5362	6ЧН28/32	1617	755	205	1,00	(12000)	(70000)	19000	Предложение
Украина: ГП завод им. Малышева	Д80	10ЧН26/27	1470	750	197	1,63	300	1500	14100	М62 модернизация
США: GE	7FDL	8ЧН22,9/26,7	1500	1050	196	0,70	–	1100	10000	GP18-61, UL17C
Cummins	QSK45	12ЧН15,9/19	1491	1900	209	–	(4000)	(20000)	5813	–
CAT	3500	12ЧН17/19	1455	1800	192	1,80	–	(20000)	5715	MP15C
Германия: MAN	RK215	12ЧН21,5/27	1500	1000	211,7	0,58	(15000)	–	12100	–
<i>Мощность двигателя – 2000–2200 кВт</i>										
Россия: ОАО «КЗ»	12Д49М	12ЧН26/26	2206	1000	187	1,10	(32000)	(60000)	17750	232 модернизация
	1А-9ДГ исп. 2	16ЧН26/26	2250	1000	180,2	1,00	–	–	28300	2ТЭ116
	1А-9ДГ исп. 3	16ЧН26/26	2650	850	180,0	0,89	400	16000	28900	ТЭ10 модерн.
Украина: ГП завод им. Малы- шева	1Д80Б	16ЧН26/27	2206	1000	193	1,60	–	–	23715	2ТЭ116 модернизация
	4Д80А	12ЧН26/27	2206	1000	190	1,60	–	–	18400	–
Швеция: Hedemora	VS	18ЧН21/21	2206	1200	221,6	–	–	–	–	–
Германия: Henschel	2423А	12ЧН24/23	2206	1500	217,6	–	–	–	–	–
MTU	956	12ЧН23/23	2221	1500	217,6	2,00	–	–	–	–

Окончание таблицы 3.1

Страна, завод	Параметр									
	Марка дизеля	Тип по ГОСТ 10150-88	Мощ- ность, кВт	Номинальная частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Удельный рас- ход топлива по ГОСТ 22602-91 (ИТС623-II), г/(кВт·ч)	Расход масла на угар, г/(кВт·ч)	Ресурс до первой перебор- ки, ч	Ресурс до капи- тального ремонта, ч	Масса, кг	Тепловоз
<i>Мощность двигателя – 2500 кВт</i>										
Россия: ОАО «КЗ»	21- 26ДГ01	12ЧН26/26	2500	1000	195	0,90	400	1600	18000	2ТЭ25К
	18-9ДГ	16ЧН26/26	2650	1000	181,4	0,81	–	–	28500	2ТЭ116У, 2ТЭ25КМ
США: GM	710G3	12ЧН23/27,8	2500	900	198	0,90	400–600	–	–	АТ42С
GE	7FDL	16ЧН22,9/26,7	2500	1050	196	0,70	–	1100	19700	С30-7В
Cummins	QSK78	18ЧН18/19	2610	1900	201	–	(4000)	(20000)	–	–
CAT	3608	8ЧН28/30	2460	1000	–	0,45–0,55	(20000)	(80000)	20400	–
Германия: MAN	RK215	12ЧН21,5/27	2370	1000	211,7	0,58	(15000)	–	12100	AD33C
MTU	4000	16ЧН16,5/21	2500	1800	205	1,00	(10000)	(30000)	–	Rh2016
<i>Мощность двигателя – 3000–3500 кВт</i>										
Россия: ОАО «КЗ»	2А- 9ДГ-02	16ЧН26/26	3000	1000	179	0,73	250	1250	30050	ТЭП70, ТЭ70
Украина: ГП завод им. Мальшова	Д80	16ЧН26/27	2940	1000	204	1,63	200	1200	–	2ТЭ116, ТЭ110
США: GM	710G	16ЧН23/27,8	3063	900	198	0,90	400–600	1800	17960	SD70M, SD70MAC, SD9043MAC
GE	GEVO	12ЧН25/32	3440	1050	200	–	–	–	19500	Evolution
CAT	3612	12ЧН28/30	3000	1000	–	0,45–0,55	–	–	25100	–
Франция: SEMT Pielstick	PA6B	8ЧН28/33	2800	1000	–	0,10	–	–	18500	–
Германия: MAN	RK270	12ЧН27/30,5	3000	1000	207	–	–	–	22000	–
MTU	4000	20ЧН16,5/21	2700	1800	198	0,10	(10000)	(30000)	9450	Mak2000

3.6 Дизельный ДВС на локомотиве

В 2024 году исполнилось 100 лет тепловозной тяге, которая в настоящее время является определяющей на Белорусской железной дороге. В связи с этим считаем своим долгом рассказать о создателях первого в мире магистрального тепловоза, родиной которого был СССР.

Никто не создал локомотив, который заменил бы на стальных дорогах мира устаревший, ставший невыгодным паровоз Стефенсона. Упоминание СССР появилось в западной прессе в связи с сенсационной технической новостью – создание первого в мире магистрального тепловоза. Создателям этой новой машины были Ю. В. Ломоносов и Я. М. Гаккель.

Ломоносов Юрий Владимирович окончил Петербургский институт путей сообщения, профессор, разработал теорию тяги локомотивов, служил начальником тяги на Ташкентской железной дороге, был инициатором строительства нового локомотива с нефтяным двигателем Дизеля.

Гаккель Яков Модестович окончил Петербургский электротехнический институт, инженер-электрик, занимавшейся трамваестроением и изобретательством в области авиации.

Оба предложили свой проект в Наркомпути. Было принято решение одну машину построить в СССР, другую – по нашим чертежам за границей и объявить Международный конкурс с оплатой победителю около полутора миллионов золотых рублей.

На коллегии Наркомпути между Ю. В. Ломоносовым и Я. М. Гаккелем завязался спор – какой строить первый тепловоз: тяжелый, но выносливый или быстроходный и лёгкий.

Подход Ю. В. Ломоносова диктовался его опытом работы и состоял в следующем: «Нашей задачей является не изобретение какого-то сверх-тепловоза... По первому тепловозу будут судить не только о нём, но и о тепловозах вообще, и первое впечатление всегда самое сильное. Пусть первый тепловоз будет несколько дорог и несколько сложен, пусть даже он будет и не так экономичен, как нам хотелось бы, но он должен, по вступлении на рельсы Советского Союза, работать без отказа, а не стоять в депо для постоянных починок. Вот основная идея нашего проекта».

О подходе Я. М. Гаккеля можно судить по следующему его высказыванию: «Мы сегодня не машину строим... Мы начинаем выстраивать нашу веру в самих себя. Участие в Международном конкурсе петроградского тепловоза должно наконец опровергнуть унижительную русскую привычку к собственной беспомощности, доставшуюся от царской России».

Советское правительство в январе 1922 года поручило Ю. В. Ломоносову построить тепловоз в Германии, Я. М. Гаккелю – на петроградских заводах. Проекты пробных тепловозов были разработаны как профессором Ю. В. Ломоносовым, так и инженером Я. М. Гаккелем, причём каждый проект – по своей системе.

Международный конкурс тепловозов не состоялся, поскольку ни одной иностранной машины ко дню, обозначенному условиями конкурса, не поступило. В 1924 году были построены только два магистральных тепловоза: по системе Ю. В. Ломоносова и по системе Я. М. Гаккеля. Оба локомотива прошли государственные испытания. Тепловоз Ломоносова официально зарегистрирован под номером Юэ001, а тепловоз Гаккеля – Щэ1. Испытания обоих тепловозов проводились правительственной комиссией.

Народный комиссар путей сообщения Я. Э. Рудзутак издал приказ, в котором отмечено: «Вся техническая Европа и Америка с интересом следят за опытами над тепловозами. В этом вопросе мы идём впереди других стран». Итоги соревнования нарком Рудзутак подвёл следующими словами: «Дизель для железнодорожного транспорта завоёван. Обои тепловозами задача решена одинаково и равноценно».

3.7 Испытания дизельного ДВС

Испытания дизельного двигателя внутреннего сгорания предусматривают следующий перечень действий/работ.

1 Ознакомиться с принципами работы ДВС, основами их конструкции, основными параметрами и марками тепловозных дизелей.

2 Изобразить в координатах pV и Ts безотносительный термодинамический цикл ДВС со смешанным (изохорно-изобарным) подводом теплоты, который является теоретическим циклом современного бескомпрессорного дизеля.

3 Изобразить общий вид индикаторной диаграммы дизеля с указанием тактов рабочего процесса: наполнение (впуск), сжатие и первая фаза сгорания, вторая фаза сгорания и расширение (рабочий ход), выпуск.

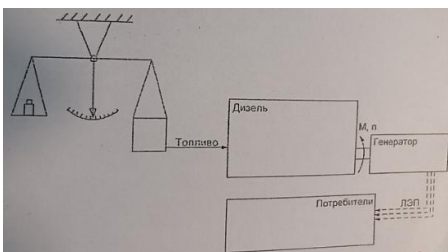


Рисунок 3.6 – Структурная схема установки для исследования работы учебного дизеля

4 Кратко описать опытную установку с указанием марки дизеля, тактности, диаметра цилиндра и хода поршня, степени сжатия, номинальной эффективной мощности, фаз газораспределения на номинальном режиме, удельного эффективного расхода топлива и КПД на режиме полной мощности.

5 Привести структурную схему опытной установки для исследования работы дизеля (рисунок 3.6).

6 Подготовить таблицу для опытных данных:

Режимы	Нагрузка генератора		Частота вращения коленвала дизеля n_1 , об/мин	Масса сожжённого дизельного топлива m , г	Продолжительность работы дизеля τ , мин
	Сила тока I_f , А	Напряжение U_f , В			

7 После пуска дизеля и его прогрева дать нагрузку на генератор и в течение 5–10 минут на заданной нагрузке (холостой ход; 0,25 номинального режима; 0,5; 0,75 и 1,0 номинального режима) дать поработать дизелю и снять показания амперметра, вольтметра, весов и секундомера.

8 Обработать опытные данные по следующей методике:

- нагрузка генератора переменного тока, кВт, $- N_g = 0,003 I_{\phi} / U_{\phi}$;
- эффективная мощность ДВС, кВт, $- N_e = N_g / \eta_r$, где η_r – КПД генератора;
- степень загрузки ДВС $f = N_e / N_n$, где N_n – номинальная мощность ДВС;
- часовой расход топлива, кг/ч, $B_q = m / \tau$;
- удельный расход топлива, кг/(кВт·ч), $b_e = B_q / N_e$;
- эффективный КПД дизеля $\eta_e = 3600 / (b_e Q_n^p)$, где Q_n^p – низшая теплота

сгорания дизельного топлива, кДж/кг, $Q_n^p = 42500$.

9 Результаты расчёта занести в таблицу:

Режимы	Эффективная мощность дизеля N_e , кВт	Степень загрузки дизеля f	Часовой расход топлива B_q , кг/ч	Удельный эффективный расход топлива b_e , кг/(кВт·ч)	Эффективный КПД η_e

10 Записать расчёт одного из режимов испытания ДВС.

11 Построить графики зависимостей $b_e = f(f)$ и $\eta_e = f(f)$.

12 Сделать краткий анализ результатов испытаний дизельного ДВС.

Контрольные вопросы

1 Теоретический цикл дизельного ДВС (цикл со смешанным, т. е. изохорно-изобарным подводом теплоты).

2 Что оценивает индикаторный КПД дизельного ДВС?

3 Что учитывает механический КПД дизельного ДВС?

4 Какой из ДВС эффективнее – бензиновый или дизельный?

5 Какое топливо требует большей степени сжатия для самовоспламенения – бензин или дизельное топливо?

6 В чём достоинства дизельных ДВС?

7 Какое значение максимального КПД имеют лучшие образцы дизельных ДВС?

8 Почему мощность тепловозных ДВС меньше судовых?

9 Основные технические характеристики тепловозных дизелей.

10 Что такое наддув в ДВС?

11 Какие цели преследует наддув в дизелях?

12 Принцип действия двухтактных дизелей.

13 Принцип действия четырёхтактных дизелей.

14 Назначение кривошипно-шатунного механизма в дизелях.

15 Составляющие теплового баланса дизеля.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

4.1 Основной закон теплопроводности

Теплопроводность (кондукция) – это процесс распространения теплоты внутри тела путём взаимного соприкосновения частиц. При этом кинетическая энергия более нагретых молекул передаётся более холодным. Следовательно, *теплопроводность – это теплопередача на микроуровне.*

Как показывает опыт, величина теплового потока, переданного путём теплопроводности, зависит от физических свойств тела и от температурных условий.

Изучая процесс теплопроводности в твёрдых телах, французский математик Фурье экспериментально установил зависимость, которая носит его имя.

По закону Фурье

$$dQ_{\tau} = -\lambda dF \text{grad } t d\tau, \quad (4.1)$$

где dQ_{τ} , dF и $d\tau$ – соответственно элементарный тепловой поток, площадь и время;

$\text{grad } t$ – градиент температуры для плотности теплового потока q .

Но учитывая понятия процессов теплопередачи, получим

$$q = -\lambda \text{grad } t, \quad (4.2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·К). Значение коэффициента λ берётся из справочных таблиц. Знак минус «–» в формуле (4.2) указывает на то, что плотность теплового потока противоположна вектору градиента температуры.

Обобщая имеющиеся данные по значениям λ , можно заключить следующее. Величина λ несколько изменяется с изменением температуры тела. Причём для металлов (кроме алюминия) значение λ несколько убывает, т. е. холодный металл проводит теплоту лучше, чем нагретый. Теплопроводность металлов λ составляет 2,3–420 Вт/(м·К). Самым теплопроводным металлом является серебро ($\lambda \approx 420$ Вт/(м·К)), затем идут чистая медь ($\lambda \approx 390$ Вт/(м·К)), золото ($\lambda \approx 310$ Вт/(м·К)) и алюминий ($\lambda \approx 210$ Вт/(м·К)).

Для большинства капельных жидкостей теплопроводность в пределах 0,09–0,7 Вт/(м·К) и с повышением температуры уменьшается. Вода является исключением: с ростом температуры от 0 до 150 °С теплопроводность возрастает, а при дальнейшем увеличении температуры уменьшается.

Для газов с увеличением температуры теплопроводность возрастает и колеблется от 0,006 до 0,6 Вт/(м·К).

Если рассмотреть теплопроводность дерева и древесных опилок, величина λ в среднем составляет 0,25–0,30 Вт/(м·К) и 0,07 Вт/(м·К) для разных пород дерева, т. е. опилки также могут служить теплоизолятором.

Здесь снижение теплопроводности объясняется наличием воздуха, для которого $\lambda = 0,026$ Вт/(м·К) (сухой воздух при $P = 0,1$ МПа и $t = +20$ °С).

Коэффициент теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов лежит в пределах 0,02–3,0 Вт/(м·К). Для строительных материалов существенное значение имеют пористость и влажность. Понятно, что с увеличением пористости их λ уменьшается, т. к. поры заполняются воздухом. Однако с увеличением температуры теплопроводность их возрастает. Это объясняется тем, что большинство изоляционных материалов не представляют монолитной массы, а являются пористыми телами. Воздушные прослойки уменьшают теплопроводность, но лучистый теплообмен, происходящий в этих прослойках, в итоге увеличивает суммарный теплоперенос при повышении температуры пористого тела.

На теплопроводность изоляционных и строительных материалов большое влияние оказывает влажность. Для влажного материала теплопроводность выше, чем для сухого материала и воды, взятых в отдельности. Например, для сухого строительного кирпича $\lambda = 0,3$ Вт/(м·К), для воды $\lambda = 0,6$ Вт/(м·К) (при $t = +20$ °С), а для влажного кирпича $\lambda = 1,05$ Вт/(м·К). Объясняется это тем, что адсорбированная в кирпичных порах вода отличается по физическим свойствам от свободной воды.

В настоящее время самыми эффективными теплоизоляционными материалами являются газонаполненные полимеры: пенополистирол ($\lambda = 0,017...0,035$ Вт/(м·К) и пенополиуретан ($\lambda = 0,038...0,041$ Вт/(м·К)).

4.2 Дифференциальное уравнение теплопроводности

Пусть имеем изотропное тело, характеризуемое постоянными значениями плотности ρ , теплоёмкости c и теплопроводности λ , и рассмотрим в нём процесс распространения теплоты путём теплопроводности.

Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье имеет следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t, \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t, \quad (4.3)$$

где a – температуропроводность;

$$\nabla^2 t \text{ – оператор Лапласа, } \nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2};$$

Это уравнение устанавливает связь между временными и пространственными изменениями температуры тела.

В случае стационарного режима $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ уравнение теплопроводности упрощается и имеет вид $\nabla^2 t = 0$.

При решении задач теплопроводности, когда распространение теплоты происходит в плоских поверхностях, оператор Лапласа удобно записывать декартовой системе, но при распространении теплоты теплопроводностью в трубах, валах и других цилиндрических телах, следует использовать цилиндрическую систему координат, в которой заменяются переменные $x = r \cos \varphi$ и $y = r \sin \varphi$.

В цилиндрической системе координат оператор Лапласа имеет вид

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}. \quad (4.4)$$

Когда рассматривается одномерное стационарное поле, т. е. когда перенос в направлении только одной из осей (например, оси x), дифференциальное уравнение теплопроводности значительно упрощается:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0. \quad (4.5)$$

Отсюда следует, что характер стационарного температурного поля в твёрдом теле не зависит от теплопроводности материала (в формуле отсутствует λ материала).

4.3 Теплопроводность плоской стенки

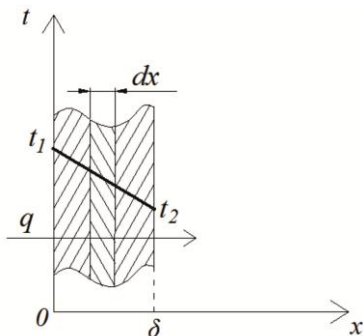


Рисунок 4.1 – График изменения температуры в однородной плоской стенке

Стенки кузова локомотивов, вагонов, зданий производственных цехов и административных корпусов являются плоскими, и теплопроводность их сравнительно легко рассчитывается. Приведём пример такого теплообмена.

4.3.1 Однородная плоская стенка

Рассмотрим однородную стенку толщиной δ (рисунок 4.1), материал которой имеет постоянный коэффициент теплопроводности λ . На наружных поверхностях стенки поддерживаются постоянные температуры t_1 и t_2 , причём температура стенки изменяется только по толщине и не изменяется по высоте и ширине.

Температурное одномерное стационарное поле определяется формулой, причём температура в каждой стенке зависит только от расстояния X , поэтому получим следующее дифференциально уравнение:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0. \quad (4.6)$$

Решим полученное уравнение.

$dt / dx = A$, причём $dt / dx = \text{grad } t$.

Тогда $t = Ax + B$.

Найдём величину A и B из начальных условий:

– если $x = 0$, $t = t_r = B$;

– если $x = \delta$, $t = t_2 = A\delta + t_1$, тогда $A = \frac{t_2 - t_1}{\delta}$, а распределение температуры

в стенке определяется уравнением $t = t_1 - \frac{t_2 - t_1}{\delta} x$, т. е. уравнением прямой.

Следовательно, изменение температуры по толщине стенки подчиняется прямолинейному закону.

Но уравнение Фурье для рассматриваемого случая имеет вид

$$q = -\lambda \text{grad } t = -\lambda \frac{dt}{dx}. \quad (4.7)$$

Ранее было определено, что $A = \text{grad } t = \frac{t_2 - t_1}{\delta}$, следовательно,

$$q = \lambda (t_1 - t_2) / \delta. \quad (4.8)$$

Обозначим $\delta / \lambda = R_\lambda$ и назовём термическим сопротивлением теплопроводности, а $t_1 - t_2 = \Delta t$ – температурным напором. Тогда получим

$$q = \frac{\Delta t}{R_\lambda}. \quad (4.9)$$

Сравнивая полученную формулу с законом Ома, видим их похожесть. Действительно, перенос теплоты и электричества есть перенос энергии. Удельный тепловой поток пропорционален температурному градиенту, а удельный поток электричества пропорционален градиенту электрического потенциала.

4.3.2 Многослойная стенка

Стенки, состоящие из нескольких разнородных слоёв, называются многослойными. Например, стенка кузова пассажирского вагона многослойная и состоит из стальной наружной обшивки, теплоизолятора (например, пено-

полистирола), клееной фанеры и декоративного пластика. Стены зданий, в которых на основном бетонном или кирпичном слое с одной стороны имеется внутренняя штукатурка, с другой – внешняя облицовка, имеют тепловую изоляцию.

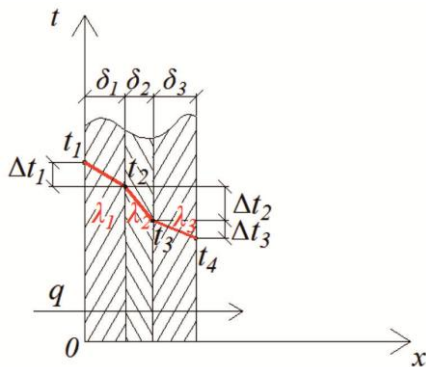


Рисунок 4.2 – График изменения температуры в трёхслойной плоской стенке

Пусть стенка состоит из трёх разнородных, но плотно прилегающих друг к другу слоёв (рисунок 4.2). Применим уравнение (4.9) к каждому слою:

$$q_1 = \Delta t_1 / R_{\lambda 1}, q_2 = \Delta t_2 / R_{\lambda 2}, q_3 = \Delta t_3 / R_{\lambda 3}.$$

Поскольку тепловой поток для всех слоёв одинаков, $q_1 = q_2 = q_3 = q$, то, следовательно, полный температурный напор для всех слоёв стенки

$$t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = t_1 - t_4. \quad (4.10)$$

Общее термическое сопротивление трёхслойной плоской стенки

$$R_{\lambda} = R_{\lambda 1} + R_{\lambda 2} + R_{\lambda 3} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} = \sum_1^3 \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \quad (4.11)$$

Тепловой поток для многослойной плоской стенки определяется формулой

$$q = (t_1 - t_4) / \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (4.12)$$

где n – число слоёв;

λ_i – теплопроводность i -го слоя.

Общее количество теплоты, проходящей через многослойную стенку с поверхностью F за время τ ,

$$q = (t_1 - t_4) / \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i},$$

$$Q_{\tau} = qF\tau = \Delta qF\tau / \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \quad (4.13)$$

4.4 Теплопроводность цилиндрической стенки

Цилиндрическая втулка ДВС, например, тепловозного дизеля Д49, представляет собой стальной цилиндр для нового дизеля, а для находящегося в эксплуатации тот же цилиндр может быть с внутренним слоем сажи и наружным слоем накипи.

4.4.1 Однородная цилиндрическая стенка

Найдём распределение температуры по толщине цилиндрической стенки и поверхностную плотность теплового потока для однородной цилиндрической стенки (рисунок 4.3).

Воспользуемся выражением оператора Лапласа в цилиндрических координатах. В результате имеем

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (4.14)$$

Будем считать, что в связи с равномерным подводом и отводом теплоты температура на внутренней поверхности в любом месте равна t_1 , а на наружной поверхности – t_2 . При этих упрощениях $\partial t / \partial z = 0$, а ввиду симметрии температурного поля относительно любого диаметра $\partial t / \partial \varphi = 0$.

Таким образом, при условии $\partial t / \partial \tau = 0$ (температурное поле стационарное) получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} = 0. \quad (4.15)$$

Зависимость температуры цилиндрической стенки

$$t = A \ln r + B, \quad (4.16)$$

где A и B – постоянные интегрирования.

Следовательно, кривая распределения температур по толщине стенки является логарифмической кривой.

Определим постоянные A и B , исходя из начальных условий. Эти условия являются граничными условиями первого рода, т. е. в данном случае распределение температуры по толщине стенки в любой момент времени неизменно.

$$A = (t_2 - t_1) / \ln (r_2 / r_1),$$

$$B = t_1 + (c) / \ln (r_2 / r_1).$$

Тогда уравнение произвольного температурного слоя примет вид

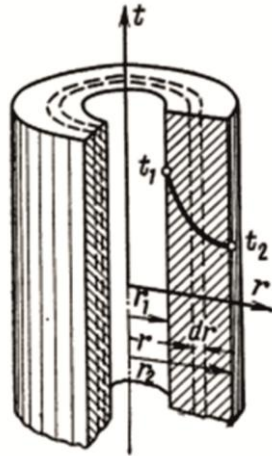


Рисунок 4.3 – Однородная цилиндрическая стенка

$$t = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r}{r_1}. \quad (4.17)$$

Для цилиндрической стенки удобно использовать линейную плотность теплового потока, т. е. тепловой поток, проходящий через участок цилиндрической поверхности длиной l ,

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{qF}{l}. \quad (4.18)$$

Следовательно, для однородной однослойной цилиндрической поверхности линейная плотность теплового потока

$$q_l = 2\pi\lambda \frac{t_1 - t_2}{\ln(d_2 / d_1)}. \quad (4.19)$$

Из формулы (4.19) следует, что тепловой поток, проходящий сквозь участок цилиндрической поверхности длиной 1 м, зависит от соотношения наружного d_2 и внутреннего d_1 диаметров, а не от толщины стенки.

4.4.2 Многослойная цилиндрическая стенка

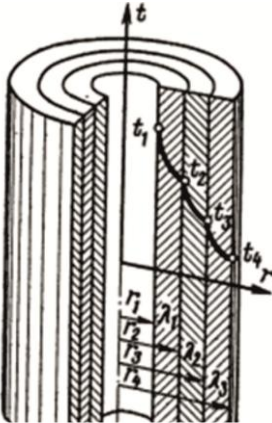


Рисунок 4.4 – Трёхслойная цилиндрическая стенка

Рассмотрим распространение теплоты теплопроводностью в трёхслойной цилиндрической стенке (рисунок 4.4).

Известны температуры внутренней t_1 и внешней t_4 поверхностей трёхслойной цилиндрической стенки, имеющей внутренний d_1 и наружный d_4 диаметры. Промежуточные диаметры отдельных слоёв – d_2 и d_3 , теплопроводности слоёв – λ_1 , λ_2 , λ_3 . При стационарном тепловом режиме через все слои проходит одно и то же количество теплоты. Следовательно, справедлива следующая система уравнений:

$$\begin{cases} q_l = 2\pi\lambda_1(t_1 - t_2) / \ln(d_2 / d_1) \\ q_l = 2\pi\lambda_2(t_2 - t_3) / \ln(d_3 / d_2) \\ q_l = 2\pi\lambda_3(t_3 - t_4) / \ln(d_4 / d_3) \end{cases} \quad (4.20)$$

Решая эти уравнения относительно разностей температур, а затем почленно складывая,

получим

$$t_1 - t_2 = \frac{q_l}{2\pi} \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3} \right). \quad (4.21)$$

Расчётное выражение для определения линейной плотности теплового потока для трёхслойной цилиндрической стенки имеет вид

$$q_l = 2\pi(t_1 - t_4) / \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3} \right) \quad (4.22)$$

Обобщим уравнение на n -слойную стенку цилиндрической трубы и получим

$$q_l = 2\pi(t_1 - t_{n+1}) / \sum_1^n \left(\frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right), \quad (4.23)$$

где i – порядковый номер слоя.

Величина теплового потока через n -слойную цилиндрическую стенку определяется следующей формулой:

$$Q = 2\pi l(t_1 - t_{n+1}) / \sum_1^n \left(\frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right). \quad (4.24)$$

Заметим, что $d_2 / d_1 < 2$, толщина стенки (слоя) по сравнению с диаметром мала, то есть если d_2 / d_1 близко к единице, влиянием кривизны стенки можно пренебречь.

На практике часто к расчёту теплопроводности через цилиндрическую стенку приближенно применяют формулы для плоской стенки. В частности, цилиндрическую втулку ДВС с внутренним слоем сажи, образующейся при сгорании топлива, и с наружным слоем накипи, образующейся при охлаждении плохо очищенной водой цилиндрической гильзы, можно упрощённо рассматривать как трёхслойную плоскую стенку.

4.5 Опытное определение теплопроводности изоляционного материала

Для определения теплопроводности изоляционного материала необходимо выполнить следующие действия.

1 Ознакомиться с основами теории теплопроводности и определением теплопроводности цилиндрической стенки.

2 Изобразить на рисунке в цилиндрических координатах распределение температуры по толщине цилиндрической стенки.

3 Записать формулу для определения теплового потока через цилиндрическую стенку:

$$Q = 2\pi\lambda \frac{(t_1 - t_2)l}{\ln(d_2 / d_1)},$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала цилиндрической стенки, Вт/(м·К);

t_1, t_2 – соответственно температура внутреннего и наружного диаметров стенки, °С;

l – длина цилиндра, м;

d_1, d_2 – соответственно внутренний и наружный диаметры цилиндрической стенки, м.

4 Изобразить схему опытной установки для определения теплопроводности изоляционного материала по методу «трубы».

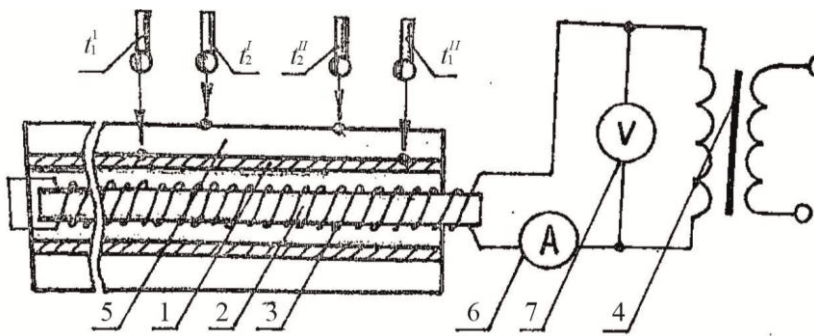


Рисунок 4.5 – Схема опытной установки для определения коэффициента теплопроводности методом «трубы»

5 Кратко описать установку для экспериментального определения теплопроводности изоляционного материала по методу «трубы».

Основной частью установки является стальная труба 1, к торцам которой приварены фланцы, а внутри установлен нагреватель 2 мощностью 0,5 кВт при напряжении 220 В. Нихромовая проволока 3 нагревателя диаметром 0,5 мм намотана на фарфоровую трубу диаметром 38 мм. Нагреватель включается через ЛАТР 4, что позволяет регулировать количество выделяемой теплоты и изменять температурный режим. Материал 5 (90 % асбеста и 10 % цемента), теплопроводность которого определяется, уложен на поверхность стальной трубы между фланцами. Длина цилиндра из исследуемого материала $l = 1,05$ м. Внутренний диаметр $d_1 = 0,08$ м, наружный – $d_2 = 0,12$ м. Температура наружного (t_1^I, t_1^{II}) и внутреннего (t_2^I, t_2^{II}) слоёв материала расстояние между которыми 20 мм, замеряется при помощи ртутного термометра.

Количество теплоты, выделяемое в нагревателе, определяют по показаниям амперметра 6 и вольтметра 7. Тепло от нагревателя в стационарных условиях эксперимента будет передаваться через поверхность исследуемого материала в окружающую среду. Теплоотдачей через торцовые поверхности трубы можно пренебречь.

6 Подготовить таблицу для опытных данных:

Номер опыта	Сила тока I , А	Электрическое напряжение U , В	Температура внутреннего слоя, °С		Температура внутреннего слоя, °С	
			t_1^I	t_1^{II}	t_2^I	t_2^{II}

7 Проверить правильность включения электрических приборов (амперметра и вольтметра), установить стрелки приборов на нуль.

Включить лабораторную установку и при минимальном значении тока (0,5–1,0 А) дождаться установившегося режима теплопередачи, когда теплота, выделившаяся при прохождении электрического тока по нихромовой спирали, стабилизировалась. Таким образом, на исследуемый теплоизоляционный материал затрачено количество теплоты, которое рассеивается в окружающую среду – наступает баланс.

8 При установившемся режиме (режим 1) заполнить таблицу опытных данных. Аналогичные замеры произвести при других значениях силы тока (число замеров определяет преподаватель).

9 Обработать опытные данные по следующей методике:

– мощность теплового потока $Q = IU$;

– средняя температура внутреннего слоя теплоизоляционного материала $t_1^I = (t_1^I + t_1^{II}) / 2$;

– средняя температура наружного слоя теплоизоляционного материала $t_2^I = (t_2^I + t_2^{II}) / 2$;

– средняя температура теплоизоляционного материала $t_{cp} = (t_1 + t_2) / 2$;

– коэффициент теплопроводности исследуемого теплоизоляционного материала, Вт/(м·К),

$$\lambda = \frac{Q \ln(d_2/d_1)}{2\pi(t_1 - t_2)}.$$

10 Расчётные данные занести в таблицу:

Номер опыта	Q , Вт	t_1 , °С	t_2 , °С	t_{cp} , °С	λ , Вт/(м·К)

11 Записать расчёт одного из опытов.

12 Построить график зависимости $\lambda = f(t)$.

13 Сделать краткий анализ полученных результатов.

Контрольные вопросы

1 Запишите закон Фурье для теплопроводности твёрдых тел.

2 Укажите диапазон теплопроводности металлов, жидкостей и газов.

3 Какие современные теплоизоляционные материалы являются самыми эффективными?

4 Запишите уравнение теплопроводности плоской однородной и многослойной стенок.

5 Запишите уравнение теплопроводности цилиндрической стенки.

6 Объясните внутренний механизм теплопроводности на основе молекулярно-кинетических представлений.

7 Какое температурное поле называется нестационарным (неустановившимся), а какое стационарным (установившимся)?

8 Что называется градиентом температурного поля в теле?

9 Куда направлен вектор температурного градиента?

10 Что называется тепловым потоком и его обозначение?

11 Что называется плотностью теплового потока и его обозначение?

12 Напишите уравнение закона Фурье.

13 Назовите единицы измерения величин, входящих в уравнение Фурье.

5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

5.1 Общие понятия конвективного теплообмена

Конвекцией теплоты называют процесс переноса теплоты при перемещении макрочастиц газа или жидкости в пространстве из области с одной температурой в область с другой температурой. Таким образом, конвекция всегда связана с движением. В то же время конвективный перенос теплоты всегда в той или иной мере сопровождается переносом теплоты за счёт теплопроводности, которая обусловлена движением микрочастиц вещества.

Конвективный теплообмен между потоком газа или жидкости и поверхностью твёрдого тела (или другой жидкостью, газом) называют теплоотдачей.

Для практических расчетов теплоотдачи используют **закон Ньютона – Рихмана**:

$$Q = \alpha F (t - t_c), \quad (5.1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

F – площадь поверхности теплообмена, м²;

t – температура теплоносителя, т. е. температура жидкости или газа, °С;

t_c – температура поверхности стенки тела, °С.

В формуле теплота передается от жидкости к стенке, т. к. $t > t_c$. При $t < t_c$ жидкость воспринимает теплоту от более нагретой стенки. Разность температур жидкости и тела часто называют *температурным напором* и обозначают Δt . Для плотности теплового потока при теплоотдаче можно записать

$$q = \alpha \Delta t. \quad (5.2)$$

Коэффициент теплоотдачи α в отличие от теплопроводности λ не является величиной, характеризующей материал, которую можно определить по теплотехническим таблицам, а зависит от большого числа различных факторов, в том числе от причины движения жидкости (свободная или вынужденная конвекция), формы и размеров тела, режима течения жидкости (ламинарный, переходный или турбулентный) и ее теплофизических свойств, скорости и направления потока, наличия фазовых переходов. В общем случае коэффициент теплоотдачи α описывается следующей функциональной зависимостью:

$$\alpha = f(t, t_c, \rho, \mu, \lambda, c_p, \vartheta, \Phi, X, l), \quad (5.3)$$

где ρ – плотность теплоносителя;
 μ – динамическая вязкость;
 g – скорость теплоносителя;
 Φ – форма тела;
 X – характер движения теплоносителя;
 l – геометрические размеры.

Различают два рода движения жидкости: свободное и вынужденное.

Свободным (естественным) называют движение жидкости, возникающее под действием разности плотностей неравномерно нагретых масс жидкости.

Вынужденным называют движение жидкости, возникающее под действием внешней силы (насоса, вентилятора, ветра, мешалки, любого побудителя).

Режим движения жидкости как при свободном, так и при вынужденном движении может быть спокойным (упорядоченным) или вихревым (неупорядоченным).

5.2 Режимы движения теплоносителя

Режим движения жидкости определяется в значительной степени скоростью движения. При малых скоростях движения возможен так называемый ламинарный режим движения жидкости.

При *ламинарном движении* жидкости отдельные слои жидкости, несмотря на различные скорости, не перемешиваются, а скользят друг по другу, течение струйное (рисунок 5.1, а).

При увеличении скорости отдельные слои жидкости при движении приобретают волнообразную форму, что соответствует переходному режиму течения (см. рисунок 5.1, б). При дальнейшем увеличении скорости отдельные слои жидкости начинают перемешиваться, движение жидкости становится волнистым неупорядоченным, вихревым. Этот режим движения жидкости называется **турбулентным** (см. рисунок 5.1, в).

Следует учитывать, что при турбулентности в так называемом пограничном слое движение жидкости ламинарное.

Переход движения жидкости из одного режима в другой определяется числом Рейнольдса

$$Re = \frac{wd}{\nu}, \quad (5.4)$$

где w – линейная скорость движения, м/с;

d – диаметр канала, м;

ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с.

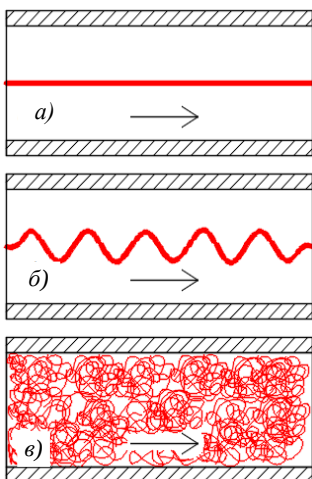


Рисунок 5.1 – Характер движения жидкости в трубе при ламинарном (а), переходном (б) и турбулентном (в) режимах

Здесь следует отметить, что число (критерий) Рейнольдса является безразмерным.

Переход ламинарного режима движения в турбулентный не определяется каким-либо одним значением числа Рейнольдса. Состояние перехода зависит от многих параметров, определяющих физические свойства жидкости, а также от геометрических размеров канала.

Установлено, например, что при $Re < 1900 \dots 2000$ движение в гладких круглых трубах будет ламинарным, при $Re > 12000 \dots 13000$ – турбулентным. Но и в гладких круглых трубах при плавном входе жидкости в трубу и устранении возможных возмущений потока ламинарный режим течения возможен при $Re = 40000$, а иногда и при $Re = 50000$. При расчётах теплообмена в трубах принимают ламинарный режим при $Re < 2200$ и турбулентный режим при $Re > 10000$. Зона изменения числа Re от устойчивого ламинарного режима до устойчивого турбулентного режима называется *переходной зоной*.

Температура потока у стенки канала значительно отличается от средней температуры потока. Это можно объяснить, рассматривая структуру турбулентного потока (рисунок 5.2). При любом виде турбулентности в тонком пристенном слое из-за наличия вязкого трения течение жидкости затормаживается и скорость падает до нуля. Этот слой принято называть *пограничным (вязким) подслоем*. При движении потока жидкости вдоль поверхности теплообмена на ней из-за действия сил вязкости образуется слой заторможенной жидкости, в котором скорость движения изменяется от нуля (непосредственно на поверхности) до скорости невозмущённого потока (вдали от поверхности).

Для процессов теплоотдачи режим движения теплоносителя (рабочей жидкости) имеет очень большое значение, т. к. им определяется механизм переноса теплоты.

При ламинарном режиме перенос теплоты в направлении нормали к стенке русла (например, цилиндрической трубы) в основном осуществляется путём теплопроводности.

При турбулентном режиме такой способ переноса сохраняется лишь в вязком подслое, а внутри турбулентного ядра перенос теплоты осуществляется путём интенсивного перемешивания частиц жидкости.

В этих условиях для газов и обычных жидкостей интенсивность теплоотдачи в основном определяется термическим сопротивлением пристенного слоя, которое, по сравнению с термическим сопротивлением ядра потока, оказывается определяющим.

Наибольшее изменение температуры происходит в пределах тонкого слоя (на рисунке 5.2 его толщина обозначена δ) у

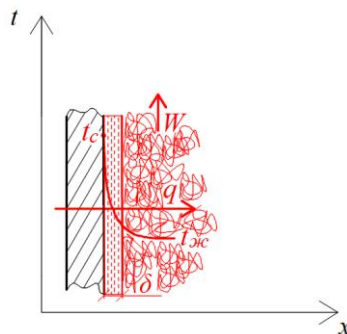


Рисунок 5.2 – Характер изменения температуры при нагревании жидкости стенкой

поверхности, через который теплота передаётся путём теплопроводности. Следовательно, при теплоотдаче большое термическое сопротивление объясняется тем, что в пограничном (ламинарном) слое теплообмен осуществляется теплопроводностью. А теплопроводность жидкостей или газов (теплоносителей) очень мала. Поясним это на примере.

При свободном конвективном теплообмене при движении воздуха коэффициент теплоотдачи может быть равным $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Определим толщину плоской стенки, которая имеет то же термическое сопротивление при одинаковой плотности теплового потока.

При конвективном теплообмене (теплоотдаче)

$$q = \alpha \Delta t = \Delta t / R_\alpha, \quad (5.5)$$

где R_α – термическое сопротивление при свободной воздушной конвекции, $R_\alpha = 1/\alpha$.

При передаче теплоты путём теплопроводности стальной плоской стенки

$$q = \Delta t / R_\lambda, \quad (5.6)$$

где R_λ – термическое сопротивление теплопроводности, $R_\lambda = \delta_{\text{ст}} / \lambda_{\text{ст}}$; для стали $\alpha \approx 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Но $q = \text{idem}$, поэтому получим $\delta_{\text{ст}} / \lambda_{\text{ст}} = \frac{1}{\alpha}$; $\delta_{\text{ст}} = \lambda_{\text{ст}} / \alpha$, но $\alpha_{\text{ст}} = 20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Значит, теплопроводность стальной пластины толщиной 2,5 м оказывает такое же термическое сопротивление тепловому потоку, как и теплоотдача при свободном воздушном конвективном теплообмене. Следовательно, теплоотдача характеризуется большим термическим сопротивлением. При этом чем меньше толщина теплового пограничного слоя, тем более интенсивно протекает теплоотдача.

5.3 Дифференциальное уравнение конвективного теплообмена

Конвективный теплообмен является сложным явлением, в котором определяющие величины меняются во времени и в пространстве, и установить зависимость между переменными, характеризующими это явление, очень трудно. В таких случаях, применяя общие законы физики, ограничиваются установлением связи между переменными, которая охватывает небольшой промежуток времени и элементарный объём пространства.

Полученная таким образом зависимость является общим дифференциальным уравнением рассматриваемого процесса. Такие дифференциальные уравнения могут быть составлены для процесса конвективного теплообмена, т. е. процесса теплоотдачи.

Поскольку теплоотдача определяется не только тепловыми, но и гидродинамическими явлениями, то она описывается системой, в которую входят:

– дифференциальное уравнение теплообмена;

- дифференциальное уравнение теплопроводности;
- дифференциальное уравнение движения;
- дифференциальное уравнение сплошности.

Для определения количества теплоты Q , переданного от жидкости к стенке или, наоборот, от стенки к жидкости, используется уравнение Ньютона – Рихмана. Условия теплообмена характеризуются коэффициентом теплоотдачи α . Поэтому

$$dQ = \alpha \Delta t dF. \quad (5.7)$$

С другой стороны, теплота передаётся через ламинарный пограничный слой жидкости путём теплопроводности, т. е. согласно закону Фурье имеем

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF. \quad (5.8)$$

Приравнявая данные выражения, получим

$$\alpha = -\frac{\lambda}{\Delta t} \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (5.9)$$

Это выражение принято называть **дифференциальным уравнением теплообмена**. Оно описывает процесс теплоотдачи на границах нагреваемого (охлаждаемого) тела.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (энергии) описывает температурное поле в движущейся жидкости. Пренебрегая выделяющейся за счёт трения теплотой, и полагая, что жидкость несжимаема, однородна и в ней отсутствуют внутренние источники теплоты, получаем

$$\frac{dt}{d\tau} = a \nabla^2 t. \quad (5.10)$$

Здесь $dt/d\tau$ – полное изменение температуры элемента движущейся жидкости, которое является следствием двух явлений: изменения во времени и изменения вследствие перемещения элемента из одной точки пространства в другую. Но на основании понятия о полной производной функции многих переменных $t = f(\tau, x, y, z)$ можно записать

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} \frac{dx}{d\tau} + \frac{\partial t}{\partial y} \frac{dy}{d\tau} + \frac{\partial t}{\partial z} \frac{dz}{d\tau}, \quad (5.11)$$

где $\frac{dx}{d\tau} = w_x$, $\frac{dy}{d\tau} = w_y$, $\frac{dz}{d\tau} = w_z$.

Поэтому в развёрнутом виде можно представить

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (5.12)$$

Здесь $\partial t / \partial \tau$ – локальное изменение температуры; $w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z}$ –

конвективное изменение температуры.

Выражение (5.1) и есть **дифференциальное уравнение теплопроводности в движущихся жидкостях (энергии)** Фурье – Кирхгофа. Оно устанавливает связь между временными и пространственными изменениями температуры в любой точке движущейся среды.

В общем случае из гидродинамики известно, что для трёхмерного движения жидкости поле скоростей описывается тремя уравнениями, каждое – соответственно в проекциях на осях x, y, z (уравнения Навье – Стокса), которые имеют вид

$$\begin{cases} \frac{dw_x}{d\tau} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 w_x \\ \frac{dw_y}{d\tau} = g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 w_y \\ \frac{dw_z}{d\tau} = g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w_z \end{cases} \quad (5.13)$$

Здесь изменения проекций скорости w_x, w_y, w_z состоят из изменений во времени и изменений вследствие перемещения жидкости, т. е. $t = f(\tau, x, y, z)$, а $x = \varphi_1(\tau), y = \varphi_2(\tau), z = \varphi_3(\tau)$.

Система уравнений (5.2) является **дифференциальным уравнением движения**.

Эта система уравнений справедлива как для ламинарного, так и для турбулентного движения. При свободном движении сила давления $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z} = 0$, а вместо одиночной силы тяжести будет использована единичная подъёмная сила, определяемая разностью плотностей нагретых и холодных жидкостей.

В уравнении движения есть величина давления p , изменение которой зависит от положения в движущейся жидкости. Следовательно, новое неизвестное привело к незамкнутости системы всех приведённых уравнений, т. к. число неизвестных стало больше числа уравнений. Присоединим ещё одно – **уравнение сплошности (неразрывности) потока**:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = 0. \quad (5.14)$$

Для несжимаемых капельных жидкостей $\rho = \text{const}$. В этом случае уравнение (5.14) примет вид

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0. \quad (5.15)$$

Приведённая система дифференциальных уравнений даёт математическое описание механизма конвективного теплообмена и имеет бесчисленное множество решений.

Чтобы выделить из этого класса явлений данное конкретное явление, необходимо дополнить систему уравнений математическим описанием всех частных особенностей этого явления – условиями однозначности.

Условия однозначности или краевые условия, состоят:

- из *геометрических условий*, которые характеризуют форму и размеры поверхности тела, омываемого теплоносителем;
- *физических условий*, характеризующих физические свойства среды и тела, которые входят в дифференциальные уравнения, описывающие данный процесс конвективного тепла обмена;
- *граничных условий*, характеризующих условия протекания теплообменного процесса на границах тела;
- *временных условий*, которыми формулируются особенности протекания теплообменного процесса.

Например, рассматривается случай теплоотдачи при движении в трубе. В этом случае могут быть заданы такие условия однозначности:

- труба круглая, гладкая, диаметр трубы d и длина ее l ;
- теплоносителем является вода, имеющая следующие физические параметры: λ , c , v , ρ . Указано, что зависимостью этих параметров от температуры можно пренебречь;
- температура стенки t_c , скорость теплоносителя w .

Для стационарных процессов временные условия однозначности отпадают. В данном пособии рассматривается только стационарный режим.

Однако приведенная выше система дифференциальных уравнений, состоящая из шести уравнений, дополненная условиями однозначности, как правило, не интегрируема без существенных упрощений, а решения, полученные после таких упрощений, в весьма малой степени могут быть использованы для расчёта теплообмена в технических задачах. Поэтому основным способом решения конвективного теплообмена является эксперимент.

5.4 Опытное определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции для вертикальной поверхности

Для определения коэффициента теплоотдачи необходимо выполнить следующие действия.

1 Ознакомиться с основами теории конвективного теплообмена и определением коэффициента теплоотдачи.

2 Записать формулу Ньютона – Рихмана для определения теплового потока при теплоотдаче:

$$Q = \alpha F (t_c - t_o), \quad (5.16)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

F – площадь поверхности теплоотдачи, м²;

t_c, t_o – соответственно температура охлаждаемого тела (струны) и окружающего воздуха, °С.

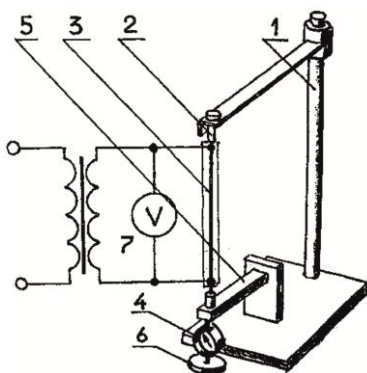


Рисунок 5.3 – Схема установки для определения коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции

3 Изобразить схему экспериментальной установки для определения коэффициента теплоотдачи вертикальной поверхности при свободной конвекции (рисунок 5.3).

4 Кратко описать опытную установку для определения коэффициента теплоотдачи вертикальной поверхности при свободной конвекции.

Экспериментальная установка (рисунок 5.3) состоит из кронштейна 1, в верхней части которого, в держателе 2, изолированном от массы кронштейна, закреплён один конец струны 3 из никрома. Другой конец струны зажат в головке микрометра 4, закрепленного в держателе 5. Струна изолирована от окружающей среды стеклянной трубкой. Груз 6 обеспечивает постоянное по величине натяжение струны. Электрический ток от сети через ЛАТР 7 подводится к держателю 2 и головке микрометра 4. В ходе выполнения работы мы наблюдаем следующее:

- в результате прохождения электрического тока по струне она нагревается и удлиняется до тех пор, пока теплоотдача в окружающую среду не стабилизируется;

- удлинение струны измеряется микрометром;

- теплоотдача струны в окружающую среду происходит двумя путями: конвекцией и излучением.

Температура окружающей среды определяется термометром в помещении.

5 Подготовить таблицу для опытных данных:

Номер опыта	Температура окружающей среды t_o , °С	Диаметр струны d_o , м	Начальная длина струны l_o , м	Удлинение струны Δl , м	Сила тока I , А	Напряжение U , В

6 При установившемся режиме заполнить таблицу из опытных данных для ответа 1.

Аналогичные замеры произвести при других значениях тока и напряжения (число замеров определяет преподаватель).

7 Обработать опытные данные по следующей методике:

- мощность теплового потока $Q = IU$;
 - избыточная температура нихромовой струны $\Delta t = \Delta l / (\beta_l l_0)$.
- где β_l – коэффициент линейного расширения нихрома, $\beta_l = 14 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$;
- температура нагретой нихромовой струны $t_c = t_0 + \Delta t$;
 - площадь поверхности нихромовой струны $F_c = \pi d_0 l_0$ (ввиду небольшой погрешности при расчёте значение площади нихромовой струны неизменно), $l_0 = 1,65 \text{ м}$, $d_0 = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.
 - общий (суммарный) коэффициент теплоотдачи нихромовой струны $\alpha_{\Sigma} = Q / F \Delta t$;
 - коэффициент теплоотдачи за счёт излучения (лучистый теплообмен)

$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon C_0 [(T / 100)^4 - (T_0 / 100)^4], \quad (5.17)$$

где ε – степень черноты окисленной нихромовой струны, $\varepsilon = 0,64 \dots 0,76$;

C_0 – коэффициент излучения черного тела, $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

T, T_0 – температура соответственно струны и окружающей среды, К.

8 Расчётные данные занести в таблицу:

Номер опыта	Мощность теплового потока Q , Вт	Избыточная температура струны Δt_c , $^{\circ}\text{C}$	Температура струны t_c , $^{\circ}\text{C}$	Площадь охлаждения струны F_c , м^2	Общий коэффициент теплоотдачи струны α_{Σ} , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	Коэффициент теплоотдачи струны за счёт излучения $\alpha_{\text{л}}$, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	Коэффициент теплоотдачи струны α_c , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

9 Записать расчёт одного из опытов.

10 Построить график зависимости $\alpha_c = f(t_c)$.

11 Сделать краткий анализ полученных результатов.

Контрольные вопросы

- 1 Какой конвективный теплообмен называется теплоотдачей?
- 2 Запишите закон Ньютона – Рихмана для практических расчётов теплоотдачи.
- 3 От чего зависит значение коэффициента теплоотдачи?
- 4 Какие режимы движения жидкости различают?
- 5 Чем объяснить большое значение термического сопротивления при теплоотдаче?

6 СОСТАВЛЕНИЕ КРИТЕРИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

6.1 Основы теории подобия процессов теплообмена

Исследования, связанные с распределением тепловой энергии, базируются на трёх методах исследования физических явлений:

- метод инструментального эксперимента;
- метод аналитической физики;
- метод подобия.

Метод инструментального эксперимента позволяет получить точный результат, служит основой достоверности, но пригоден только для данного объекта и не обладает общностью результатов.

Метод аналитической физики даёт лишь приближённые результаты, которые не обладают нужной достоверностью.

Метод подобия – универсальный инструмент изучения и анализа процессов теплообмена, объединяющий методы экспериментально-инструментальной и математической физики. Этот метод исключает отрицательные стороны первых двух, однако пользоваться им нужно очень грамотно и осторожно.

Многочисленность факторов, влияющих на величину коэффициента теплоотдачи, и ограниченные возможности аналитического метода, не позволяют теоретическим путём обосновать выбор числовых значений α для тех или иных случаев. Поэтому исключительное значение получило экспериментальное изучение конвективного теплообмена. Этот метод, как указано выше, даёт достоверный результат только для данного объекта. Но объектов бесчисленное множество, следовательно, нужен метод, который позволит результаты, полученные из единичных опытов, путём математической обработки применить их для максимального числа аналогичных явлений. Распространение опытных результатов закономерно только на подобные явления.

Учение о подобных явлениях составляет предмет *теории подобия*.

Теория теплового подобия позволяет решить следующие вопросы:

- 1) какие величины подлежат измерению при опытном изучении теплообмена;
- 2) каким путем следует обрабатывать результаты экспериментов для получения общих формул;

3) какова область явлений, на которые могут быть распространены полученные зависимости.

Помимо геометрического подобия должно быть также подобие ряда других величин, характеризующих рассматриваемое физическое явление в целом.

В числе этих условий есть подобие времени (сопоставление должно производиться в сходственные моменты времени). Возможно подобие распределения температур, скоростей, сил и прочее. Обычно говорят «подобие температурных полей», если речь идет о подобном распределении температур в сходственных точках, аналогично – «подобие полей скорости» и т. д. Следовательно, однородные величины сопоставляются между собой в сходственных точках пространства и в сходственные моменты времени.

В общем случае для подобных явлений должно быть подобие всех величин, характеризующих явление. Чем сложнее физическое явление, тем большим числом величин оно характеризуется.

Сопоставление физических явлений следует производить при помощи комплексов, которые называются *критериями подобия*, так как зависят от целого ряда разнородных физических величин, или *инвариантами*. Критерии подобия – безразмерные числа. *Безразмерность – основное свойство критериев подобия*. Критерии подобия не могут выбираться произвольно. Если явления подобны, то физические величины, определяющие течение процесса, связаны между собой определёнными уравнениями, отражающими законы природы. Такими уравнениями для конвективного теплообмена дифференциальное уравнение теплообмена являются теплопроводности, движения и сплошности. Используя эти уравнения, можно получить безразмерные комплексы, составленные из величин, характеризующих это явление.

Теория подобия является теорией эксперимента. Теория подобия позволяет, не интегрируя дифференциальные уравнения, сделать на их основе ряд важных выводов, необходимых для научной обработки экспериментальных исследований.

В теории подобия физических величин есть три теоремы.

Первая теорема подобия: *у подобных явлений одноимённые критерии (числа) одинаковы.*

Критерии подобия всегда имеют определённый физический смысл. Их обычно обозначают начальными буквами фамилий учёных, работавших в соответствующих областях науки.

Число (критерий) Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{wl}{\nu}, \quad (6.1)$$

где w – скорость жидкости или газа;

l – характерный размер.

ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости;

Характеризует гидродинамический режим. Входящие в число Re силы вязкого трения, инерциальные силы, оказывают противоположное действие. Если преобладают силы вязкого трения, то оказывают тормозящее воздействие на движение жидкости (течение – ламинарное); если преобладают инерционные силы, возникают местные пульсации скорости, приводящие к пульсациям температуры, давления и других параметров процесса (течение – турбулентное).

Для подобных явлений конвективного теплообмена при вынужденном движении теплоносителя $Re = idem$.

Число (критерий) Грасгофа

$$Gr = \beta \frac{gl^3}{\nu^2} \Delta t, \quad (6.2)$$

где β – коэффициент объёмного расширения жидкости или газа, для газа $\beta = 1/T$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Число Gr характеризует взаимодействие сил молекулярного трения и подъёмной силы, обусловленной разностью плотностей в отдельных точках потока, при свободном движении жидкости или газа.

Число (критерий) Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (6.3)$$

где a – коэффициент температуропроводности, $a = \lambda / (c\rho)$.

Для подобных процессов конвективного теплообмена при вынужденном движении теплоносителя или при свободной конвекции $Pr = idem$.

Число (критерий) Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}, \quad (6.4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи теплоносителя.

Характеризует соотношение между конвективным переносом теплоты от жидкости (газа) к поверхности тела и переносом теплоты теплопроводностью через слой жидкости (газа).

Для подобных процессов конвективного теплообмена при вынужденном движении теплоносителя или при свободной конвекции $Nu = idem$.

Критерии, в которых содержатся величины, входящие в условия однозначности, называются *определяющими критериями (числами)*. Из приведённых к определяющим критериям относятся числа (критерии) Рейнольдса **Re**, Грасгофа **Gr** и Прандтля **Pr**.

Критерии, в которых содержатся искомые величины, называются *определяемыми критериями*. Например, число (критерий) Нуссельта **Nu** являет-

ся определяемым критерием, поскольку этот критерий содержит искомую величину коэффициента теплоотдачи α .

Вторая теорема теории подобия утверждает, что если физическое явление описывается системой дифференциальных уравнений, то всегда существует возможность представления их в виде уравнений подобия или интеграла дифференциального уравнения (системы уравнений) и может быть представлено как функция чисел (критериев) подобия дифференциального уравнения.

Следовательно, решение сложного дифференциального уравнения может быть представлено как функция критериев подобия этого дифференциального уравнения.

Из этой теоремы следует, что, если результаты эксперимента обработать и представить в виде чисел (критериев) подобия, то зависимость между ними будет представлять уравнение подобия, или критериальное уравнение.

Третья теорема теории подобия формулирует условия, достаточные для суждения о том, подобны ли явления. Для выделения из данного класса явлений конкретного единичного явления, необходимо знать условия однозначности. Однако аналитическое решение системы дифференциальных уравнений при заданных условиях однозначности, как указывалось, часто невыполнимо. Поэтому связь между переменными величинами при теплообмене устанавливают опытным путём (например, зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости течения воздуха в круглой трубе заданных размеров).

Явление, изученное опытным путём, рассматривается как единичное, частное явление. Очевидно, что существует большое число явлений, подобных этому. Требование подобия условий однозначности является необходимым условием для подобия сопоставляемых явлений.

Однако только одного подобия условий однозначности недостаточно для суждения о подобии сравниваемых явлений. Необходимо выполнить дополнительное требование для подобия явлений: критерии подобия, сопоставленные из условий однозначности, должны быть равны.

Третья теорема подобия доказывает необходимость и достаточность изложенных требований о подобии явлений.

Третья теорема теории подобия формулируется следующим образом: *подобны те явления, условия однозначности которых подобны, и критерии подобия, сопоставленные из условий однозначности, равны.*

Следует отметить, что экспериментальное исследование какого-либо явления с целью его наибольшего обобщения должно быть построено на основе тех положений, которые вытекают из теорем теории подобия.

Согласно первой теореме в опытах нужно измерять все те величины, которые содержатся в критериях подобия изучаемого явления.

Согласно второй теореме результаты опытов необходимо обрабатывать в критериях подобия и устанавливать зависимость между ними в виде критериальных уравнений подобия.

Согласно третьей теореме возможно обобщение полученных критериальных зависимостей на все явления, подобные исследованному.

6.2 Общий вид критериального уравнения естественного конвективного теплообмена

У нагретых или холодных свободно расположенных твёрдых поверхностей возникают конвективные токи газообразной или капельной жидкости, которые приводят к изменению теплообмена между поверхностями и жидкостью. Конвективное движение среды обусловлено действием закона Архимеда. Если поверхность нагрета, то находящийся вблизи воздух от неё нагревается и, вытесняемый окружающим холодным воздухом, движется вверх. Как и при вынужденном конвективном теплообмене, при естественном конвективном теплообмене между поверхностью твёрдого тела и газообразным или капельным теплоносителем образуется пограничный слой.

Аналогичная картина наблюдается у охлаждаемой поверхности, при этом свободный конвективный поток движется вниз.

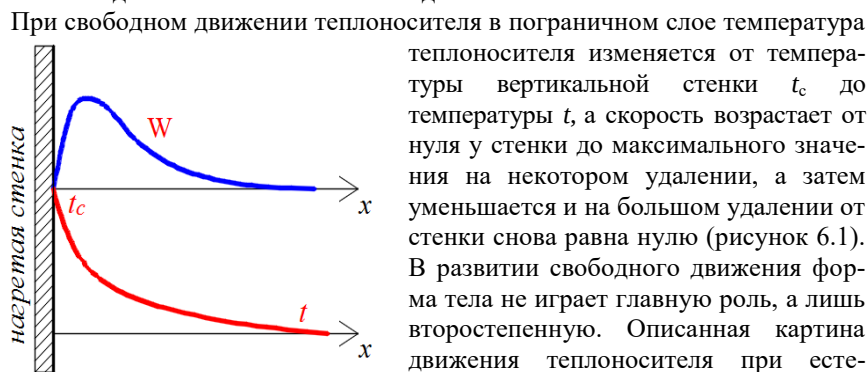


Рисунок 6.1 – Изменение температуры и скорости теплоносителя при свободной конвекции нагретой вертикальной стенки

температура теплоносителя изменяется от температуры вертикальной стенки t_c до температуры t , а скорость возрастает от нуля у стенки до максимального значения на некотором удалении, а затем уменьшается и на большом удалении от стенки снова равна нулю (рисунок 6.1). В развитии свободного движения форма тела не играет главную роль, а лишь второстепенную. Описанная картина движения теплоносителя при естественной конвекции типична для вертикальной стенки (или вдоль вертикальной трубы), для горизонтальных труб и тел овальной формы.

Около нагретых горизонтальных плоских стенок движение теплоносителя имеет иной характер и в значительной степени зависит от положения плиты и её размеров.

6.2.1 Теплоотдача вертикальных поверхностей при свободной конвекции

Закономерность средней теплоотдачи для вертикальных поверхностей (пластины, трубы) можно представить в виде следующих критериальных уравнений:

– при $10^3 < Ra < 10^9$, $Ra = GrPr$ – число (критерий) Рэлея (ламинарный режим)

$$Nu_h = 0,76Ra^{0,25} (Pr / Pr_c)^{0,25}; \quad (6.5)$$

– при $Ra > 10^9$ (турбулентный режим)

$$Nu_h = 0,15Ra^{0,33} (Pr / Pr_c)^{0,25}. \quad (6.6)$$

Для газов $Pr = \text{const}$, поэтому $Pr / Pr_c = 1$, следовательно, последний множитель в уравнениях (6.1) и (6.2) отсутствует.

В качестве определяющего размера принята высота стенки (вертикальной трубы) h , а определяющей температуры – температура окружающей среды t .

Применительно к воздуху вышеприведённые критериальные уравнения упрощаются:

– для номинального режима $Nu_h = 0,7 Gr_h^{0,25}$;

– для турбулентного режима $Nu_h = 0,132 Gr_h^{0,33}$.

Следовательно, в общем виде критериальное уравнение для теплоотдачи вертикальной поверхности в окружающий воздух имеет вид

$$Nu_h = A Gr_h^B, \quad (6.7)$$

$$Gr = \beta \frac{gh^3}{\nu^2} (t - t_0), \quad (6.8)$$

$$\beta = \frac{1}{t + 273}. \quad (6.9)$$

где ν – кинематическая вязкость воздуха при t_0 , $\text{м}^2/\text{с}$.

6.3 Опытное определение критериального уравнения теплоотдачи вертикальной поверхности при свободной конвекции

Для определения критериального уравнения теплоотдачи вертикальной поверхности при свободной конвекции необходимо произвести следующие действия.

1 Ознакомиться с основами теплового подобия.

2 Записать критериальное уравнение теплоотдачи вертикальной поверхности в окружающий воздух в упрощённом виде $Nu_h = A Gr_h^B$.

3 Опытные и расчётные данные данной работы по определению коэффициента при свободной конвекции для вертикальной поверхности перенести в таблицу экспериментальных данных:

Но- мер опыта	Темпера- тура окружаю- щей среды t_0 , °C	Длина нихромо- вой струны l_0 , м	Превыше- ние температу- ры струны Δt_c , °C	Коэффи- циент теплоотда- чи струны α_c , Вт/(м ² ·K)	Кинематиче- ская вязкость воздуха ν , м ² /с	Теплопро- водность воздуха $\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·K)

Кроме того, в эту же таблицу внести значения коэффициентов кинематической вязкости и теплопроводности воздуха, соответствующие температуре t_0 (принимаются из таблицы физических свойств сухого воздуха). При этом следует обратить внимание, что в таблице приведены завышенные числа для ν – в 10^6 , а для λ – в 10^2 , поэтому действительные значения ν и λ соответственно в 10^6 и 10^2 меньше.

4 Обработать экспериментальные данные по следующим формулам и вычислить числа подобия Грасгофа и Нуссельта для каждого опыта:

– число Грасгофа $Gr = \frac{1}{t_0 + 273} \frac{gl_0^3}{\nu^2} \Delta t$;

– число Нуссельта $Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda}$.

5 Прологарифмировать полученные значения и занести значения $\lg Gr$ и $\lg Nu$ в таблицу:

Номер опыта	Число Грасгофа Gr	Число Нуссельта Nu	$\lg Gr$	$\lg Nu$

6 По полученным вспомогательным значениям $\lg Gr$ и $\lg Nu$ в логарифмической системе координат построить прямолинейную зависимость $\lg Nu = f(\lg Gr)$, которая заменяет реальный процесс теплообмена $Nu = AGr^B$.

7 По полученной прямой линии в логарифмической системе координат $\lg Nu = \lg A + B \lg Gr$ определяют значение коэффициента A и показателя степени B , основываясь на знаниях по дисциплине «Высшая математика».

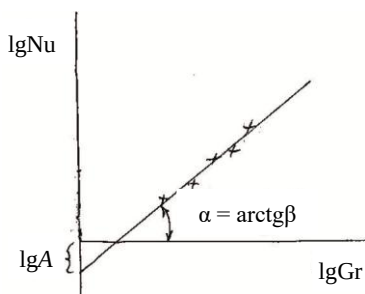


Рисунок 6.2 – Процесс теплоотдачи в логарифмической системе координат (логарифмическая анаморфоза)

На рисунке 6.2 приведена прямая $\lg Nu = \lg A + B \lg Gr$, которая позволяет приблизительно определить коэффициент A и показатель степени $B = \operatorname{tg} \alpha$ (α – острый угол, образованный прямой процесса с осью абсцисс).

8 Записать полученное критериальное уравнение теплоотдачи вертикальной поверхности при естественной конвекции в виде $Nu = AGr^B$, где числовые значения A и B определены в пункте 7 (например, $Nu = 0,13 Gr^{0,3}$).

9 Сделать краткий анализ полученных результатов.

Контрольные вопросы

- 1 Назовите методы исследования процессов теплообмена.
- 2 Назовите критерии (числа) подобия Рейнольдса, Грасгофа и Нуссельта.

3 Что характеризует значение чисел (критериев) Рейнольдса, Грасгофа и Нуссельта?

4 Напишите в общем виде критериальное уравнение, вынужденного конвективного теплообмена.

5 Напишите в общем виде критериальное уравнение естественного (свободного) конвективного теплообмена.

6 В чём заключается обработка экспериментальных данных конвективного теплообмена для составления критериального уравнения?

7 Почему используется метод подобия при изучении теплоотдачи?

8 Почему критерий Грасгофа называется определяющим и каков его физический смысл?

9 Почему критерий Нуссельта называется определяемым и каков его физический смысл?

10 Приведите общий вид критериального уравнения теплоотдачи при свободной конвекции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Овчинников, В. М.** Тепловые машины и теплообменные аппараты железнодорожного подвижного состава : учеб.-метод. пособие / В. М. Овчинников ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2022. – 241 с.

2 Тепло- и массообмен : учеб. пособие. В 2 ч. / Б. М. Хрусталёв, А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский [и др.] ; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск : БНТУ, 2007. – 606 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1 Общие сведения по опытным работам по дисциплине «Теплотехника и тепло- передача»	4
2 Использование теплотехнических приборов и измерений при исследованиях ...	5
2.1 Измерение температуры и приборы.....	6
2.1.1 Жидкостные термометры расширения	7
2.1.2 Манометрические термометры	7
2.1.3 Термометры сопротивления	8
2.1.4 Термоэлектрические термометры	10
2.1.5 Пирометры	12
2.1.6 Тепловизоры	15
2.2 Измерение давления и приборы	18
2.2.1 Жидкостные приборы измерения давления	19
2.2.2 Деформационные средства измерения давления	21
2.2.3 Грузопоршневые манометры	24
2.2.4 Электрические манометры.....	25
2.2.5 Радиоизотопные манометры	26
2.2.6 Тепловые манометры	26
2.2.7 Тензометрические приборы.....	27
2.3 Удельный объём.....	30
3 Изучение конструкции и теплотехнические испытания дизельного двигателя внутреннего сгорания	31
3.1 Тепловой баланс и основные технические показатели дизельного двигателя внутреннего сгорания.....	31
3.2 Принцип действия 2- и 4-тактных дизелей.....	32
3.3 Группа основных параметров дизеля	35
3.4 Процессы газообмена тепловозных дизелей	37
3.5 Современные тепловозные дизели	39
3.6 Дизельный ДВС на локомотиве.....	43
3.7 Испытания дизельного ДВС	44
4 Исследование процесса теплопроводности.....	46
4.1 Основной закон теплопроводности.....	46
4.2 Дифференциальное уравнение теплопроводности	47
4.3 Теплопроводность плоской стенки	48
4.3.1 Однородная плоская стенка	48
4.3.2 Многослойная стенка	49
4.4 Теплопроводность цилиндрической стенки	50
4.4.1 Однородная цилиндрическая стенка.....	51
4.4.2 Многослойная цилиндрическая стенка.....	52
4.5 Опытное определение теплопроводности изоляционного материала.....	53

5 Исследование процесса теплообмена при свободной конвекции для вертикальной поверхности.....	57
5.1 Общие понятия конвективного теплообмена	57
5.2 Режимы движения теплоносителя	58
5.3 Дифференциальное уравнение конвективного теплообмена	60
5.4 Опытное определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции для вертикальной поверхности.....	63
6 Составление критериального уравнения теплоотдачи для вертикальной поверхности при свободной конвекции.....	66
6.1 Основы теории подобия процессов теплообмена	66
6.2 Общий вид критериального уравнения естественного конвективного теплообмена.....	70
6.2.1 Теплоотдача вертикальных поверхностей при свободной конвекции..	70
6.3 Опытное определение критериального уравнения теплоотдачи вертикальной поверхности при свободной конвекции.....	71
Список литературы	73

Учебное издание

ОВЧИННИКОВ Вячеслав Михайлович
МАКЕЕВ Вячеслав Валерьевич

ТЕПЛОТЕХНИКА И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА
Пособие

Редактор *А. А. Павлюченкова*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 14.05.2025 г. Формат бумаги 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 4,42. Уч.-изд. л. 4,44. Тираж 100 экз.
Зак. № 889. Изд. № 21.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
№ 3/1583 от 14.11.2017.
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель