

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**М. В. Хомякова**

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины для студентов,  
обучающихся в магистратуре по направлению подготовки  
15.04.01 Машиностроение

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2023

УДК 536.24

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии продуктов питания  
ФГБОУ ВО «КГТУ» М. Н. Альшевская

Хомякова, М. В.

Теплофизические основы производства изделий машиностроения: учеб.-метод. пособие по изучению дисциплины для студ. магистратуры по напр. подгот. 15.04.01 Машиностроение / М. В. Хомякова. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 25 с.

В учебно-методическом пособии по изучению дисциплины «Теплофизические основы производства изделий машиностроения» представлены учебно-методические материалы по освоению тем лекционного курса, включающие подробный план лекций по каждой изучаемой теме, вопросы для самоконтроля и материалы по подготовке к практическим занятиям.

Табл. 3, список лит. – 6 наименований

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией института агроинженерии и пищевых систем ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 30 апреля 2023 г., протокол № 4

Учебное пособие рассмотрено и рекомендовано к опубликованию кафедрой инжиниринга технологического оборудования 30 марта 2023 г., протокол № 6

УДК 621.798

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2023 г.  
© Хомякова М. В., 2023 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	6
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ.....	15
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	23
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	24

## ВВЕДЕНИЕ

«Теплофизические основы производства изделий машиностроения» является дисциплиной, формирующей у обучающихся способность использования полученных знаний и навыков в разработке технических процессов на основе теплофизических законов и свойств конструкционных материалов.

Целью освоения дисциплины «Теплофизические основы производства изделий машиностроения» является совершенствование знаний для компетентного выбора материалов для исполнения изделий машиностроения в зависимости от условий эксплуатации.

Дисциплина «Теплофизические основы производства изделий машиностроения» относится к обязательной части ОПОП ВО по направлению подготовки 15.04.01 Машиностроение.

Основной задачей освоения дисциплины является приобретение знаний теплофизической терминологии, законов распространения и методов анализа эффективности использования теплоты; умение производить расчеты, а также анализ явления теплопередачи в конструкционных материалах.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

знать: методы стандартных испытаний по определению физико-механических и теплофизических свойств и технологических показателей конструкционных и инструментальных материалов;

уметь: анализировать основные физико-механические характеристики и технологические свойства материалов; оценивать и прогнозировать поведение материалов в конкретных условиях эксплуатации;

владеть: навыками работы с технической и справочной документацией; методами работы измерительных приборов по определению физико-механических свойств и технологических показателей материалов, используемых в технологических машинах и оборудовании.

Знания, умения и навыки, полученные при освоении данной дисциплины, используются в дальнейшей профессиональной деятельности.

При реализации дисциплины «Теплофизические основы производства изделий машиностроения» организуется практическая подготовка путем проведения практических занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Для успешного освоения дисциплины «Теплофизические основы производства изделий машиностроения» студент должен активно работать на лекционных и практических занятиях, организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность.

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме зачета, который выставляется по результатам прохождения всех видов текущего контроля успеваемости. При необходимости тестовые задания закрытого и открытого типов могут быть использованы для проведения промежуточной аттестации.

Оценка «зачтено» выставляется студентам:

- получившим положительную оценку по результатам выполнения практических работ;
- получившим положительную оценку по результатам тестирования.

Универсальная система оценивания результатов обучения включает в себя системы оценок: 1) «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»; 2) «зачтено», «не зачтено»; 3) 100-балльную (процентную) систему и правило перевода оценок в пятибалльную систему (таблица 1).

Таблица 1 – Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок	2	3	4	5
	0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
<b>Критерий</b>				
<b>1. Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов</b>	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно-корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полной полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект
<b>2. Работа с информацией</b>	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
<b>3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта</b>	Не может делать научно-корректных выводов из имеющихся у него сведений, в	В состоянии осуществлять научно-корректный анализ	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный анализ	В состоянии осуществлять систематический и научно-корректный анализ предоставленной

Система оценок  Критерий	2	3	4	5
	0–40 %	41–60 %	61–80 %	81–100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
	состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	предоставленной информации	предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задачи данные	информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
<b>4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач</b>	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

При необходимости для обучающихся-инвалидов или обучающихся с ОВЗ предоставляется дополнительное время для подготовки ответа с учетом их индивидуальных психофизических особенностей.

Для успешного освоения дисциплины «Теплофизические основы производства изделий машиностроения» в учебно-методическом пособии по изучению дисциплины приводится краткое содержание каждой темы занятия, практические задания и даны рекомендации к организации самостоятельной работы студентов.

## **1 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ**

Осваивая курс «Теплофизические основы производства изделий машиностроения», студент должен научиться работать на лекциях, практических занятиях и организовывать самостоятельную внеаудиторную деятельность. В начале лекции необходимо уяснить цель, которую лектор ставит перед собой и студентами. Важно внимательно слушать, отмечать наиболее существенную информацию и кратко ее конспектировать; сравнивать то, что услышано на лекции с прочитанным и усвоенным ранее материалом, укладывать новую информацию в собственную, уже имеющуюся, систему знаний. По ходу лекции необходимо подчеркивать новые термины, определения, устанавливать их взаимосвязь с изученными ранее понятиями.

Основными видами учебной деятельности в ходе изучения курса являются лекции и практические занятия.

При чтении лекций преподаватель имеет право самостоятельно выбирать формы и методы изложения материала, которые будут способствовать качественному его усвоению. При этом преподаватель в установленном порядке может использовать технические средства обучения, имеющиеся на кафедре и в университете.

Вместе с тем всякий лекционный курс является в определенной мере авторским, представляет собой творческую переработку материала и неизбежно отражает личную точку зрения лектора на предмет и методы его преподавания. В этой связи представляется целесообразным привести некоторые общие методические рекомендации по построению лекционного курса и формам его преподавания.

Лекции составляют основу теоретической подготовки и посвящены теплофизическим основам производства изделий машиностроения. При проведении лекций необходимо использовать технические средства обучения, ЭИОС, применять методы, способствующие активизации познавательной деятельности слушателей. На лекциях целесообразно теоретический материал иллюстрировать рассмотрением различных примеров и конкретных задач. Имеет смысл привлекать студентов к обсуждению как рассматриваемого вопроса в целом, так и отдельных моментов рассуждений и доказательств. Необходимо также использовать возможности проблемного изложения, дискуссии с целью активизации деятельности студентов.

Важным звеном во всей системе обучения является самостоятельная работа обучающихся. В широком смысле под ней следует понимать совокупность всей самостоятельной деятельности студентов как в отсутствие преподавателя, так и в контакте с ним. Она является одним из основных методов поиска и приобретения новых знаний, работы с литературой, а также выполнения предложенных заданий. Преподаватель призван оказывать в этом методическую помощь студентам и осуществлять руководство их самостоятельной работой.

Необходимо контролировать степень усвоения студентами текущего материала, а также уровень остаточных знаний по уже изученным темам.

При изучении курса предусмотрены следующие формы текущего контроля:

- опросы по теоретическому материалу;
- контроль на практических занятиях.

С целью формирования мотивации и повышения интереса к предмету особое внимание при чтении курса необходимо обратить на темы, которые можно проиллюстрировать примерами из практической сферы, связывая теоретические положения с будущей профессиональной деятельностью студентов.

Тематический план лекционных занятий представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Объем (трудоемкость освоения) и структура ЛЗ

Номер темы	Содержание лекционного занятия
1	Основные положения и законы теории теплопроводности
2	Расчет температурных полей и теплопередачи
3	Стационарная теплопроводность при особых условиях
4	Нестационарная теплопроводность в твердых телах
5	Определение температуропроводности материалов по измерениям температур на поверхности призмы

Если лектор приглашает студентов к дискуссии, то необходимо принять в ней активное участие. Если на лекции студент не получил ответа на возникшие у него вопросы, он может в конце лекции задать эти вопросы лектору курса дисциплины.

### **Тема 1. Основные положения и законы теории теплопроводности**

#### *Ключевые вопросы темы*

1. Температурное поле, изотермические поверхности, линии тока тепла.
2. Закон теплопроводности Фурье. Градиент и падение температуры.
3. Коэффициент теплопроводности.
4. Дифференциальное уравнение теплопроводности.
5. Теплопроводность плоской однослойной стенки.
6. Теплопроводность цилиндрической однослойной стенки.

*Ключевые понятия:* температурное поле, изотермические поверхности, линии тока тепла, закон Фурье, коэффициент теплопроводности, дифференциальное уравнение теплопроводности, плотность теплового потока

*Литература:* [1, 3, 5, 6]

#### *Методические рекомендации*

Теплопроводность – процесс переноса теплоты, когда тело не перемещается в пространстве или путем соприкосновения тел (или их частей), имеющих различную температуру. Механизм передачи теплоты в этом случае носит молекулярный или электронный характер. Теплофизика считает любое тело состоящим из мельчайших частиц. В элементах тела, которые подвержены нагреванию, молекулы начинают двигаться, в результате чего возникают упругие

волны, которые передаются от большей температуры к меньшей. Такой молекулярный перенос теплоты наблюдается в твердых телах, диэлектриках, жидкостях и газах.

В металлах к этому явлению добавляется движение свободных электронов, поэтому теплопроводность металлов выше, чем в диэлектриках, жидкостях и газах.

Всякое физическое явление и процесс распространения тепла, протекает во времени и пространстве и связано с понятием поля физической величины. Поэтому при изучении данной темы необходимо ввести такие понятия как температурное поле, изотермическая поверхность и линии теплового тока.

Необходимо изучить понятие градиента физической величины. Вектор градиента температуры всегда направлен в сторону увеличения температур, а его начало нормально к изотермической поверхности.

Любая изотермическая поверхность разделяет тело на две области: с большей и меньшей температурой. Теплота переходит через изотермическую поверхность в область более низкой температуры.

Количественно интенсивность теплообмена характеризуется плотностью теплового потока. Французский ученый Ж. Б. Фурье в 1807 г. установил, что плотность теплового потока или интенсивность теплового потока пропорциональна градиенту температуры. Особое внимание в этой теме необходимо уделить основному уравнению теплопроводности – закону Фурье.

Множитель пропорциональности в законе Фурье, называется коэффициентом теплопроводности и является физической величиной, характеризующей способность вещества проводить тепло. В данной теме необходимо ознакомиться с характеристиками этого коэффициента.

В данной теме будет рассмотрено дифференциальное уравнение теплопроводности, которое является математической зависимостью, связывающей между собой все физические величины, характеризующие явление теплопроводности внутри объема. Если такую связь найти явно относительно температуры, то можно определить плотность теплового потока.

Необходимо рассмотреть явление стационарного распространения тепла в плоской и цилиндрической стенках, ввести понятие термического сопротивления стенки.

#### *Вопросы для самоконтроля*

1. Дайте определение понятиям температурного поля, изотермической поверхности и линиям теплового тока.
2. Запишите уравнение теплопроводности Фурье. Объясните физический смысл входящих в него величин.
3. Что такое тепловой поток и плотность теплового потока?
4. Что представляет из себя коэффициент теплопроводности?

5. Что описывает дифференциальное уравнение теплопроводности?
6. По каким законам распространяется тепловой поток через плоскую и цилиндрическую стенки?
7. Запишите выражение теплового потока для теплопроводности через плоскую и цилиндрическую однослойные стенки.

## **Тема 2. Расчет температурных полей и теплопередачи**

### *Ключевые вопросы темы*

1. Принцип наложения температурных полей.
2. Расчет температурного поля методом релаксации.
3. Расчет температурного поля методом итерации.
4. Теплопередача через плоские и цилиндрические стенки.

*Ключевые понятия:* наложение температурных полей, расчет температурного поля методом релаксации, расчет температурного поля методом итерации, теплопередача через плоскую стенку, теплопередача через цилиндрическую стенку

*Литература:* [1, 3, 5, 6]

### *Методические рекомендации*

В данной теме необходимо рассмотреть определение действительной температуры точки при использовании принципа наложения температурных полей.

Также необходимо рассмотреть расчет температурного поля методом релаксации. Необходимость применения принципа релаксации обычно возникает тогда, когда задача технической теплофизики является сложной и дифференциальное уравнение теплопроводности не поддается аналитическому решению. Принцип релаксации удобно иллюстрировать на примере, когда тепло распространяется в двух измерениях.

В некоторых разделах технической теплофизики для решения стационарных задач теплопроводности целесообразно использовать метод итерации, или метод последовательных приближений, который будет рассмотрен в данной теме.

Формулы стационарной теплопроводности применимы для процессов теплопередачи через однослойные и многослойные плоские и цилиндрические стенки. Необходимо изучить распределение температуры в плоской двухслойной и цилиндрической стенке, омываемой горячей и холодной жидкостями.

### *Вопросы для самоконтроля*

1. В чем заключается смысл принципа наложения температурных полей?
2. Объясните, как производится расчет температурного поля методом релаксации?
3. Что из себя представляет расчет температурного поля методом итерации?
4. Что называют термическим сопротивлением теплопередачи многослойной плоской системы?
5. Как называется коэффициент, который характеризует интенсивность процесса теплопередачи через плоские и цилиндрические системы?

### **Тема 3. Стационарная теплопроводность при особых условиях**

#### *Ключевые вопросы темы*

1. Теплопроводность в неограниченной пластине при равномерном внутреннем тепловыделении.
2. Теплопроводность в бесконечном цилиндре при равномерном внутреннем тепловыделении.
3. Теплопроводность в стержнях.
4. Теплофизика при переменном коэффициенте теплопроводности.

*Ключевые понятия:* теплопроводность в неограниченной пластине при равномерном внутреннем тепловыделении, теплопроводность в бесконечном цилиндре при равномерном внутреннем тепловыделении, теплопроводность в стержнях, переменный коэффициент теплопроводности

*Литература:* [1, 3, 5, 6]

#### *Методические рекомендации*

В данной теме необходимо рассмотреть теплопроводность в неограниченной пластине при равномерном внутреннем тепловыделении и теплопроводность в бесконечном цилиндре при равномерном внутреннем тепловыделении.

Рассмотреть теплопроводность в стержнях. При анализе тепловой работы стержня или ребра охлаждения, будут рассмотрены два случая распространения тепла в системе.

Для большинства веществ зависимость коэффициента теплопроводности от температуры достаточно слабая, что позволяет его усреднять в заданном интервале температур и оперировать им как постоянной величиной. Однако для некоторых материалов и веществ наблюдается некоторая зависимость коэффициента теплопроводности от температуры. В связи с этим в данной теме

будет рассмотрены теплофизические основы процесса при переменном коэффициенте теплопроводности.

#### *Вопросы для самоконтроля*

1. Каков принцип определения теплопроводности в неограниченной пластине при равномерном внутреннем тепловыделении?
2. Каков принцип определения теплопроводности в бесконечном цилиндре при равномерном внутреннем тепловыделении?
3. Каков принцип определения теплопроводности в стержнях?
4. Обозначьте теплофизические основы при переменном коэффициенте теплопроводности.

### **Тема 4. Нестационарная теплопроводность в твердых телах**

#### *Ключевые вопросы темы*

1. Общее решение дифференциального уравнения теплопроводности.
2. Температурное поле в неограниченной пластине при конвективном охлаждении.
3. Метод перемножения температурных критериев.
4. Регулярный тепловой режим.
5. Квазистационарный тепловой режим.
6. Упорядоченный или обобщенный тепловой режим.

*Ключевые понятия:* общее решение дифференциального уравнения теплопроводности, температурное поле в неограниченной пластине при конвективном охлаждении, метод перемножения температурных критериев, регулярный тепловой режим, квазистационарный тепловой режим, упорядоченный тепловой режим

*Литература:* [1, 3, 5, 6]

#### *Методические рекомендации*

В данной теме будет рассмотрено общее решение дифференциального уравнения теплопроводности.

Необходимо рассмотреть метод перемножения температурных критериев, для температурного поля в неограниченной пластине при конвективном охлаждении, в брусе прямоугольного сечения, в конечном цилиндре, параллелепипеда, а также рассмотреть тепловое прослушивание тел конечных размеров. Необходимо особое внимание уделить изучению регулярного и квазистационарного тепловых режимов.

Регулярный, квазистационарный и любой возможный тепловой режим могут быть обобщены следующей формулировкой: тепловой период нагревания

или охлаждения тела, начиная с которого некоторый температурный комплекс любой точки изменяется во времени по закону прямой линии, называется упорядоченным тепловым режимом. Математическая закономерность упорядоченного теплового режима (при любом способе нагревания или охлаждения) может быть получена из анализа дифференциальных уравнений, описывающих процесс.

*Вопросы для самоконтроля*

1. В чем заключается общее решение дифференциального уравнения теплопроводности?
2. Что представляет собой температурное поле в неограниченной пластине при конвективном охлаждении?
3. В чем заключается метод перемножения температурных критериев?
4. Что такое регулярный тепловой режим?
5. Что такое квазистационарный тепловой режим?
6. Что называют упорядоченным или обобщёнными тепловыми режимами?

**Тема 5. Определение температуропроводности материалов по измерениям температур на поверхности призмы**

*Ключевые вопросы темы*

1. Характеристика тепловых режимов.
2. Теоретические основы экспериментального определения температуропроводности в призме.
3. Методологические основы определения температуропроводности по измерениям температур на поверхности призмы.
4. Оценка наступления упорядоченной части теплового периода.
5. Определение температуропроводности материалов контактным методом неразрушающего контроля.

*Ключевые понятия:* характеристика тепловых режимов, экспериментальное определение температуропроводности в призме, основы определения температуропроводности по измерениям температур на поверхности призмы, наступление упорядоченной части теплового периода, определение температуропроводности материалов контактным методом неразрушающего контроля

*Литература:* [1, 3, 5, 6]

### *Методические рекомендации*

В настоящее время расширяются работы по исследованию и разработке более совершенных способов определения теплофизических характеристик различных материалов. Несмотря на определенные успехи в этом направлении, методы предсказания свойств пока еще должного развития не получили, и главным источником информации остается эксперимент. Важнейшим условием повышения эффективности эксперимента является высокая производительность всего цикла измерений, включая монтаж и демонтаж образцов. Это требует разработки и внедрения неразрушающих методов испытания материалов, которые практически позволяют оценить качество продукции.

Все большее внимание исследователей привлекают быстросействующие и комплексные методы, создание которых возможно только на основе использования нестационарных процессов, когда можно определить одновременно многие теплофизические свойства материалов. Кроме того, нестационарные методы исследования затрачивают незначительное количество тепловой энергии и времени для проведения эксперимента.

При нагревании или охлаждении твердого тела наблюдается несколько характерных тепловых режимов, протекающих последовательно: начальный и упорядоченный (если граничные условия симметричные); начальный, упорядоченный и стационарный (если граничные условия несимметричные).

Интерес к измерениям коэффициента температуропроводности обусловлен рядом причин. Прежде всего, температуропроводность является паспортной характеристикой существующих и вновь разрабатываемых материалов, число которых непрерывно растет. Тесно связаны со знанием температуропроводности задачи экономии энергии, расчета тепловых режимов сложных конструкций, оптимизации технологических процессов в различных температурных интервалах.

В данной теме будут рассмотрены теоретические основы экспериментального определения температуропроводности в призме и методологические основы определения температуропроводности по измерениям температур на поверхности призмы.

При исследовании тепловых свойств материалов важно знать начало наступления упорядоченного теплового режима и иметь уверенность в том, что регулярный тепловой режим уже наступил, не имея в наличии значений критерия Фурье.

Отличительной особенностью контактных методов неразрушающего контроля ТФХ материалов и изделий является непосредственный контакт термоприемников с участком поверхности исследуемого объекта. В данной теме будет рассмотрено определение температуропроводности материалов контактным методом неразрушающего контроля.

### *Вопросы для самоконтроля*

1. Охарактеризуйте тепловые режимы.
2. В чем заключаются теоретические основы экспериментального определения температуропроводности в призме?
3. Каковы методологические основы определения температуропроводности по измерениям температур на поверхности призмы?
4. Дайте оценку наступления упорядоченной части теплового периода.
5. Охарактеризуйте определение температуропроводности материалов контактным методом неразрушающего контроля.

## **2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ**

Практические занятия проводятся с целью формирования у студентов умений и навыков в области определения теплофизических характеристик материалов.

Практические занятия по дисциплине «Теплофизические основы производства изделий машиностроения» являются важной составной частью учебного процесса изучаемого курса, поскольку помогают лучшему усвоению курса дисциплины, закреплению знаний.

В ходе самостоятельной подготовки студентов к практическому занятию необходимо не только воспользоваться литературой, рекомендованной преподавателем, но и проявить самостоятельность в отыскании новых источников, связанных с темой практического занятия.

Тематический план практических (ПЗ) занятий представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Объем (трудоемкость освоения) и структура ПЗ

Номер темы	Содержание практического (семинарского) занятия
1	Закон теплопроводности. Уравнение теплопроводности
2	Стационарная теплопроводность
3	Нестационарная теплопроводность

**Практическое задание № 1** Закон теплопроводности. Уравнение теплопроводности

**Цель работы:** формирование умений и навыков по расчету плотности теплового потока.

## Задание для практической работы

Решить задачи, используя справочные данные из табл. 1–2 Приложения А.

**Задача 1.1.** Наружная оболочка сферического сосуда Дюара объемом  $V=33,5$  л изготовлена из нержавеющей стали толщиной  $\delta = 10$  мм. Распределение температуры по толщине стенки в данный момент времени

$$T(r) = -506196 + 42826 \cdot r + 515200 \cdot e^{-r},$$

где  $T(r)$  в  $^{\circ}\text{C}$ ,  $r$  в м.

С внешней стороны сосуд обменивается теплом с воздухом, имеющим температуру  $T_{\text{в}} = 40$   $^{\circ}\text{C}$ , а с внутренней стороны излучает в малый безвоздушный зазор.

Определить скорость изменения температуры на обеих поверхностях сосуда, коэффициент теплоотдачи от воздуха к сосуду, плотность потока, излучаемого внутренней поверхностью сосуда.

Теплофизические свойства нержавеющей стали:  $\lambda = 15$  Вт/(м·К),  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $c = 460$  Дж/(кг·К).

**Задача 1.2.** Двумерное распределение температуры в пластине из оргстекла  $M$   $T=10^7x^2+200 \cdot e^y+100x$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) ( $x, y$  в м).

Определить плотность теплового потока и угол наклона его вектора к оси абсцисс в начале координат, скорость изменения температуры во времени в начале координат.

**Задача 1.3.** Распределение температуры вблизи основания цилиндра из стали и диаметром  $d = 60$  мм,  $T=2 \cdot 10^5 \cdot r^2+10^4z^2+60$   $^{\circ}\text{C}$ , ( $r, z$  в м).

Определить плотность теплового потока и скорость изменения во времени температуры в начале координат, тепловой поток через основание цилиндра.

**Задача 1.4.** Плотности тепловых потоков на поверхностях пластины из алюминия толщиной  $h = 15$  мм, постоянны во времени. Распределение температуры по толщине пластины в данный момент времени  $T=60 \cdot 2000x+10^5x^2$   $^{\circ}\text{C}$ , ( $x$  в м).

Определить плотности тепловых потоков на поверхностях пластины, распределение температуры по толщине стенки через  $t = 9$  с, и количество тепла, аккумулированного  $1$  м<sup>2</sup> стенки за это время.

**Задача 1.5.** Распределение температуры в пластине из меди толщиной  $L = 15$  мм, описывается уравнением  $T = 200+10x^4+2 \cdot 10^5x^2$   $^{\circ}\text{C}$  ( $x$  в м).

С одной стороны ( $x = 0$ ) пластина охлаждается хладагентом с температурой  $T_{\text{ж}} = 40$   $^{\circ}\text{C}$ , с другой нагревается газом с температурой  $T_{\text{г}} = 1800$   $^{\circ}\text{C}$ .

Определить плотности тепловых потоков и скорости изменения температуры на обеих сторонах пластины, коэффициент теплоотдачи от газа, коэффициент теплоотдачи к хладагенту.

**Задача 1.6.** Распределение температуры по толщине сферы  $T(r) = C_1/r + C_2$ , где  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий.

Температура внутренней и наружной поверхностей равна соответственно  $T_{\text{вн}} = 300$  К и  $T_{\text{н}} = 400$  К. Определить плотность теплового потока через поверхности сферы, изготовленной из титана, внутренний и наружный радиусы сферы  $r_{\text{вн}} = 0,02$  м, и  $r_{\text{н}} = 0,04$  м.

**Задача 1.7.** Трубка из латуни с внутренним диаметром  $d = 10$  мм, и наружным диаметром  $D = 16$  мм, омывается газом с температурой  $T_{\text{г}} = 1800$  К. По трубке течет охлаждающая жидкость с температурой  $T_{\text{ж}} = 40$  °С. В данный момент времени распределение температуры по толщине трубки описывается уравнением  $T = 30 + 16^4 r + 10^5 r^2$  °С, ( $r$  в м). Определить плотности тепловых потоков и скорости изменения во времени температур на наружной и внутренней поверхностях трубки, коэффициенты теплопередачи от газа и жидкости.

**Задача 1.8.** Закон скорости изменения температуры по толщине цилиндра в данный момент времени имеет вид  $\partial T / \partial t = f(r)$ , где  $f(r) = a/r$  К/с,  $r$  в м. Внутренний радиус  $r = 1$  м, наружный радиус  $R = 2,718$  м. Поверхности имеют температуру  $T_{\text{вн}} = 300$  К и  $T_{\text{н}} = 320$  К. Определить плотности теплового потока на наружной и внутренней поверхностях цилиндра. Есть ли внутри цилиндра поверхность, на которой плотность теплового потока равна нулю? Каков радиус этой поверхности? Материал цилиндра – бронза.

**Задача 1.9.** Вкладыш сопла из графита представляет собой цилиндр с внутренним диаметром  $d = 25$  мм, наружным диаметром  $D = 40$  мм, и длиной  $L = 40$  мм. Распределение температуры в цилиндре в данный момент времени описывается уравнением  $T = 1200 - 2 \cdot 10^4 r + 100 e^r + 10^3 r^2$  °С ( $r$  в м). Определить тепловой поток от продуктов сгорания к внутренней поверхности вкладыша и коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания, имеющих температуру  $T = 3000$  К, а также тепловой поток с наружной поверхности. Найти скорость повышения температуры на поверхностях вкладыша.

**Задача 1.10.** Шар диаметром  $d = 100$  мм, из чугуна нагревается топочными газами с температурой  $T = 1000$  К. Распределение температуры в шаре в данный момент времени описывается уравнением  $T = 8 \cdot 10^6 r^4 + 10^4 r^2 + 80$  °С ( $r$  в м). Определить тепловые потоки и их плотности, скорости изменения во времени температуры на наружной поверхности и в центре шара, коэффициент теплоотдачи от газа.

**Задача 1.11.** Сплошной цилиндр из вольфрама диаметром  $d = 60$  мм, нагревается продуктами сгорания, имеющими температуру  $T = 2800$  К. Распределение температуры описывается уравнением  $T = 3 \cdot 10^5 r^2 + 10^7 r^3 e^r$  °С ( $r$  в м). Определить плотности тепловых потоков и скорости изменения во времени температур на поверхности и в центре цилиндра, коэффициент теплоотдачи от газа.

### Вопросы для самоподготовки

1. Что такое плотность теплового потока?
2. Как находится плотность теплового потока пластины?
3. Как найти скорость изменения температуры по времени?
4. Какие характеристики материала необходимо знать, чтобы определить плотность теплового потока?
5. Как найти плотность теплового потока цилиндра?

### Практическое задание № 2 Стационарная теплопроводность

**Цель работы:** формирование умений и навыков по расчету параметров при стационарной теплопроводности.

#### Задание для практической работы

Решить задачи, используя справочные данные из табл. 1–2 Приложения А.

**Задача 2.1.** Определить допустимую силу тока для медного провода диаметром 2 мм, покрытого резиновой изоляцией толщиной 1 мм, при условии, что максимальная температура изоляции не должна превышать 60 °С. Коэффициент теплоотдачи в окружающий воздух 100 Вт/(м<sup>2</sup>·К), температура воздуха 20 °С, теплопроводность меди 0,4 Вт/(м·К), удельное сопротивление меди  $\rho_m = 0,0175 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ .

**Задача 2.2.** Сферический бак из силумина с жидким кислородом диаметром  $D = 0,5 \text{ м}$ , и толщиной стенок  $\delta_1 = 2 \text{ мм}$ , теплоизолирован стекловатой с толщиной слоя  $\delta_2 = 30 \text{ мм}$ . Коэффициент теплоотдачи от окружающего воздуха  $\alpha = 60, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Определить суточные потери кислорода за счет испарения (кипения). Температура кипения кислорода 183 К, теплота испарения  $2,1\cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$ , теплопроводность материала бака и стекловаты  $\lambda_1$  и  $\lambda_2 = 0,035 \text{ Вт}/\text{мК}$ , соответственно. Температура воздуха  $T = 18 \text{ °С}$ .

**Задача 2.3.** Охлаждающие ребра картера из чугуна имеют толщину  $h = 2 \text{ мм}$ , длину и высоту  $L = 20 \text{ мм}$ . Температура поверхности картера  $T_s = 85 \text{ °С}$ , температура воздуха  $T_c = 20 \text{ °С}$ , коэффициент теплоотдачи в воздух  $\alpha = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ . Определить плотность теплового потока через основание ребра и сопоставить ее с плотностью теплового потока через неоребренную поверхность.

**Задача 2.4.** Камера из алюминиевого сплава толщиной  $\delta_1 = 2,3 \text{ мм}$ , покрыта теплоизоляцией из двуоксида циркония толщиной  $\delta_2 = 0,5 \text{ мм}$ . Температура продуктов сгорания в камере  $T_1 = 2800 \text{ К}$ , коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания в камере  $\alpha_1 = 2700 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ . С наружной стороны камера охлаждается компонентом топлива с температурой  $T_2 = 70 \text{ °С}$ . Каков должен быть коэффициент теплоотдачи к охладителю, чтобы температура камеры не превышала  $T = 350 \text{ °С}$ ?

**Задача 2.5.** Через сопло из меди и с внутренним диаметром  $d = 30$  мм, наружным  $D = 40$  мм, и длиной  $L = 40$  мм, истекают продукты сгорания с температурой  $T_1 = 2900$  К. Коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания  $\alpha_1 = 5400$  Вт/(м<sup>2</sup>К). С внешней стороны сопло охлаждается хлоридом аммония, разлагающимся с тепловым эффектом 176 кДж/моль. Каков должен быть секундный расход хлорида аммония, чтобы сопло не оплавлялось (температура плавления материала сопла  $T_2 = 1083$  К)? Какова при таком расходе температура внешней поверхности сопла?

**Задача 2.6.** Сферическое днище камеры сгорания радиусом  $r = 1$  м, покрыто теплозащитным покрытием на основе двуоксида циркония толщиной  $\delta_1 = 2$  мм. Толщина стенки камеры  $\delta_2 = 3$  мм. Коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания с температурой  $T_1 = 2500$  К, к днищу  $\alpha_1 = 500$  Вт/(м<sup>2</sup>К). Определить коэффициент теплоотдачи от днища к воздуху с температурой  $T_2 = 20$  °С, и тепловой поток через днище при условии, что температура стенки днища не превышает  $T = 500$  °С.

**Задача 2.7.** По паропроводу внутренним диаметром  $d = 60$  мм, и наружным  $D = 70$  мм, подается пар с температурой  $T_1 = 220$  °С. Тепловые потери паропровода не должны превышать  $Q$ , Вт/м. Определить толщину необходимой для этого теплоизоляции из минеральной шерсти. Коэффициент теплоотдачи от пара  $\alpha_1 = 500$  Вт/(м<sup>2</sup>К), коэффициент теплоотдачи к окружающей среде  $\alpha_2 = 50$  Вт/(м<sup>2</sup>К), температура воздуха  $T_2 = 15$  °С, теплопроводность материала паропровода  $\lambda_1 = 30$  Вт/мК и минеральной шерсти  $\lambda_2 = 0,04$  Вт/мК.

**Задача 2.8.** Камера ЖРД толщиной  $\delta_1 = 2$  мм, омывается продуктами сгорания с температурой  $T_1 = 3000$  К, и охлаждается компонентом топлива с температурой  $T_2 = 70$  °С. Коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания  $\alpha_1 = 2000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), коэффициент теплоотдачи к охлаждающей жидкости  $\alpha_2 = 500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить температуру на поверхности камеры и плотность теплового потока от продуктов сгорания в камеру, а также эти же величины в том случае, когда стенка камеры покрывается слоем сажи  $\delta_2 = 0,05$  мм. Теплопроводность сажи 0,06 Вт/(м<sup>2</sup>К), теплопроводность материала камеры  $\lambda_1 = 40$  Вт/(м<sup>2</sup>К).

**Задача 2.9.** В твердое топливо для увеличения скорости горения заделана проволока из латуни диаметром  $d = 1$  мм, выступающая над поверхностью топлива на  $L = 6$  мм. Температура продуктов сгорания  $T_f = 2400$  К, коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к топливу и проволочке  $\alpha = 1400$  Вт/(м<sup>2</sup>К), теплопроводность материала проволочки  $\lambda = 110$  Вт/(м·К). Определить плотность теплового потока через проволочку у ее основания и сопоставить с плотностью теплового потока в топливо. Температура поверхности топлива  $T_s = 650$  °С.

**Задача 2.10.** Электропровод диаметром  $d = 1,5$  мм, имеет температуру  $T_1 = 70$  °С, и охлаждается потоком воздуха с температурой  $T_2 = 15$  °С. Коэффициент теплоотдачи от поверхности провода к воздуху  $\alpha_1 = 16$  Вт/(м<sup>2</sup>К). Определить температуру поверхности, которую будет иметь этот провод, если его покрыть изоляцией толщиной  $\delta_2 = 2$  мм, а силу тока в проводе считать неизменной. Теплопроводность изолятора  $\lambda = 0,15$  Вт/(м·К), коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к воздуху  $\alpha_2 = 8,2$  Вт/(м<sup>2</sup>К). Объясните полученный результат. При какой толщине изоляция начинает препятствовать теплоотводу от провода?

**Задача 2.11.** Через газопровод с внутренним диаметром  $d = 50$  мм, и наружным  $D = 60$  мм, пропускаются продукты сгорания с температурой  $T_1 = 2200$  К. Коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к стенкам газопровода  $\alpha_1 = 1$  Вт/(м<sup>2</sup>К), коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности газопровода к окружающему воздуху  $\alpha_2 = 250$  Вт/(м<sup>2</sup>К), температура воздуха  $T_2 = 15$  °С. Какой толщины изоляцию нужно нанести на внутреннюю поверхность газопровода, чтобы его температура не превышала  $T_{\text{доп}} = 500$  °С? Теплопроводность материала газопровода  $\lambda_1 = 30$  Вт/(м·К) и теплоизоляции  $\lambda_2 = 0,3$  Вт/(м·К).

### **Вопросы для самоподготовки**

1. Что такое коэффициент теплоотдачи?
2. Как находится коэффициент теплоотдачи?
3. Что такое тепловые потери?
4. Как определить толщину теплоизоляции материала?
5. Какие параметры являются основными при стационарной теплопроводности?

### **Практическое задание № 3 Нестационарная теплопроводность**

**Цель работы:** формирование умений и навыков по расчету параметров при нестационарной теплопроводности.

### **Задание для практической работы**

Решить задачи, используя справочные данные из табл. 1–2 Приложения А.

**Задача 3.1.** Проверить, нужно ли наносить теплозащитное покрытие (ТЗП) на стальную камеру двигателя, работающего 5 с. Толщина стенки камеры 2 мм, температура продуктов сгорания 2700 К, коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к камере 2500 Вт/(м<sup>2</sup>К). Теплообменом с наружной стороны камеры можно пренебречь. Допустимая температура на внутренней поверхности камеры 500 °С. Если покрытие необходимо, то оценить требуемую толщину кремнийорганического покрытия.

**Задача 3.2.** Для того чтобы нетеплоизолированная камера из стали за время,  $t = 6$  с, не нагревалась выше  $[T] = 500$  °С, ее толщина должна быть  $\delta_m = 6$  мм. На сколько можно уменьшить толщину камеры, нанеся на ее поверхность  $\delta = 2$  мм слой стеклотекстолита? Температура продуктов сгорания  $T_r = 2500$  К начальная температура камеры  $20$  °С.

**Задача 3.3.** Определите, через какое время после начала работы двигателя начнет оплавляться диафрагма (решетка), изготовленная из стального прутка диаметром  $d = 8$  мм. Температура продуктов сгорания  $T_r = 2300$  К, коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к диафрагме  $\alpha = 2500$  Вт/(м<sup>2</sup>К), начальная температура диафрагмы  $15$  °С.

**Задача 3.4.** Газовый руль из вольфрама толщиной  $\delta = 10$  мм, нагревается продуктами сгорания с температурой  $T_r = 3000$  К, коэффициент от продуктов сгорания к поверхности руля  $\alpha = 4000$  Вт/(м<sup>2</sup>К). Какова разница между температурой поверхности и температурой в середине руля через  $t = 3$  с, после начала работы двигателя? Начальная температура руля  $20$  °С.

**Задача 3.5.** Длинный цилиндр из чугуна диаметром  $d = 50$  мм имеет первоначально постоянную температуру  $T_0 = 300$  °С. Цилиндр охлаждается воздухом с температурой  $T_b = 20$  °С при коэффициенте теплоотдачи  $\alpha = 200$  Вт/(м<sup>2</sup>К). Найти температуру на поверхности и температуру на оси цилиндра после его охлаждения в течение  $t = 100$  с. Рассчитать общее количество тепла, отданное единицей длины цилиндра за это время.

**Задача 3.6.** Оценить количество тепла, переданное за время  $t = 1$  с продуктами сгорания с температурой  $T_r = 2700$  К стенкам цилиндрической камеры из стали. Диаметр камеры  $D = 70$  мм, длина  $L = 400$  мм, толщина стенки  $\delta = 3$  мм. Стенку можно считать плоской. Коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к камере  $\alpha = 2500$  Вт/(м<sup>2</sup>К), начальная температура камеры  $25$  °С.

**Задача 3.7.** Через какое время может воспламениться топливо под слоем бронирования толщиной  $\delta = 2$  мм, если поверхность бронирования омывается газом с температурой  $T_r = 2200$  К и коэффициент теплоотдачи от газа к поверхности  $\alpha = 2300$  Вт/(м<sup>2</sup>К)? Температура воспламенения топлива  $T_b = 300$  °С, начальная температура  $T_0 = -5$  °С. Теплофизические характеристики топлива и бронирования одинаковые:  $\rho = 1600$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda = 0,3$  Вт/(м·К);  $c = 1300$  Дж/(кг·К). Вследствие низкой теплопроводности толщина прогретого слоя мала по сравнению с размерами топлива, так что поверхность бронирования можно считать поверхностью полуограниченного массива.

**Задача 3.8.** Камера из стали толщиной  $\delta = 3$  мм имеет теплозащитное покрытие из кремнийорганического материала толщиной  $\delta = 1$  мм. Сколько времени такая камера может выдерживать воздействие продуктов сгорания, имеющих температуру  $T_r = 2800$  К, если допустимая температура для стали

$[T] = 580 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 1700 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ , начальная температура  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Задача 3.9.** Какой толщины должна быть стенка из молибдена, чтобы за  $t = 5 \text{ с}$ , воздействия газового потока с температурой  $T_r = 3000 \text{ К}$  этот материал не начал оплавляться? Коэффициент теплоотдачи от газа к стенке  $\alpha = 3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ , начальная температура стенки  $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Задача 3.10.** Двигатель, работающий  $t = 5 \text{ с}$ , снабжен соплом с молибденовым вкладышем толщиной  $\delta = 5 \text{ мм}$ . Вкладыш установлен на теплоизоляторе. Какова допустимая температура продуктов сгорания, позволяющая сохранить размеры сопла? Коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к соплу  $\alpha = 5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ . Стенку вкладыша можно считать плоской. Начальная температура  $T_0 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Задача 3.11.** Длинный цилиндр диаметром  $d = 50 \text{ мм}$  из чугуна, имевший температуру  $T_0 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ , перенесен в холодное помещение с температурой  $T_c = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . За какое время температура в центре цилиндра снизится до  $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Коэффициент теплоотдачи от цилиндра к окружающему воздуху  $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ .

#### **Вопросы для самоподготовки**

1. Как найти температуру на поверхности и температуру на оси цилиндра?
2. Дайте определение явления нестационарной теплопроводности.
3. Назовите две группы процессов, которые имеют важнейшее значение среди практических задач нестационарной теплопроводности.
4. При каких технологических процессах нагревания (охлаждения) имеют место процессы нестационарной теплопроводности?
5. Какие параметры являются основными при стационарной теплопроводности?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борисов, Б. В. Теоретические основы теплофизических и гидродинамических процессов: учеб. пособие: в 2 ч. / Б. В. Борисов. – Томск: ТПУ, 2021 – Ч. 2: Тепломассообмен. – 115 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/246287>
2. Сахин, В. В. Теплопередача в примерах и задачах: учеб. пособие / В. В. Сахин, Е. М. Герлиман, Н. А. Брыков. – Санкт-Петербург: БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2019. – 169 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/157109>
3. Тинькова, С. М. Теплофизика и металлургическая теплотехника: учеб. пособие / С. М. Тинькова. – Красноярск: СФУ, 2017. – 168 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/117789>
4. Физико-химические методы исследования материалов. Состав, структура: учеб. пособие / А. В. Сенин, Д. А. Винник, А. С. Чернуха, Н. С. Забейворота. – Челябинск: ЮУрГУ, 2018. – 119 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/146040> (дата обращения: 04.04.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
5. Фокин, В. М. Основы технической теплофизики: монография / В. М. Фокин Г. П. Бойков, Ю. В. Видин. – Москва: «Издательство Машиностроение-1», 2004. – 172 с.
6. Цаплин, А. И. Теплофизика в металлургии: учеб. пособие / А. И. Цаплин. – Пермь: ПНИПУ, 2008. – 230 с. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/160732>

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1

### Теплофизические свойства материалов

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , Дж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$T_{\text{плав}}$ , °С
Сталь	7800	500	40	1350
Чугун	7000	510	55	1100
Титановый сплав	4500	600	11	1660
Алюминиевый сплав	2760	900	140	660
Силумин	2660	870	164	650
Медь	8930	380	400	1083
Латунь	8520	385	111	870
Бронза	8700	343	26	900
Цинк	7140	385	121	420
Магний	1710	1200	156	651
Молибден	10200	260	140	2625
Вольфрам	19300	130	179	3400
Оксид алюминия	3600	1000	10	2050
Диоксид циркония	5300	530	1,8	2680
Стекло	2500	700	0,7	
Текстолит	1400	1500	0,3	
Резина	1150	210	0,16	
Бетон	2000	840	1,3	
Кирпич	1700	837	0,66	
Оргстекло	1160	1400	0,04	
Графит	1720	1200	110	4730
Пирографит	2200	1200	1,8	4730
Асботекстолит	1900	1300	0,3	1900
Стеклотекстолит	1800	1000	0,34	1600
Кремнийорганический ТЗМ	1700	1300	0,3	2000
Углепластик	1400	1500	0,4	2000

Примечание. В последнем столбце для ТЗМ приведены температуры на поверхности уносимого материала ( $T_n$ ).

Таблица 2

### Теплофизические свойства газов и жидкостей

Вещество	$T$ , К	$M$ , кг/кмоль	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , Дж/(кг·К)	$\mu$ , Н·с/м <sup>2</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	Pr
Воздух	293...323	29	—	$10^3$	$2 \cdot 10^{-5}$	0,0285	0,7
Продукты сгорания	2500...3000	31	—	1600	$7,5 \cdot 10^{-5}$	0,15	0,8
Вода	3000...3500	34		1700	$9 \cdot 10^{-5}$	0,2	0,76
Масло	293		1000	4180	$10^{-3}$	0,6	7
МС-20	323		875	2100	0,1	0,13	1600

Локальный электронный методический материал

Мария Вячеславовна Хомякова

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ  
МАШИНОСТРОЕНИЯ

Редактор Е. Билко

Уч.-изд. л. 1,9. Печ. л. 1,6

Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»,  
236022, Калининград, Советский проспект, 1