

**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего образования «Иркутский государственный
аграрный университет имени А.А. Ежевского»**

**Энергетический факультет
Кафедра энергообеспечения и теплотехники**

ТЕПЛОМАССООБМЕН

**методические указания и контрольные задания для студентов
высших аграрных учебных заведений, обучающихся
по направлениям подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
(уровень бакалавриата) и 35.03.06 Агроинженерия (уровень бакалавриата)**

Иркутск, 2018

Рецензенты:

Иванов С.Д. – доцент кафедры теплоэнергетики Иркутского национального исследовательского технического университета, кандидат физико-математических наук, доцент.

Логинов А.Ю. – заведующий кафедрой электрооборудования и физики Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского, кандидат технических наук, доцент.

Тепломассообмен: методические указания и контрольные задания для студентов высших аграрных учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника (уровень бакалавриата) и 35.03.06 Агроинженерия (уровень бакалавриата) / Авт.-сост. В.Д. Очиров, В.А. Федотов. – Иркутск: Иркутский ГАУ, 2018. – 40 с.

Методические указания предназначены для самостоятельного изучения дисциплины «Тепломассообмен» с выполнением контрольных работ. Содержат основные положения рабочей программы, задачи и вопросы для самопроверки.

Для студентов очной и заочной форм обучения направлений подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника (уровень бакалавриата) и 35.03.06 Агроинженерия (уровень бакалавриата).

© Очиров В.Д., 2018.

© Издательство Иркутского ГАУ.

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Тепломассообмен» является базовой дисциплиной для теплотехнических специальностей. Цель изучения дисциплины – подготовка студентов к владению теорией тепломассообмена и методами расчета основных процессов теплообмена, а также к использованию полученных знаний и навыков при выполнении курсовой работы и выпускной квалификационной работы и в профессиональной деятельности.

Задачи изучения дисциплины – овладение закономерностями основных процессов переноса теплоты и массы; усвоение основных результатов теоретических и экспериментальных исследований; приобретение умений и навыков в проведении тепловых расчетов и решении практических задач, связанных с тепломассообменом в сельском хозяйстве и промышленности. Для изучения дисциплины необходимо знание высшей математики, физики, гидрогазодинамики и технической термодинамики.

Для студентов заочной формы обучения действующим учебным планом планируется самостоятельная работа, включающая в себя:

- освоение основных разделов дисциплины;
- выполнение курсовой работы на тему «Теплоснабжение животноводческого комплекса»;
- выполнение двух контрольных работ, состоящих из четырех задач каждая.

Данное учебно-методическое издание содержит не только задания для выполнения двух контрольных работ, но и краткие методические указания по изучению дисциплины, что представляет определенное удобство для самостоятельной работы студентов. Темы, приведенные для самостоятельного изучения дисциплины, полностью соответствуют разделам основных учебников по теплопередаче, выпущенных авторами – В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел [3], М.А. Михеев, И.М. Михеева [7].

Для проработки основных разделов дисциплины в соответствии с рабочей программой, а также в помощь при выполнении контрольных работ и при подготовке к лабораторному практикуму рекомендуется список литературы. В список литературы включен комплект книг, в которых объем и структура материала согласуются с программой дисциплины.

При знакомстве с материалом курса необходимо уяснить сущность разбираемого вопроса и лишь затем переходить к изучению отдельных разделов. Необходимо отчетливо представлять себе главное содержание изучаемых явлений и процессов, при этом математическое описание явлений не должно заслонять их физической сущности.

При составлении третьего раздела методических указаний по изучению дисциплины за основу взяты материалы учебных изданий [2, 3, 7, 9].

Условия задач в контрольных работах №1 и №2 были корректно заимствованы из учебных изданий, выпущенных авторами – В.В. Авчухов, Б.Я. Паюсте [1], Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел [5]. В связи, с чем приведенные в настоящих методических указаниях задачи имеют аналогии в ранее изданных обстоятельных учебных изданиях по теплопередаче.

Приведенные в приложениях справочные данные [1, 3, 5, 7] достаточны, чтобы в полном объеме выполнить расчеты, предусмотренными контрольными работами. Приложения призваны способствовать приобретению студентами навыков самостоятельного отыскания необходимых величин.

Тема «Теплообменные аппараты» не отражена в методических указаниях по причине того, что она будет рассмотрена студентами на четвертом курсе при изучении дисциплины «Тепломассообменное оборудование предприятий».

Если при изучении основных разделов дисциплины у студентов возникнут какие-либо вопросы, то они могут получить консультацию в письменной или устной форме на кафедре энергообеспечения и теплотехники Иркутского ГАУ.

1. Объем дисциплины и виды учебной работы для студентов заочной формы обучения

Вид учебной работы	Объем часов
Общая трудоемкость дисциплины	432
Контактная работа	30
в том числе лекции	14
практические занятия	10
лабораторные работы	6
Самостоятельная работа:	366
курсовая работа (1)	30
контрольная работа (2)	30
самостоятельное изучение разделов	290
самоподготовка (проработка и повторение лекционного материала и материала учебников и учебных пособий, подготовка к лабораторным и практическим занятиям, коллоквиумам, рубежному контролю и т.д.)	16
Подготовка и сдача экзамена	36

2. Тематический план лекций и семинарских занятий по дисциплине для студентов заочной формы обучения

Вид учебной работы	Количество часов
Лекции	
Теплопроводность и теплопередача при стационарном режиме	2
Теплопроводность при нестационарном режиме	2
Теплоотдача при вынужденном движении жидкости	2
Теплоотдача при свободной конвекции	2
Теплоотдача при конденсации чистого пара	2
Теплоотдача при кипении жидкости	2
Теплообмен излучением	2
Практические занятия	
Теплопередача при стационарном режиме через плоскую стенку	1
Теплопередача при стационарном режиме через цилиндрическую стенку	1
Теплоотдача при продольном обтекании пластины	1
Теплоотдача при движении потока внутри труб (каналов)	1
Теплоотдача при поперечном обтекании труб и пучков	1
Теплоотдача при свободной конвекции в большом объеме	1
Теплоотдача при пленочной конденсации чистого пара	1
Теплоотдача при пузырьковом кипении в большом объеме	1
Теплоотдача при пленочном кипении в большом объеме	1
Теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой	1
Лабораторные работы	
Определение коэффициента теплопроводности и термического сопротивления теплоизоляционных материалов методом трубы	1
Определение тепловых свойств твердых тел методом регулярного режима	1
Определение коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха	1
Определение коэффициента теплопередачи при вынужденном течении жидкости в трубе	1
Определение теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости	1
Определение теплового потока излучением, потерь теплоты и коэффициента излучения между двумя твердыми телами	1

3. Методические указания по изучению дисциплины

Тема 1. Основные положения учения о теплопроводности

Программа. Методы изучения физических явлений. Температурное поле. Температурный градиент. Тепловой поток и плотность теплового потока. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности газов, жидкостей и твердых тел. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Коэффициент температуропроводности. Условия однозначности для процессов теплопроводности.

Литература [3, гл. 1], [4, гл. 1], [6, §6.1, 6.2.1, 6.3], [7, §1.1], [8, §11.2, 12.1, 12.3, 12.4].

Методические указания. Под процессом распространения теплоты понимается обмен внутренней энергией между отдельными элементами и между областями рассматриваемой среды. Перенос теплоты осуществляется тремя основными способами: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

Теплопроводность – перенос теплоты посредством теплового движения микрочастиц в сплошной среде, обусловленный неоднородным распределением температуры. В чистом виде происходит в твердых телах, а в жидкостях и газах – при отсутствии перемещения среды.

Изучение процесса теплопроводности необходимо начать с усвоения понятий: стационарное и нестационарное температурное поле; изотермическая поверхность; температурный градиент; тепловой поток; плотность теплового потока. Необходимо обратить внимание, что наиболее удобным для расчета является одномерное температурное поле (плоское и цилиндрическое), в котором температура зависит только от одной координаты.

Основной закон теплопроводности – закон Фурье – устанавливает зависимость между величиной теплового потока и градиентом температуры. При изучении дифференциального уравнения теплопроводности Фурье необходимо обратить внимание, что его вывод основан на законе сохранения энергии, на законе теплопроводности Фурье и на допущении о постоянном значении коэффициента теплопроводности, которые и определяют существо этого уравнения и область его применения. Для определения количества теплоты, проходящего через какую-либо поверхность твердого тела, необходимо знать температурное поле внутри рассматриваемого тела. Здесь же студенту надо познакомиться с таким физическим параметром вещества, как коэффициент температуропроводности, характеризующим способность вещества проводить теплоту; необходимо уметь правильно находить его величину для различных тел.

Вопросы для самопроверки

- 1.1. Какими способами теплота распространяется в пространстве?
- 1.2. Как передается теплота в процессе теплопроводности?
- 1.3. Что такое нестационарное температурное поле?
- 1.4. Какое температурное поле называется одномерным?
- 1.5. Могут ли изотермические поверхности пересекаться?
- 1.6. Сформулируйте основной закон теплопроводности? Дайте анализ этого закона.
- 1.7. Что такое «тепловой поток» и «плотность теплового потока»?

- 1.8. Объясните физический смысл коэффициента теплопроводности?
- 1.9. В каких примерно пределах лежат значения коэффициента теплопроводности газов и жидкостей?
- 1.10. Какое значение коэффициента теплопроводности должны иметь материалы, применяемые для тепловой изоляции?
- 1.11. Что характеризует коэффициент температуропроводности?
- 1.12. Что в себя включают условия однозначности для процессов теплопроводности?
- 1.13. Чем отличаются граничные условия первого рода от граничных условий третьего рода?
- 1.14. Тождественны ли понятия «граничные условия» и «краевые условия»?

Тема 2. Теплопроводность при стационарном режиме

Программа. Передача теплоты через однослойную и многослойную плоские стенки при граничных условиях первого и третьего рода (теплопередача). Распределение температур при постоянном и переменном коэффициентах теплопроводности. Коэффициент теплопередачи. Термическое сопротивление теплопередачи. Передача теплоты через однослойную и многослойную цилиндрические стенки при граничных условиях первого и третьего рода. Линейная плотность теплового потока. Линейный коэффициент теплопередачи. Критический диаметр цилиндрической стенки. Передача теплоты через шаровую стенку при граничных условиях первого и третьего рода. Теплопроводность в стержне (ребре) постоянного поперечного сечения. Теплопередача через ребристую плоскую стенку. Теплопроводность при наличии внутренних источников теплоты.

Литература [1, гл. 1], [3, гл. 2], [4, гл. 2, гл. 13], [6, гл. 8], [7, §1.2-1.5, 6.2-6.5], [8, §12.2].

Методические указания. Работая над данной темой, студенту надо рассмотреть теплопроводность в телах простейшей геометрической формы. Студент должен научиться определять количество теплоты, проходящей через однослойную и многослойную плоскую и цилиндрическую стенки при стационарных процессах теплопроводности, усвоить законы изменения температур внутри таких тел. Также необходимо при определении плотности теплового потока и получения выражения для температурного поля рассмотреть случай, когда коэффициент теплопроводности является функцией температуры.

В определенных условиях в телах могут происходить процессы с выделением (поглощением) теплоты, например джоулево нагревание электропроводника. Поэтому необходимо обратить внимание на расчет процессов теплопроводности тел с внутренними источниками теплоты. При исследовании переноса теплоты в таких случаях важно знать интенсивность объемного выделения (поглощения) теплоты, которая количественно характеризуется мощностью источников теплоты q_v , Вт/м³. В зависимости от особенностей изменения величины q_v в пространстве можно говорить о точечных, линейных, поверхностных и объемных источниках теплоты.

Вопросы для самопроверки

- 2.1. Что называется тепловой проводимостью стенки?
- 2.2. Что такое «термическое сопротивление стенки»?
- 2.3. Что называется полным термическим сопротивлением теплопроводности стенки?
- 2.4. Напишите и объясните формулы для вычисления теплового потока через плоскую и цилиндрическую стенки (однослойную и многослойную).
- 2.5. Изменяется ли значение плотности теплового потока q по толщине плоской многослойной стенки в условиях стационарного режима при отсутствии в ней внутренних источников теплоты?
- 2.6. Что такое «теплопередача»?
- 2.7. Как определить эквивалентный коэффициент теплопроводности многослойной стенки?
- 2.8. Что характеризует коэффициент теплопередачи?
- 2.9. Расскажите сущность графического метода определения температур на поверхности неоднородной стенки.
- 2.10. Что называется линейной плотностью теплового потока?
- 2.11. В чем отличие размерностей поверхностной плотности теплового потока и линейной плотности теплового потока?
- 2.12. Объясните, почему распределение температуры в цилиндрической стенке является криволинейным?
- 2.13. При каком условии расчет цилиндрической стенки можно заменить расчетом плоской стенки?
- 2.14. Что называется критическим диаметром трубы?
- 2.15. Всегда ли с увеличением толщины изоляции цилиндрической трубы тепловой поток через нее уменьшается?

Тема 3. Нестационарные процессы теплопроводности

Программа. Аналитическое описание процесса. Охлаждение (нагревание) неограниченной пластины. Определение количества теплоты, отданного пластиной в процессе охлаждения. Охлаждение (нагревание) бесконечно длинного цилиндра. Охлаждение (нагревание) тел конечных размеров: параллелепипед; длинный прямоугольный стержень; цилиндр конечной длины. Зависимость процесса охлаждения (нагрева) от формы и размеров тела. Регулярный режим охлаждения (нагрева) тел. Численный метод решения задач нестационарной теплопроводности. Исследование процессов теплопроводности методом аналогий.

Литература [1, гл. 4], [3, гл. 3], [4, гл. 3, 6], [6, гл. 9], [7, гл. 7].

Методические указания. Процессы теплопроводности, когда поле температуры в теле изменяется не только в пространстве, но во времени, называются *нестационарными*. Они имеют место при нагревании (охлаждении) различных заготовок и изделий, обжиге кирпича, пуске и останове различных теплообменных устройств, энергетических агрегатов и т. д.

Студенту при изучении нестационарных процессов теплопроводности необходимо рассмотреть общие физические особенности такого рода процес-

сов, познакомиться с методами решения задачи нестационарной теплопроводности и получения математических соотношений для практических расчетов. Здесь надо уяснить значение в расчетах безразмерных комплексов – число Био Bi и число Фурье Fo , безразмерной температуры Θ и безразмерной линейной координаты для пластины X и для цилиндра R . Студент должен научиться определять по графикам безразмерные температуры Θ в середине тела или на поверхности в зависимости от Bi и Fo . Следует знать характер изменения температуры в теле при заданном значении числа Bi ($Bi \rightarrow 0$; $Bi < 0,1$; $0,1 \leq Bi < 100$).

В этом же разделе студенту необходимо рассмотреть теорию регулярного режима охлаждения (нагрева), разработанную Г.М. Кондратьевым, и познакомиться с таким понятием, как темп охлаждения. Данная теория применяется при решении таких практических задач, как определение времени прогрева (охлаждения) тел, определение теплофизических параметров вещества, коэффициента теплоотдачи α , коэффициента излучения σ и термических сопротивлений.

Вопросы для самопроверки

- 3.1. Какие процессы теплопроводности называются нестационарными?
- 3.2. Достаточно ли знать условия однозначности, чтобы описать процесс изменения температурного поля в твердом теле?
- 3.3. Верно ли, что безразмерная координата X становится равной единице на поверхности пластины толщиной 2δ ?
- 3.4. Напишите общий вид решений линейных нестационарных задач теплопроводности для неограниченной пластины и бесконечного цилиндра и объясните их.
- 3.5. Поясните особенности процессов нестационарной теплопроводности при $Bi \rightarrow 0$ и $Bi \rightarrow \infty$.
- 3.6. Какие параметры входят в число Био Bi и число Фурье Fo ?
- 3.7. Критерием чего является число Био Bi ?
- 3.8. Какова методика расчета нагрева и охлаждения простейших тел с помощью критериев Био и Фурье?
- 3.9. На сколько основных стадий можно разделить процесс охлаждения?
- 3.10. Дайте определение понятию «регулярный режим» охлаждения (нагрева) тел.
- 3.11. Что называется темпом охлаждения?
- 3.12. Сформулируйте первую и вторую теоремы Г.М. Кондратьева?

Тема 4. Основные положения конвективного теплообмена

Программа. Теплоотдача. Закон Ньютона-Рихмана. Свободная и вынужденная конвекция. Физические свойства жидкости, существенные для процессов течения и теплоотдачи. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена: уравнение энергии; уравнение движения; уравнения сплошности; условия однозначности. Гидродинамический и тепловой пограничные слои. Турбулентный перенос теплоты и количества движения. Средний и местный коэффициенты теплоотдачи.

Литература [3, гл. 4], [4, гл. 7], [6, §7.1, 7.2, 7.4], [7, §2.1, 2.2, 3.1], [8, гл. 13].

Методические указания. Понятие конвективного теплообмена охватывает процесс теплообмена при движении жидкости или газа. При этом перенос теплоты осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью. Конвекция возможна только в текучей среде, в которой перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

Конвективный теплообмен тесно связан с физическими свойствами теплоносителя и характером его движения. Из физических свойств особое влияние на процесс теплообмена оказывают коэффициент теплопроводности λ , удельная теплоемкость c_p , плотность ρ , коэффициент температуропроводности a и коэффициент вязкости μ . Для каждого вещества эти величины имеют определенные значения и являются функциями параметров состояния (температуры и давления, прежде всего температуры). Касаясь характера движения теплоносителей студенту необходимо иметь ясное представление о двух видах движения жидкостей и газов – свободном и вынужденном, а также о двух основных режимах течения – ламинарном и турбулентном.

Конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью соприкасающегося с ним тела называется *конвективной теплоотдачей* или просто *теплоотдачей*. Очень часто в инженерных расчетах определяют теплоотдачу, при этом знание конвективного теплообмена внутри жидкой среды может представлять косвенный интерес, поскольку перенос теплоты внутри жидкости отражается и на теплоотдаче. Студенту необходимо научиться определять коэффициент теплоотдачи в наиболее характерных случаях конвективного теплообмена, рассмотреть особенности течения и переноса теплоты в пристенном слое жидкости и усвоить понятия гидродинамического и теплового пограничных слоев.

Вопросы для самопроверки

- 4.1. Дайте определение понятию «теплоотдача»?
- 4.2. Напишите уравнение теплоотдачи Ньютона-Рихмана и объясните его.
- 4.3. От каких факторов зависит коэффициент теплоотдачи?
- 4.4. В чем отличие массовых сил от поверхностных?
- 4.5. Дайте определение вынужденной и свободной конвекции?
- 4.6. Какие существуют основные режимы движения жидкости, и какая между ними разница? Может ли одна форма движения перейти в другую и, если переходит, то при каких условиях?
- 4.7. Чем отличаются между собой динамический и кинематический коэффициенты вязкости?
- 4.8. Уменьшается ли у капельных жидкостей динамический коэффициент вязкости при повышении температуры?
- 4.9. Во сколько раз сжимаемость воздуха больше сжимаемости воды при повышении давления на 0,1 МПа?
- 4.10. Напишите формулу для определения коэффициента объемного расширения для идеального газа.

4.11. Напишите дифференциальное уравнение конвективного теплообмена (уравнение энергии) и объясните физический смысл входящих в него слагаемых.

4.12. Из каких условий состоят условия однозначности при конвективном теплообмене?

4.13. Почему при обтекании стенки жидкостью в непосредственной близости от поверхности стенки температурный градиент резко увеличивается?

4.14. В каком случае гидродинамический и тепловой слои совпадают по толщине?

Тема 5. Подобие и моделирование процессов конвективного теплообмена

Программа. Приведение математической формулировки краевой задачи к записи в безразмерных величинах. Числа подобия и уравнения подобия. Условия подобия физических величин. Следствия из условий подобия. Метод размерностей. Моделирование процессов конвективного теплообмена.

Литература [1, гл. 5], [3, гл. 5], [4, гл. 8], [6, §7.3], [7, §2.3-2.5], [8, §14.1].

Методические указания. Конвективный теплообмен описывается системой дифференциальных уравнений и условиями однозначности с большим количеством переменных. В связи с тем, что аналитическое решение полной системы уравнений вызывает серьезные трудности, большое значение приобретает экспериментальный путь исследований. С помощью эксперимента для определенных значений аргументов можно получить числовые значения искомых переменных и затем подобрать уравнения, описывающие результаты опытов. Величины коэффициента теплоотдачи конвекцией определяются на основе функциональной связи между тепловыми и гидродинамическими числами подобия. При ведении в уравнения безразмерных комплексов (числа подобия) число величин под знаком искомой функции формально сокращается, что упрощает исследование физических величин.

Изучая эту тему, студенту следует познакомиться с основными числами подобия, применяемыми при расчете конвективного теплообмена (числа Nu , Re , Pr , Gr), разобравшись в их физической сущности, а также запомнить структуру основных критериальных уравнений теплообмена.

Необходимо научиться вычислять число Рейнольдса, характеризующее соотношение сил инерции и сил вязкости, и по его числовому значению определять режим движения жидкости, а также научиться определять теплофизические свойства жидкости или газа по определяющей температуре. Уяснить, как влияют на характер однозначных функциональных зависимостей режим движения жидкости или газа (ламинарный или турбулентный) и род движения (свободный или вынужденный).

Условием подобия является теорема Кирпичева – Гухмана. Процессы подобны, если подобны формы их границ (геометрическое подобие), поля скоростей (гидродинамическое подобие), поля температур (тепловое подобие).

Вопросы для самопроверки

5.1. В чем сущность теории подобия?

5.2. Какими основными безразмерными комплексами (числами подобия) определяется конвективный теплообмен?

5.3. В чем заключается отличие безразмерных комплексов, выражающих число Bi и число Nu ?

5.4. Какое число подобия является безразмерной характеристикой теплофизических свойств жидкости?

5.5. Какое число характеризует подъемную силу, возникающую в жидкости вследствие разности плотностей?

5.6. При каком условии для однородной среды число Ar идентично числу Gr ?

5.7. Из каких двух безразмерных комплексов состоит число Pe ?

5.8. На какие три группы делят жидкости в зависимости от значения числа Pr ?

5.9. В ряду безразмерных величин – Re , Nu , Pr , Gr – какие из них определяемые, а какие определяющие?

5.10. Сформулируйте три основных условия подобия физических процессов.

5.11. Если два процесса подобны, отличаются в этом случае числовые значения физических величин в сходственных точках?

Тема 6. Теплоотдача при вынужденном продольном омывании плоской поверхности (пластины)

Программа. Теплоотдача при ламинарном пограничном слое. Толщина теплового пограничного слоя. Зависимость теплоотдачи от изменения физических параметров жидкости и от изменения температуры поверхности по ее длине. Влияние необогреваемого начального участка и степени турбулентности внешнего потока на теплоотдачу. Переход ламинарного течения в турбулентное. Теплоотдача при турбулентном пограничном слое. Профиль скоростей и температур в турбулентном пограничном слое.

Литература [1, §6.2], [3, гл. 7], [4, §9.1], [6, §10.1.1], [7, §3.1].

Методические указания. Аналитическое описание явлений в пограничном слое вблизи плоской поверхности более простое, чем вблизи поверхностей криволинейных форм. Чтобы рассчитать теплоотдачу при ламинарном пограничном слое, необходимо знать распределение скоростей в слое. Распределение скоростей в ламинарном пограничном слое по форме близко к параболе. При ламинарном течении отношение толщины теплового слоя к гидродинамическому зависит только от числа Pr . Студенту необходимо ознакомиться с факторами, влияющими на переход ламинарного течения в турбулентное, а также разобраться в расчетных формулах, используемых для определения коэффициента теплоотдачи при омывании плоской поверхности.

Значение коэффициента теплоотдачи α при омывании плоской поверхности зависит от гидродинамической картины и режима течения теплоносителя, расстояния x от передней кромки пластины и теплофизических свойств среды.

При рассмотрении плоской поверхности теплообмена студенту необходимо обратить внимание, что на значение коэффициента теплоотдачи оказыва-

ет влияние необогреваемый начальный участок. В этом случае имеет место неоднородное развитие гидродинамического и теплового пограничных слоев. Наличие поверхности, не участвующей в теплообмене, соответствует особому случаю изменения температуры поверхности пластины по ее длине.

Необходимо отметить роль множителя $(Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}$, с помощью которого учитывается зависимость теплоотдачи капельных жидкостей от направления потока и температурного потока. Данная поправка учитывает, прежде всего, влияние на теплообмен изменения вязкости жидкости. Отношение $Pr_{ж}/Pr_c$ при течении определенной капельной жидкости тем больше отличается от единицы, чем больше температурный напор ($Pr_{ж}/Pr_c > 1$ – нагревание; $Pr_{ж}/Pr_c < 1$ – охлаждение). На газы поправка $(Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}$ не распространяется.

Вопросы для самопроверки

6.1. Нарисуйте схему перехода ламинарного течения жидкости в турбулентное при омывании плоской поверхности и объясните механизм этого явления?

6.1. Как изменяется с расстоянием от переднего края пластины до определенной точки толщина ламинарного гидродинамического пограничного слоя?

6.3. От чего зависит отношение толщины теплового и гидродинамического пограничного слоев при ламинарном движении?

6.4. Как изменяется коэффициент теплоотдачи вдоль пластины при ламинарном пограничном слое?

6.5. Что такое степень турбулентности набегающего на пластину потока?

6.6. Какое критическое значение имеет число Re , соответствующее переходу от ламинарного режима течения к развитому турбулентному?

6.7. От чего зависит толщина вязкого подслоя при турбулентном течении?

6.8. Какой физический смысл имеет число St и, какие физические параметры в него входят?

6.9. Зависит ли теплоотдача от числа Gr при развитом вынужденном турбулентном течении?

6.10. Покажите графически, как изменяется коэффициент теплоотдачи вдоль пластины для двух случаев: 1 – полностью турбулентное течение в пограничном слое; 2 – смешанное течение (ламинарное → переходное → турбулентное).

Тема 7. Теплоотдача при вынужденном течении жидкости в трубах

Программа. Особенности движения и теплообмена в трубах. Участки гидродинамической и тепловой стабилизации. Стабилизированное течение. Коэффициент теплоотдачи трубы. Теплоотдача при ламинарном и турбулентном режимах течения жидкости в гладких трубах круглого сечения. Теплоотдача при течении жидкости в трубах некруглого поперечного сечения, в изогнутых и шероховатых трубах.

Литература [1, §6.3], [3, гл. 8], [4, §9.2], [6, §10.2], [7, §3.2].

Методические указания. Процесс теплоотдачи при течении жидкости в трубах является более сложным по сравнению с процессом теплоотдачи при

омывании поверхности неограниченным потоком. Жидкость, текущая вдали от пластины, не испытывает влияния процессов, происходящих у стенки. Поперечное сечение трубы имеет конечные размеры. В результате, начиная с некоторого расстояния от входа, жидкость по всему поперечному сечению трубы испытывает тормозящее действие сил вязкости, происходит изменение температур жидкости по сечению и длине канала [3].

Студенту при изучении данной темы необходимо основное внимание уделить рассмотрению особенностям течения и теплообмена в гладких прямых трубах с неизменным по длине круглым поперечным сечением.

Ознакомьтесь с ламинарным и турбулентным режимами течения. Помните, при каких значениях числа Re происходит переход от одного режима к другому. При ламинарном режиме течения различают две его разновидности – вязкостный и вязкостно-гравитационный режимы. Здесь необходимо запомнить, что переход от вязкостного к вязкостно-гравитационному режиму определяется величиной $(GrPr)_{п.с} = 8 \cdot 10^5$.

При анализе всех видов движения следует различать теплообмен в пределах начального теплового (длина $l_{н.т}$) участка и теплообмен стабилизированный, а также местные и средние значения коэффициента теплоотдачи.

Студенту дополнительно необходимо ознакомиться с процессами теплообмена при течении жидкости в трубах некруглого поперечного сечения и в изогнутых трубах.

Теплоотдача в трубах некруглого поперечного сечения изучена не так хорошо, в связи, с чем расчет теплоотдачи в таких трубах сводят к определению той же величины в некоторой эквивалентной трубе круглого поперечного сечения с диаметром $d_{экв}$. Следует отметить, что использование $d_{экв}$ дает удовлетворительные результаты только при развитом турбулентном движении среды в каналах без острых углов.

В технике часто встречается теплообменные аппараты, в которых один из теплоносителей протекает в изогнутых трубах. При движении потока в изогнутых трубах (змеевиках) со средним диаметром изгиба (витка) D и внутренним диаметром d_v теплоотдача происходит интенсивней вследствие появления центробежного эффекта. Действие центробежного эффекта на интенсификацию теплоотдачи распространяется на всю длины трубы. За счет увеличения турбулентности потока в последующем за поворотом прямом участке трубы теплоотдача всегда несколько выше, чем в прямом участке до поворота.

Вопросы для самопроверки

7.1. При каком значении числа Re течение жидкости в круглых трубах соответствует ламинарному режиму?

7.2. Что называют участком гидродинамической стабилизации?

7.3. Нарисуйте распределение скорости по сечению трубы при стабилизированном ламинарном и турбулентном течении жидкости.

7.4. Что называют начальным тепловым участком и, от каких факторов зависит его длина?

7.5. Для каких теплоносителей на участке стабилизированного теплообмена значение числа $Nu_{ж}$ приближается постоянному значению 4,36?

7.6. Нарисуйте изменения местного и среднего коэффициентов теплоотдачи по длине трубы для двух случаев: 1 – неизменный режим течения; 2 – смешанное течение.

7.7. Нарисуйте распределение скорости по сечению трубы для двух случаев: 1 – направления естественного и вынужденного движения совпадают; 2 – направления свободного и вынужденного движения взаимно противоположны.

7.8. Что принимают за определяющий размер, вводимый числа Nu и Re , для определения коэффициента теплоотдачи при вязкостном течении жидкости в трубе?

7.9. Напишите формулу для определения эквивалентного диаметра сечения канала?

7.10. В каком случае при турбулентном течении жидкости в прямых трубах коэффициент ϵ_l , учитывающий влияние начального теплового участка на изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы, равен 1?

7.11. Верно ли, что при турбулентном течении коэффициент теплоотдачи зависит от скорости более существенно, чем при ламинарном режиме?

7.12. Одинаковы ли наименования чисел подобия, включенных в формулы для вязкостного и вязкостно-гравитационного режимов течения?

Тема 8. Теплоотдача при вынужденном поперечном омывании труб и пучков труб

Программа. Характер течения и теплоотдача при поперечном омывании одиночной круглой трубы. Характер течения и теплоотдача при поперечном омывании пучков труб: шахматный и коридорный пучки; трубные пучки с гладкой поверхностью; трубные пучки из оребренных труб.

Литература [1, §6.4], [3, гл. 9], [4, §9.3, 9.4], [6, §10.1.3], [7, §3.4],[8, §14.2].

Методические указания. Студенту необходимо рассмотреть следующие виды вынужденного движения жидкости: поперек одиночной трубы и поперек пучка труб. В каждом из видов изучается ламинарный и турбулентный режимы течения. Процесс теплоотдачи при поперечном обтекании труб имеет ряд особенностей, которые объясняются гидродинамической картиной движения жидкости вблизи поверхности трубы. Изучая теплообмен при омывании одиночной трубы студенту необходимо ознакомиться с некоторыми особенностями, такими как безотрывное омывание цилиндра, омывание цилиндра с отрывом ламинарного и турбулентного пограничных слоев.

Теплообменные аппараты сравнительно редко выполняются из одной поперечно-омываемой трубы, так как поверхность теплообмена при этом невелика. Обычно трубы собирают в пучок. Студенту надо изучить особенности теплообмена при расположении труб в коридорных и шахматных пучках труб.

Вопросы для самопроверки

8.1. При каком значении числа Re имеет место быть плавное, безотрывное поперечное обтекание одиночной трубы жидкостью?

8.2. Какие факторы влияют на величину коэффициента теплоотдачи в пучках труб при поперечном омывании их жидкостью?

8.3. Допускается ли применение безразмерных формул, соответствующих течению в круглых трубах, для расчета теплоотдачи при поперечном омывании труб?

8.4. Что называется углом атаки ψ и, в каком случае он равен нулю?

8.5. Возрастает ли коэффициент теплоотдачи при внешнем омывании трубы от угла атаки?

8.6. Начиная примерно, с какого ряда пучков труб, средняя теплоотдача становится стабильной при продольном омывании пучков труб жидкостью?

8.7. При каком расположении пучков (шахматном или коридорном), при прочих равных условиях в ламинарной области, теплоотдача больше?

Тема 9. Теплоотдача при свободном движении жидкости

Программа. Теплоотдача при свободном движении жидкости в большом объеме вдоль вертикальных труб и пластин, вблизи горизонтальных труб и пластин. Теплообмен при свободном движении жидкости в ограниченном пространстве: горизонтальные щели; вертикальные щели; шаровые и горизонтальные цилиндрические прослойки. Анализ задачи о конвективном теплообмене при свободном движении жидкости методом подобия. Расчетные уравнения для теплоотдачи.

Литература [1, гл. 7], [3, гл. 10], [4, гл. 10], [6, §10.3], [7, §3.3], [8, §14.3].

Методические указания. Студенту необходимо рассмотреть теплоотдачу только при свободном гравитационном движении для наиболее простых форм поверхности твердого тела (вертикальная пластина и труба, горизонтальная пластина и труба). Как и при вынужденной конвекции, свободное движение жидкости может быть как ламинарным, так и турбулентным. Здесь же необходимо изучить теплообмен при свободном движении жидкости в ограниченном объеме. Научиться осуществлять выбор безразмерных уравнений, позволяющих рассчитать коэффициент теплоотдачи для каждого частного случая.

Вопросы для самопроверки

9.1. За счет чего возникает свободное движение жидкости?

9.2. Какие безразмерные комплексы входят в число Рэлея Ra ?

9.3. Нарисуйте, как распределяются температура и скорости по толщине пограничного слоя при свободном ламинарном движении жидкости вдоль вертикальной пластины в неограниченном объеме?

9.4. Верно ли, что при свободной конвекции вдоль вертикальной пластины в неограниченном объеме в случае ламинарного режима коэффициент теплоотдачи, средний на участке высотой x , больше, чем коэффициент теплоотдачи местный на высоте x ?

9.5. Зависит ли местный коэффициент теплоотдачи при развитом турбулентном течении вдоль вертикальной пластины в большом объеме от высоты участка стенки?

9.6. Около какой поверхности при свободной конвекции в большом объеме безразмерный коэффициент теплоотдачи $Nu_{п.с} = 0,5$?

9.7. Нарисуйте, как изменяется коэффициент теплоотдачи при свободном движении вдоль вертикальной стенки.

9.8. При какой величине произведения $(GrPr)_{ж}$ передача теплоты от горячей стенки к холодной в узких щелях, плоских и кольцевых каналах и прослойках определяется теплопроводностью?

Тема 10. Теплообмен при конденсации чистого пара

Программа. Пленочная и капельная конденсация. Влияние различных факторов на теплоотдачу. Теплообмен при пленочной конденсации неподвижного пара: ламинарное и турбулентное течение пленки на вертикальной стенке; конденсация на горизонтальных трубах. Теплообмен при пленочной конденсации движущегося пара внутри труб. Теплообмен при пленочной конденсации движущегося пара на горизонтальных одиночных трубах и пучках труб. Теплообмен при капельной конденсации.

Литература [1, гл. 8], [3, гл. 12], [4, гл. 15], [6, §10.6], [7, §4.2], [8, §14.5].

Методические указания. Студенту необходимо изучить общую классификацию процессов конденсации: в объеме пара или на охлаждаемой поверхности теплообмена; пленочная или капельная; при движущемся или неподвижном паре; при паре насыщенном, влажном или перегретом.

В энергетике, во многих других областях техники и промышленности чаще приходится иметь дело с конденсацией пара в жидкое состояние на охлаждаемых поверхностях теплообмена. Эту задачу, прежде всего, необходимо рассмотреть студенту при изучении данной темы.

В случае пленочной конденсации на вертикальной стенке различают ламинарный и смешанный (ламинарный, сосуществующий с турбулентным) режимы течения пленки. Пленка конденсата является большим термическим сопротивлением передаче теплоты фазового перехода от поверхности конденсации к стенке, в связи, с чем следует различать две составляющие термического сопротивления тепловому потоку при конденсации – сопротивление пленки конденсата на поверхности стенки и термическое сопротивление на границе раздела фаз (кнудсеновский слой). Последнее не является термическим сопротивлением в его обычном понимании и определяется коэффициентом конденсации k . При конденсации чистого водяного пара с давлением примерно $p > 10^4$ Па с достаточным приближением можно считать, что температурный скачок на границе раздела фаз отсутствует, из чего следует, что термическое сопротивление передаче теплоты от пара к стенке можно представить лишь сопротивлением пленки конденсата.

При изучении настоящей темы следует обратить внимание на то, что в условиях конденсации пара число Рейнольдса характеризует не только гидродинамику, но еще и интенсивность теплообмена. При названных условиях число Рейнольдса становится зависимым, т. е. определяемым числом подобия, содержащим в себе искомую величину – коэффициент теплоотдачи α . Здесь в качестве независимых чисел подобия используются приведенная длина Z , число Ga и число Ar . Также необходимо сделать акцент, для какого агрегатного состояния жидкости (газообразного или жидкого) выбираются значения теплофизических свойств по определяющей температуре.

Изучая процесс пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности, студенту стоит ознакомиться с номограммой для расчета среднего коэффициента теплоотдачи. Номограмма позволяет найти $\bar{\alpha}$, если известны высота h поверхности теплообмена, температурный напор $\Delta t = t_n - t_c$ и температура насыщения пара.

Вопросы для самопроверки

10.1. В каком случае имеет место быть пленочная конденсация?

10.2. Нарисуйте, как выглядит характер распределения температур при пленочной конденсации чистого насыщенного пара.

10.3. С помощью чего искусственно может быть получена капельная конденсация на стенке?

10.4. Что собой представляет коэффициент конденсации и может ли он принимать значение более единицы?

10.5. Какая величина является определяющим размером для числа Рейнольдса, $Re = 400$, характеризующего при конденсации пара переход от ламинарного режима течения пленки к турбулентному?

10.6. Нарисуйте, как изменяется коэффициент теплоотдачи и толщина ламинарно текущей пленки конденсата вдоль вертикальной пленки.

10.7. Входит ли в состав числа Рейнольдса для пленки конденсата теплота фазового перехода при конденсации?

10.8. От каких параметров зависит местный коэффициент теплоотдачи при ламинарном режиме конденсации на вертикальной стенке?

10.9. Чему равен поправочный множитель ϵ_v на волновое движение при пленочном ламинарном режиме конденсации при $Re = 400$?

10.10. Верно ли, что коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации пара больше, чем при пленочной конденсации этого же пара?

Тема 11. Теплообмен при кипении однокомпонентных жидкостей

Программа. Механизм процесса теплообмена при пузырьковом кипении жидкости. Режимы кипения. Минимальный радиус пузырька. Первая и вторая критические плотности теплового потока. Зависимость коэффициента теплоотдачи от давления, физических свойств жидкости, состояния поверхности и других факторов при кипении в большом объеме. Структура потока при пузырьковом кипении жидкости в неограниченном объеме. Теплоотдача при пузырьковом кипении жидкости в условиях свободного движения. Особенности кипения на горизонтальных трубных пучках. Структура двухфазного потока и теплообмен при кипении жидкости внутри труб; зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости циркуляции, плотности теплового потока и других факторов. Расчет теплоотдачи при пузырьковом кипении в условиях вынужденной конвекции в трубах. Механизм теплообмена при пленочном кипении жидкости. Теплоотдача при ламинарном движении паровой пленки. Теплоотдача при турбулентном движении паровой пленки. Кризисы кипения.

Литература [1, гл. 9], [3, гл. 13], [4, гл. 16], [6, §10.5], [7, §4.1], [8, §14.4].

Методические указания. Студент должен рассмотреть условия возникновения и развития паровой фазы, основные характеристики механизма кипе-

ния, а также характер изменения плотности теплового потока от перегрева жидкости (кривая кипения) и температурного напора. Познакомиться с классификацией процессов кипения, а для каждого элемента этой сложной классификации – с методикой определения коэффициентов теплоотдачи, плотности теплового потока или температуры стенки, в некоторых случаях температуры перегрева жидкости.

Заинтересованность в высокой интенсивности теплообмена заставляет обратить особое внимание на пузырьковый режим кипения. Студенту следует изучить процесс перехода от пузырькового режима кипения к пленочному и уяснить физическую природу снижения коэффициента теплоотдачи при появлении на стенке паровой пленки. В данном случае нужно иметь ясное представление об опасностях, связанных с превышением критической тепловой нагрузки.

Процесс кипения жидкости характеризуется таким понятием, как объемное паросодержание. При объемном паросодержании до 70% на теплоотдачу при малых нагрузках большее влияние оказывает конвекция однофазной жидкости, при больших – парообразование (двухфазное состояние).

Необходимо обратить внимание на то, что процесс кипения жидкости, движущейся в канале или трубе, характеризуется рядом особенностей. Труба или канал представляют собой ограниченную систему, в которой при движении кипящей жидкости происходит непрерывное увеличение паровой и уменьшение жидкой фаз. Соответственно этому изменяется и гидродинамическая структура потока как по длине, так и по поперечному сечению трубы, а следовательно, изменяется и теплоотдача. В зависимости от скорости движения жидкости, ее теплофизических свойств, давления, диаметра и длины трубы, расположения ее в пространстве различают несколько режимов течения, таких как пузырьковый, снарядный, эмульсионный, дисперсно-кольцевой, расслоенный.

Вопросы для самопроверки

11.1. Что называется процессом кипения жидкости?

11.2. В чем отличие пузырькового режима кипения от пленочного?

11.3. Какие факторы оказывают наибольшее влияние на образование пузырька радиусом R_k ?

11.4. Что влияет на увеличение или уменьшение краевого угла кипения $\Theta_{\text{кип}}$?

11.5. Нарисуйте, как выглядят зависимости плотностей теплового потока от перегрева жидкости и температурного напора.

11.6. В какой единице измерения выражают приведенную скорость парообразования (кипения)?

11.7. Нарисуйте, как выглядит распределение температуры в недогретой жидкости.

11.8. Что называют кризисами теплоотдачи при кипении?

11.9. Всегда ли температура кипящей жидкости выше, чем температура в пузырьке пара?

11.10. Может ли увеличиваться первая критическая плотность теплового потока вслед за повышением давления кипящей жидкости?

11.11. Напишите соотношение, связывающее между собой массовое расходное и объемное расходное паросодержания?

Тема 12. Тепло- и массообмен в двухкомпонентных средах

Программа. Основные понятия и законы. Закон Фика. Термическая диффузия (эффект Соре) и бародиффузия. Коэффициенты термо- и бародиффузии. Дифференциальные уравнения тепло- и массообмена: уравнение массообмена; уравнение энергии. Коэффициент массоотдачи. Диффузионный пограничный слой. Аналогия процессов теплообмена и массообмена. Граничные условия на поверхности раздела фаз. Применение методов подобия и размерностей к процессам массообмена. Тепло- и массообмен при конденсации пара из парогазовой смеси. Тепло- и массообмен при испарении жидкости в парогазовую смесь.

Литература [1, гл. 11], [3, гл. 14], [4, гл. 17], [6, гл. 12], [8, гл. 18, 19].

Методические указания. В природе и технике многие процессы теплообмена сопровождаются переносом массы одного компонента относительно массы другого. Если теплообмен характеризуется выравниванием температур, то массообмен характеризуется в выравнивании концентраций вещества. Аналогично теплообмену диффузия (массообмен) может происходить как молекулярным (микроскопическим), так и молярным (макроскопическим) путем. В газах молекулярная диффузия осуществляется за счет теплового движения молекул. Студенту прежде всего необходимо рассмотреть процессы тепло- и массообмена в газообразных двухкомпонентных (бинарных) средах, а также различать между собой понятия концентрационной диффузии, термо- и бародиффузии.

При изучении темы студенту следует обратить внимание на формальную аналогию процессов теплопроводности, вязкости и концентрационной диффузии; подобие законов Фурье, Ньютона и Фика, соответственно уравнений энергии, движения и массообмена, подобие полей температуры, скорости и концентрации в пограничном слое, подобие явлений теплоотдачи, трения и массоотдачи. Необходимо разобраться в понятиях плотности потока массы и коэффициента молекулярной диффузии.

Стоит обратить внимание, что диффузионные процессы имеют свои особенности, такие как появление диффузионного эффекта, разнообразие выражений и даже единиц для коэффициентов молекулярной диффузии D и D_p , а также коэффициентов массоотдачи β и β_p .

Вопросы для самопроверки

- 12.1. Сформулируйте закон молекулярной диффузии (закон Фика)?
- 12.2. Какой процесс называется массоотдачей?
- 12.3. Объясните физический смысл коэффициента диффузии?
- 12.4. Что собой представляет диффузионный термоэффект (эффект Дюфо)?
- 12.5. Какой единицей измерения выражается коэффициент k_t , называемый термодиффузионным отношением?
- 12.6. Какими основными числами подобия определяется конвективный массообмен и каков физический смысл безразмерных чисел подобия?

12.7. Содержится ли коэффициент теплопроводности в диффузионном числе Нуссельта?

12.8. Что такое коэффициент массоотдачи и какова его единица измерения?

12.9. Что такое диффузионный пограничный слой и чем он вызван? Изобразите его графически.

12.10. Может ли процесс испарения в парогазовую смесь усилить теплообмен между жидкостью и парогазовой смесью?

Тема 13. Основные законы теплового излучения

Программа. Природа теплового излучения. Плотность лучистого потока. Интенсивность излучения. Собственное, эффективное и результирующее излучение тел. Поглощательная, отражательная и пропускательная способность тел.

Законы теплового излучения: закон Планка; закон Релея-Джинса; закон смещения Вина; закон Стефана-Больцмана; закон Кирхгофа; закон косинусов Ламберта. Абсолютно черное тело. Серое тело. Степень черноты.

Литература [1, гл. 10], [3, гл. 16], [4, гл. 11], [6, §11.1, 11.2], [7, §5.1], [8, §15.1, 15.2].

Методические указания. Приступая к изучению процессов теплового излучения, прежде всего, необходимо понять природу данного процесса. Тепловое излучение всегда сопровождается двойным превращением энергии: тепловая энергия излучающего тела переходит в лучистую, а лучистая энергия, поглощенная другим телом, переходит в тепловую. Далее изучите классификацию тел по их поглощательной, отражательной и излучательной способностям, а затем рассмотрите законы теплового излучения, полученные применительно к идеально абсолютному черному телу и термодинамическому равновесию.

Вопросы для самопроверки

13.1. В каком диапазоне длин волн электромагнитное излучение считается тепловым?

13.2. Дайте определение коэффициентам поглощения, отражения и пропускания?

13.3. Как называется тело, которое поглощает всю падающую на него энергию ($A = 1$)?

13.4. Что называется поверхностной плотностью потока интегрального излучения?

13.5. Что собой представляет результирующее излучение $E_{рез}$?

13.6. В каких пределах изменяется коэффициент теплового излучения ϵ реальных тел?

13.7. Чему равен коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела?

13.8. Сформулируйте и запишите законы Планка, Вина и Стефана-Больцмана?

13.9. Могут ли быть численно равны при термодинамическом равновесии поглощательная способность и степень черноты тела?

Тема 14. Теплообмен излучением между твердыми телами, разделенными прозрачной средой

Программа. Методы исследования лучистого теплообмена. Теплообмен излучением в системе тел с плоскопараллельными поверхностями. Излучательная способность твердых тел и методы ее определения. Теплообмен излучением между телом и его оболочкой. Теплообмен излучением между двумя телами, произвольно расположенными в пространстве. Угловые коэффициенты излучения. Геометрические свойства лучистых потоков. Зональный метод исследования лучистого теплообмена. Методы определения угловых коэффициентов излучения.

Литература [1, гл. 10], [3, гл. 17], [4, §12.1, 12.2], [6, §11.3], [7, §5.2], [8, §15.3].

Методические указания. Студенту необходимо рассмотреть основные случаи лучистого теплообмена между телами. В теплотехнических расчетах обычно требуется рассчитать лучистый теплообмен между телами, качество поверхности, размеры и температура которых известны. По этим данным энергия излучения обоих тел всегда может быть определена на основании закона Стефана-Больцмана. В этом случае задача сводится к учету влияния формы и размеров тел, их взаимного расположения, расстояния между ними и их степени черноты.

Необходимо иметь четкое представление о роли приведенного коэффициента теплового излучения $\epsilon_{пр}$ системы двух тел, уметь определять его для следующих способов расположения:

- 1) два тела, произвольно расположенные в пространстве (общий случай);
- 2) два тела с параллельными поверхностями больших размеров, угловые коэффициенты $\varphi_{1,2} = \varphi_{2,1} = 1$;
- 3) тело с площадью поверхности F_1 находится внутри другого тела с площадью поверхности F_2 ($F_2 \gg F_1$);
- 4) при наличии n плоских экранов, расположенных между двумя телами с параллельными поверхностями больших размеров;
- 5) при наличии n цилиндрических экранов, расположенных между телом и внешней оболочкой.

Вопросы для самопроверки

14.1. Напишите формулу для определения теплового потока излучения $Q_{1,2}$ между двумя телами, имеющими температуры T_1 и T_2 ($T_1 > T_2$).

14.2. Что характеризует средний угловой коэффициент лучеиспускания (коэффициент облученности) $\varphi_{1,2}$?

14.3. Может ли серое тело излучать больше энергии, чем черное тело таких же размеров и в такой окружающей среде, если температуры серого и черного тел одинаковы?

14.4. Влияют ли геометрические размеры и способ размещения двух тел в пространстве на вид расчетной формулы для определения угловых коэффициентов излучения?

14.5. Влияет ли температура внешних источников излучения на способ расчета приведенного коэффициента теплового излучения $\epsilon_{пр}$?

14.6. При каком способе расположения двух тел приведенный коэффициент теплового излучения $\varepsilon_{\text{пр}}$ равен коэффициенту теплового излучения ε_1 первого тела?

14.7. Для чего нужны экраны и, какими свойствами они должны обладать?

Тема 15. Теплообмен в поглощающих и излучающих средах

Программа. Уравнение переноса лучистой энергии. Оптическая толщина среды и режимы излучения. Особенности излучения газов и паров. Лучистый теплообмен между газовой средой и оболочкой. Сложный теплообмен. Критерии радиационного подобия.

Литература [3, гл. 18], [4, §12.3, 12.4], [6, §11.4, 11.5], [7, §5.3], [8, §15.4].

Методические указания. Ознакомьтесь с вопросами поглощения и излучения газов, т. к. теплообмен в топках и газоходах котельных агрегатов в значительной степени определяется излучением газов. В газах излучение и поглощение имеет избирательный (селективный) характер и всегда протекает в объеме. Рассмотрите особенности излучения несветящейся газовой среды, к которым относятся газы и пары. Одно- и двухатомные газы (гелий, водород, кислород, азот и др.) практически являются прозрачными (диатермичными) для излучения. Трехатомные газы обладают большой излучательной и поглощательной способностью. К таким газам относятся CO_2 и H_2O , имеющие большое практическое применение в теплоэнергетике; в топочных газах, как правило, они присутствуют одновременно.

Лучистый перенос может сопровождаться одновременным переносом теплоты путем теплопроводности и конвекции. Студенту необходимо изучить простые приближенные решения задач радиационно-кондуктивного и радиационно-конвективного теплообмена.

Вопросы для самопроверки

- 15.1. Что определяет уравнение переноса лучистой энергии?
- 15.2. Сформулируйте и запишите закон Бугера?
- 15.3. Что представляет собой оптическая толщина газового слоя?
- 15.4. В чем отличие газового излучения от излучения твердых тел?
- 15.5. Как определяется степень (коэффициент) черноты газовой среды?
- 15.6. Какая среда является оптически толстой?
- 15.7. Какой режим называют режимом скольжения разрежения?
- 15.8. По какой формуле рассчитывается результирующий поток излучения газа на стенку?

4. Методические указания по выполнению контрольных работ

Контрольные работы должны выполняться студентом после изучения всего курса. Согласно учебному плану студенту заочной формы обучения необходимо выполнить две контрольные работы, каждая из которых состоит из четырех задач. Студент выбирает номер варианта по соответствующим двум последним цифрам его зачетной книжки в таблицах 5.1-5.4 и 6.1-6.4.

При выполнении контрольных работ необходимо соблюдать следующие требования:

- обязательно записать условия задачи;
- решение сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором должно быть указано, какая величина определяется и, по какой формуле, какие величины подставляются в формулу (из условия задачи, из справочника, определена ранее и т. д.);
- вычисления давать в развернутом виде;
- обязательно проставлять размерности всех заданных и расчетных величин в международной системе СИ;
- графический материал должен быть выполнен четко в масштабе.

Точность вычислений зависит от точности заданных величин или выбранных исходных данных, но в общем случае не следует стремиться к точности выше, чем 0,5%.

После решения задач должен быть произведен краткий анализ полученных результатов и сделаны соответствующие выводы. В конце работы перечислить список использованной при решении задач литературы.

Работа, выполненная по чужому варианту, к рассмотрению не принимается. Перед сдачей на проверку контрольных работ в обязательном порядке необходимо заверить их у методиста заочной формы обучения.

5. Контрольная работа №1

Задача 1.1. В нагревательной печи, где температура газов $t_{ж1}$, стенка сделана из трех слоев: диасового кирпича толщиной 65 мм, красного кирпича толщиной 250 мм и снаружи слоя изоляции толщиной $\delta_{из}$. Воздух в цехе имеет температуру $t_{ж2}$. Коэффициент теплоотдачи в печи от газов к стенке α_1 , снаружи от изоляции к воздуху α_2 . Найти коэффициент теплопередачи от газов к воздуху, потери теплоты через стенку, температуры на поверхностях всех слоев. Построить график температур в стенке. Данные для решения взять из таблицы 5.1.

Таблица 5.1 – Данные к задаче 1.1

Предпоследняя цифра шифра	Материал изоляции	$\delta_{из}$, мм	$t_{ж2}$, °С	α_2 , Вт/(м ² ·К)	Последняя цифра шифра	$t_{ж1}$, °С	α_1 , Вт/(м ² ·К)
0	Асбест	100	15	25	0	1000	110
1	Новоазбозурит	90	17	30	1	1100	120
2	Шлаковата	60	19	35	2	1200	130
3	Бетон	70	21	40	3	1300	140
4	Совелит	50	23	45	4	1400	150
5	Стекловата	40	25	50	5	1500	160
6	Асбозурит	110	27	25	6	1150	170
7	Ньювель	80	29	30	7	1250	180
8	Бетон	50	31	35	8	1300	150
9	Асбест	60	33	40	9	1350	120

Задача 1.2. Газы при температуре $t_{ж1}$ передают через стенку площадью F теплоту воде, имеющей температуру $t_{ж2}$. Коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке α_1 и от стенки к воде α_2 . Определить все термические сопротивления, коэффициент теплопередачи и тепловой поток, передаваемый от газов к воде, для случаев: а) стенка чистая толщиной $\delta_{ст}$; б) стенка покрыта со стороны воды слоем накипи толщиной δ_n и со стороны газов – слоем сажи толщиной δ_c . Найти также для случая б) температуры всех слоев стенки расчетным и графическим способами и нарисовать температурный график. Данные для решения задачи взять из таблицы 5.2.

Таблица 5.2 – Данные к задаче 1.2

Предпоследняя цифра шифра	Материал стенки	$t_{ж1}$, °С	F , м ²	$t_{ж2}$, °С	Последняя цифра шифра	$\delta_{ст}$, мм	α_1 , Вт/(м ² ·К)	α_2 , Вт/(м ² ·К)	δ_n , мм	δ_c , мм
0	чугун	300	2,0	110	0	10	50	1500	1	0,5
1	титан	350	2,5	120	1	12	60	2000	2	1,0
2	алюминий	400	3,0	130	2	14	70	2500	3	1,5
3	медь	450	3,5	140	3	16	80	3000	4	2,0
4	лагунь	500	4,0	150	4	18	90	3500	5	2,5
5	сталь	550	4,5	160	5	20	100	4000	6	3,0
6	чугун	600	5,0	170	6	22	110	4500	7	1,2
7	титан	300	5,5	120	7	11	120	5000	8	1,8
8	алюминий	350	6,0	130	8	13	130	4500	2	2,4
9	сталь	400	6,5	140	9	15	140	4000	3	2,9

Задача 1.3. По стальному трубопроводу наружным диаметром d_n и толщиной 20 мм протекает газ со средней температурой $\bar{t}_{ж1}$ и коэффициентом теплоотдачи в трубе $\alpha_1 = 40 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Снаружи труба покрыта двумя слоями изоляции: слоем *A* толщиной δ_A (на поверхности трубы) и слоем *B* толщиной δ_B . На внешней поверхности изоляции температура $t_{из}$. Найти суточную потерю теплоты трубопроводом длиной l и температуру на поверхности контакта между слоями изоляции. Как изменятся потери теплоты, если слои изоляции поменять местами? Данные для решения задачи взять из таблицы 5.3.

Таблица 5.3 – Данные к задаче 1.3

Предпоследняя цифра шифра	Материал изоляции		d_n , мм	l , м	$t_{ж1}$, °С	Последняя цифра шифра	Толщина изоляции, мм		$t_{из}$, °С
	слой А	слой Б					δ_A	δ_B	
0	асбослюда	бетон	700	40	400	0	200	250	60
1	вермикулит	асбест	710	50	500	1	210	200	55
2	пеношамот	вермикулитовые плиты	730	60	600	2	220	300	50
3	шлаковата	асбест	760	70	700	3	230	350	45
4	совелит	вата минеральная	800	80	650	4	240	250	40
5	асбослюда	вермикулитовые плиты	850	90	550	5	250	220	45
6	вермикулит	бетон	910	85	450	6	260	190	50
7	пеношамот	асбест	980	75	630	7	270	160	55
8	шлаковата	бетон	1060	65	730	8	280	210	60
9	совелит	вермикулитовые плиты	1150	55	570	9	290	260	40

Задача 1.4. Электропровод диаметром d покрыт изоляцией толщиной δ . По проводу проходит ток силой I . Температура окружающего воздуха t_b , а коэффициент теплоотдачи к воздуху α . Найти температуры на поверхности провода и изоляции, мощность внутренних источников теплоты. Удельное электрическое сопротивление алюминия $2,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, меди $1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Данные для решения задачи взять из таблицы 5.4.

Таблица 5.4 – Данные к задаче 1.4

Предпоследняя цифра шифра	Материал провода	d , мм	α , Вт/(м ² ·К)	Последняя цифра шифра	Материал изоляции	δ , мм	t_b , °С	I , А
0	Алюминий	0,5	6	0	Резина	0,5	0	3
1	Медь	1,0	8	1	Винипласт	1,0	4	5
2	Алюминий	1,5	10	2	Полиэтилен	1,5	8	7
3	Медь	2,0	12	3	Резина	2,0	12	9
4	Алюминий	2,5	14	4	Винипласт	1,5	16	11
5	Медь	3,0	16	5	Полиэтилен	1,0	20	13
6	Алюминий	3,5	14	6	Резина	0,5	16	15
7	Медь	4,0	12	7	Винипласт	2,0	12	13
8	Алюминий	4,5	10	8	Полиэтилен	2,0	10	10
9	Медь	5,0	8	9	Резина	1,5	7	8

6. Контрольная работа №2

Задача 2.1. Газ с абсолютным давлением p и средней температурой \bar{t}_r протекает по горизонтальной трубе. Расход газа m , внутренний диаметр трубы d , длина l и средняя температура стенки трубы \bar{t}_c .

Найти:

- 1) средний коэффициент теплоотдачи от газа к стенке трубы;
- 2) тепловой поток;
- 3) во сколько раз изменится коэффициент теплоотдачи, если скорость газа увеличить в 3 раза;
- 4) во сколько раз изменится коэффициент теплоотдачи, если уменьшить диаметр трубы в 2 раза при неизменном расходе газа?

Данные для решения задачи взять из таблицы 6.1.

Таблица 6.1 – Данные к задаче 2.1

Предпоследняя цифра шифра	Газ	$p \cdot 10^{-5}$, Па	\bar{t}_r , °C	m , кг/с	Последняя цифра шифра	d , мм	l , м	\bar{t}_c , °C
0	Воздух	1,5	50	0,4	0	100	10	20
1	Азот	2,0	150	0,3	1	120	15	140
2	Углекислый газ	2,5	100	0,35	2	110	11	40
3	Кислород	3,0	180	0,2	3	100	14	120
4	Водород	3,5	200	0,25	4	90	12	60
5	Воздух	4,0	350	0,1	5	80	13	110
6	Азот	3,5	180	0,15	6	100	12	30
7	Углекислый газ	3,0	200	0,2	7	95	11	145
8	Кислород	2,5	200	0,25	8	85	10	20
9	Водород	2,0	75	0,3	9	115	16	130

Задача 2.2. На наружной поверхности вертикальной трубы диаметром d и длиной l конденсируется сухой насыщенный пар при давлении p . Средняя температура этой поверхности \bar{t}_c . Определить коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара. Во сколько раз изменится коэффициент теплоотдачи, если трубу расположить горизонтально? Найти количество сконденсировавшегося пара при каждом положении трубы, считая, что переохлаждения конденсата нет. Данные для решения задачи взять из таблицы 6.2.

Таблица 6.2 – Данные к задаче 2.2

Предпоследняя цифра шифра	d , мм	l , мм	Последняя цифра шифра	$p \cdot 10^{-5}$, Па	\bar{t}_c , °C
0	30	1,2	0	7,92	150
1	50	2,0	1	4,76	142
2	36	1,8	2	10,03	170
3	44	1,4	3	6,18	150
4	40	1,6	4	12,55	178
5	38	1,8	5	7,92	162
6	32	1,6	6	15,55	187
7	46	1,3	7	10,03	167
8	52	1,5	8	6,18	145
9	30	1,7	9	12,55	180

Задача 2.3. Труба с наружным диаметром d и длиной l имеет на поверхности температуру $t_{\text{пов}}$. Определить тепловой поток в процессе лучистого теплообмена между трубой и окружающей средой для двух случаев: 1) труба находится в большом помещении, стены которого имеют температуру t_c ; 2) труба находится в бетонном канале сечением 300×300 мм при температуре стенок канала t_c . Данные для решения взять из таблицы 6.3.

Таблица 6.3 – Данные к задаче 2.3

Предпоследняя цифра шифра	Материал трубы	d , мм	l , м	Последняя цифра шифра	$t_{\text{пов}}$, °C	t_c , °C
0	Алюминий шероховатый	70	4	0	250	10
1	Латунь полированная	90	5	1	300	15
2	Сталь шероховатая	110	6	2	370	20
3	Чугун обточенный	130	7	3	300	25
4	Алюминий полированный	150	8	4	310	30
5	Никель окисленный	170	9	5	400	35
6	Хром	100	10	6	210	40
7	Медь окисленная	80	11	7	320	30
8	Алюминий полированный	120	12	8	270	20
9	Сталь полированная	140	15	9	350	10

Задача 2.4. В цеховом помещении, где температура воздуха и стен t_b , расположена горизонтальная труба наружным диаметром d и длиной l . Она имеет температуру на поверхности t_n и охлаждается за счет излучения и свободного движения воздуха. Определить: а) коэффициент теплоотдачи излучением; б) коэффициент теплоотдачи конвекцией; в) тепловой поток от трубы отдельно естественной конвекцией и излучением. Данные для решения задачи взять из таблицы 6.4.

Таблица 6.4 – Данные к задаче 2.4

Предпоследняя цифра шифра	d , мм	l , м	Материал трубы	Последняя цифра шифра	t_b , °C	t_n , °C
0	150	10	Алюминий шероховатый	0	5	70
1	200	12	Сталь окисленная	1	10	80
2	250	14	Латунь прокатанная	2	15	90
3	300	16	Медь полированная	3	20	100
4	350	18	Чугун шероховатый	4	25	110
5	400	20	Медь окисленная	5	7	120
6	180	22	Железо литое необработанное	6	12	130
7	270	24	Латунь окисленная	7	17	140
8	380	18	Алюминий окисленный	8	3	120
9	330	12	Сталь шероховатая	9	27	90

Теплопроводность материалов [1]

Материал	λ , Вт/(м·К)
Алюминий	204
Асбест	0,151
Асбозурит	0,213
Асбослюда	0,208
Бетон	1,28
Бронза	64
Вата минеральная	0,052
Вермикулит	0,328
Вермикулитовые плиты	0,186
Винипласт	0,165
Кирпич:	
динасовый	0,35
красный	0,76
силикатный	0,82
шамотный	1,14
Латунь	93
Лед	2,22
Масляный слой загрязнения	0,15
Медь	384
Накипь	1,75
Новоазбозурит	0,175
Ньювель	0,11
Пенопласт	0,05
Пеношамот	0,29
Полиэтилен	0,29
Пробковые плиты	0,047
Резина	0,16
Ржавчина	1,15
Сажа	0,09
Снег уплотненный	0,46
Совелит	0,09
Сосна поперек волокон	0,151
Сталь углеродистая	45
Сталь нержавеющая	18
Стекловата	0,047
Стекло обыкновенное	0,745
Титан	15
Чугун	90
Шлаковата	0,16
Фарфор	1,04

Физические свойства сухого воздуха
($p_B = 760$ мм рт. ст. $\approx 1,013 \cdot 10^5$ Па)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	11,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5},$ Па	$\rho, \text{кг/м}^3$	$i,$ кДж/кг	$c_p,$ кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8,$ м ² /с	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	$\beta \cdot 10^4,$ К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4,$ Н/м	Pr
0	1,013	999,9	0	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	1,013	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	0,70	741,6	9,52
20	1,013	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	1,013	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,013	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,013	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	676,9	3,54
60	1,013	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	469,4	0,478	5,11	662,2	2,98
70	1,013	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	1,013	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,013	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95
100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,55	876,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93
210	19,08	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	23,20	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148	14,8	331,6	0,89
230	27,98	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	15,9	310,0	0,88

Продолжение приложения 3

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5},$ Па	$\rho, \text{кг/м}^3$	$i,$ кДж/кг	$c_p,$ кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8,$ м ² /с	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	$\beta \cdot 10^4,$ К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4,$ Н/м	Pr
240	33,48	813,6	1037,5	4,756	62,8	16,2	114,8	0,141	16,8	285,5	0,87
250	39,78	799,0	1085,7	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	18,1	261,9	0,86
260	46,94	784,0	1135,7	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135	19,7	237,4	0,87
270	55,05	767,9	1185,3	5,070	59,0	15,1	102,0	0,133	21,6	214,8	0,88
280	64,19	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	98,1	0,131	23,7	191,3	0,90
290	74,45	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129	26,2	168,7	0,93
300	85,92	712,5	1344,9	5,736	54,0	13,2	91,2	0,128	29,2	144,2	0,97
310	98,70	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128	32,9	120,7	1,03
320	112,90	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128	38,2	98,10	1,11
330	128,65	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	146,08	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127	53,4	56,70	1,39
350	165,37	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,88	72,6	0,126	66,8	38,16	1,60
360	186,74	528,0	1761,5	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126	109	20,21	2,35
370	210,53	450,5	1892,5	40,321	33,7	1,86	56,9	0,126	264	4,709	6,79

Физические свойства водяного пара на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho'', \text{кг/м}^3$	$i'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	Pr
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,372	18,58	20,02	11,97	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	15,07	12,46	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	11,46	12,85	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,972	8,85	13,24	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	6,89	13,54	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,3	2,395	2,884	4,728	5,47	13,93	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	4,39	14,32	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,583	3,128	2,939	3,57	14,72	1,21
180	10,03	5,156	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	2,93	15,11	1,25
190	12,55	6,397	2786,4	1978,8	2,586	3,419	1,872	2,44	15,60	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,023	3,547	1,492	2,03	15,99	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	1,71	16,38	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,983	1,45	16,87	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	1,24	17,36	1,54
240	33,48	16,76	2803,0	1765,6	3,881	4,291	0,658	1,06	17,76	1,61
250	39,78	19,98	2801	1715,8	4,158	4,512	0,544	0,913	18,25	1,68
260	46,94	23,72	2796	1661,4	4,468	4,803	0,453	0,794	18,84	1,75
270	55,05	28,09	2709	1604,4	4,185	5,106	0,378	0,688	19,32	1,82
280	64,19	33,19	2780	1542,9	5,234	5,489	0,317	0,600	19,91	1,90
290	74,45	39,15	2766	1473,3	5,694	5,827	0,261	0,526	20,60	2,01
300	85,92	46,21	2749	1404,3	6,280	6,268	0,216	0,461	21,29	2,13
310	98,70	54,58	2727	1325	7,118	6,840	0,176	0,403	21,97	2,29
320	112,90	64,72	2700	1238	8,206	7,510	0,141	0,353	22,85	2,50
330	128,65	77,10	2666	1140	9,881	8,260	0,108	0,310	23,93	2,86
340	146,08	92,76	2622	1027	12,35	9,300	0,0811	0,272	25,20	3,35
350	165,37	113,6	2564	893	16,24	10,70	0,0581	0,234	26,58	4,03
360	186,74	144,0	2481	719,7	23,03	12,790	0,0386	0,202	29,13	5,23
370	210,53	203,0	2331	438,4	56,52	17,10	0,0150	0,166	33,73	11,10

Приложение 5

Поправка $\varepsilon_l = f(l/d_{\text{экв}}; \text{Re}_{\text{ж}})$ на начальный термический участок при турбулентном течении в трубах [1]

$\text{Re}_{\text{ж}}$	При отношении $l/d_{\text{экв}}$						
	5	10	15	20	30	40	50 и более
$1 \cdot 10^4$	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1
$2 \cdot 10^4$	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1
$5 \cdot 10^4$	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1
$1 \cdot 10^5$	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1
$1 \cdot 10^6$	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1

Приложение 6

Поправка $\varepsilon_l = f(l/d_{\text{экв}})$ на начальный термический участок при ламинарном течении в трубах [1]

$l/d_{\text{экв}}$	5	10	15	20	30	40	50 и более
ε_l	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1

Приложение 7

Удельная теплоемкость газов c_p , кДж/(кг·К), при давлении 0,1 МПа* [1]

T, K	Азот	Аргон	Водород	Кислород	Окись углерода	Двуокись углерода
260	1,041	0,522	14,15	0,916	1,040	–
280	1,041	0,522	14,24	0,917	1,040	0,830
300	1,041	0,522	14,31	0,920	1,041	0,851
350	1,042	0,521	14,43	0,929	1,043	0,900
400	1,045	0,521	14,48	0,942	1,048	0,942
450	1,050	0,521	14,50	0,956	1,055	0,981
500	1,056	0,521	14,52	0,972	1,064	1,020

* С допустимым приближением данными таблицы можно пользоваться и при давлении порядка несколько бар

**Величины A, E, D, M для расчета теплоотдачи
при конденсации водяного пара [1]**

$t_s, ^\circ\text{C}$	A	E	$A^{0,78}$	$D = EA^{0,78}$	M
20	5,16	2469	3,60	8888	6136,6
30	7,88	1942	5,00	9717	6621,8
40	11,4	1575	6,67	10511	7080,9
50	15,6	1307	8,52	11141	7474,9
60	20,9	1105	10,71	11832	7831,6
70	27,1	948	13,11	12431	8163,3
80	34,5	820	15,83	12981	8450,4
90	42,7	718	18,69	13423	8711,3
100	51,5	637	21,64	13783	8918,5
110	60,7	575	24,60	14143	9076,0
120	70,3	523	27,58	14425	9212,8
130	82,0	472	31,10	14680	9342,9
140	94,0	431	34,60	14911	9444,6
150	107	394	38,27	15080	9533,5
160	122	361	42,40	15306	9605,2
170	136	332	46,15	15321	10263,5
180	150	310	49,81	15442	9608,3
190	167	285	54,16	15437	9601,9
200	182	266	57,92	15408	9543,8
210	197	249	61,61	15342	9450,4
220	218	227	66,68	15136	9326,0
230	227	217	68,82	14933	9186,8
240	246	202	73,27	14801	9046,2
250	264	188	77,42	14555	8888,0
260	278	176	80,60	14186	8656,4
270	296	164	84,65	13882	8395,1
280	312	152	88,19	13405	8112,4
290	336	139	93,44	12988	7817,4
300	354	128	97,32	12457	7473,4

Примечание. Обозначения:

$$A = \frac{\lambda}{r\rho v} \left(\frac{g}{v^2} \right)^{1/3}, \text{ м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$$

$$E = r\rho v, \text{ Вт/м}$$

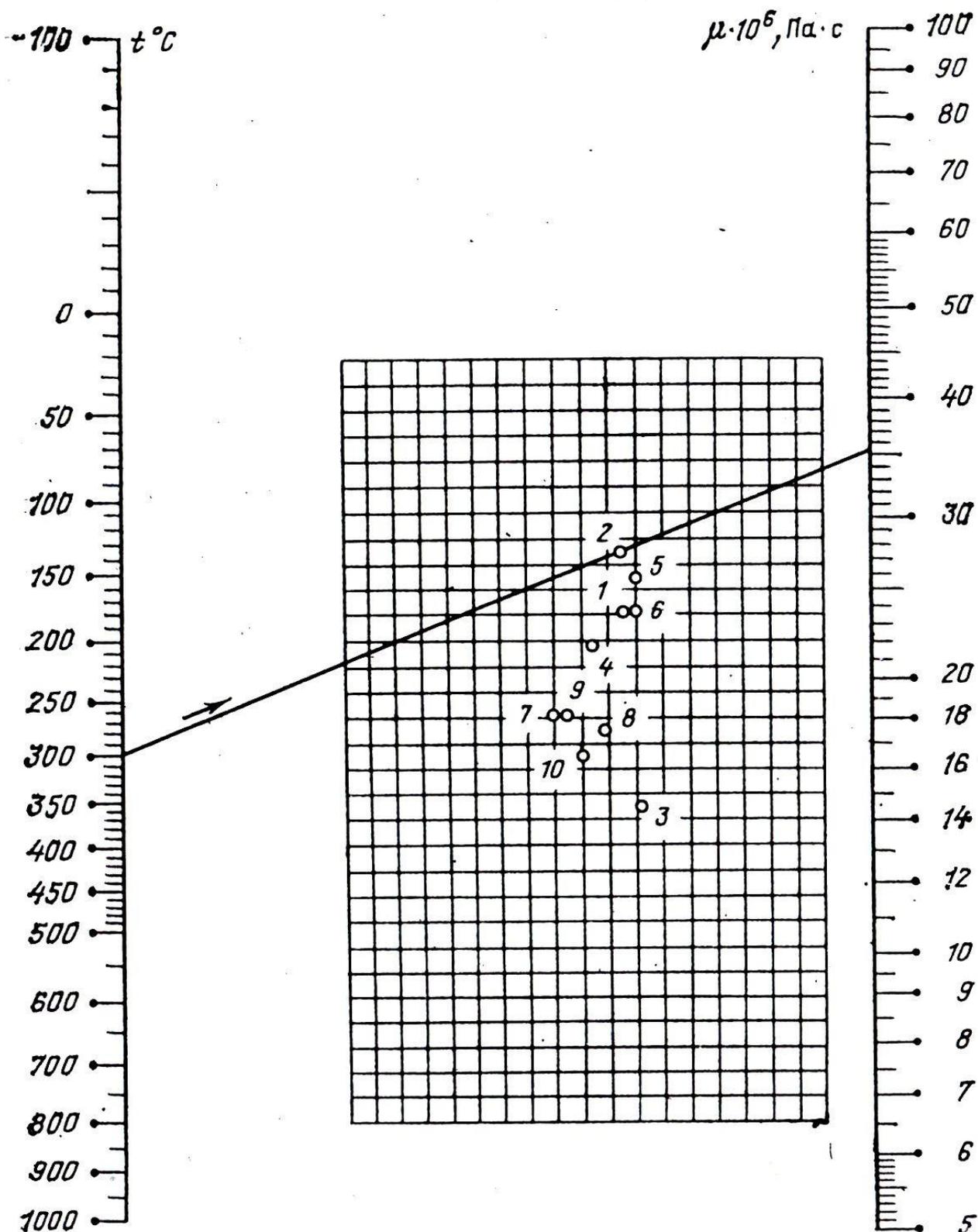
$$D = (r\rho v)^{0,22} \lambda^{0,78} \left(\frac{g}{v^2} \right)^{0,26}, \text{ Вт}/(\text{м}^{1,78} \cdot \text{К}^{0,78})$$

$$M = \left[2,71 r \lambda^3 \frac{(\rho - \rho_n)}{v} \right]^{0,25}, \text{ Вт}/(\text{м}^{1,75} \cdot \text{К}^{0,75})$$

Коэффициент теплового излучения различных материалов

Материал и характер поверхности	ϵ	Материал и характер поверхности	ϵ
Алюминий полированный	0,048	Хром	0,17
Алюминий шероховатый	0,055	Цинк окисленный	0,11
Алюминий окисленный	0,15	Асбестовый картон	0,96
Железо, свежеработанное наждаком	0,242	Алюминиевая краска	0,5
Железо окисленное	0,736	Бетон	0,8
Железо литое необработанное	0,91	Гипс	0,903
Сталь окисленная	0,80	Дуб строганный	0,895
Сталь окисленная шерохова- тая	0,95	Кварц плавленный шерохо- ватый	0,932
Сталь полированная	0,54	Кирпич диносовый шерохо- ватый неглазурованный	0,8
Чугун обточенный	0,65	Кирпич диносовый шерохо- ватый глазурованный	0,85
Чугун шероховатый окислен- ный	0,96	Кирпич красный шерохова- тый	0,93
Латунь окисленная	0,6	Кирпич шамотный глазури- рованный	0,75
Латунь полированная	0,03	Кирпич огнеупорный	0,85
Латунь прокатанная	0,20	Масляная краска	0,94
Медь окисленная	0,62	Резина мягкая серая шерохо- ватая	0,589
Медь полированная	0,02	Стекло гладкое	0,937
Нихромовая проволока	0,96	Ламповая сажа 0,075 мм и больше	0,95
Никель окисленный	0,4	Фарфор глазурованный	0,924
Серебро полированное	0,02	Штукатурка шероховатая из- вестковая	0,91

Динамическая вязкость μ газов при атмосферном давлении, Па·с [1]

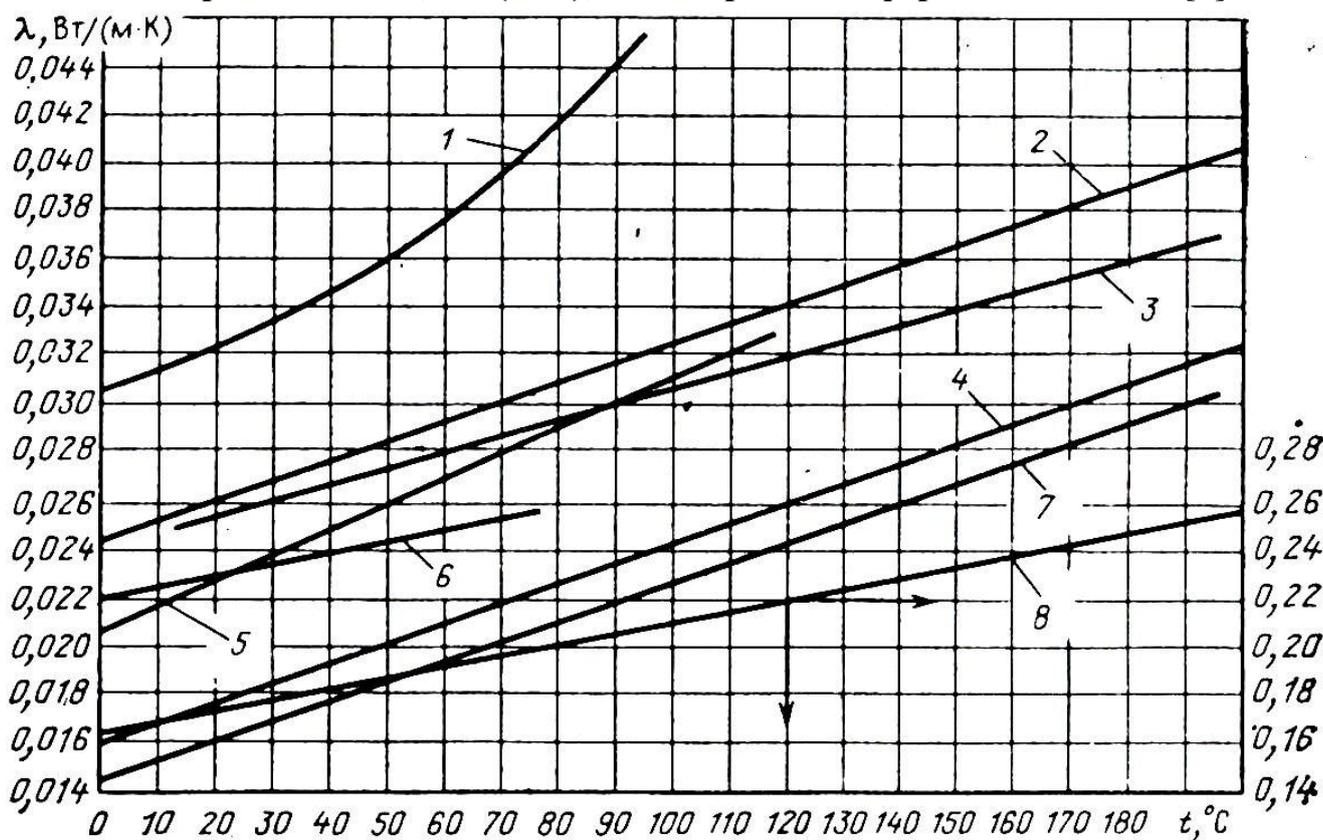


1 – азот; 2 – аргон; 3 – водород; 4 – диоксид углерода; 5 – кислород;
6 – оксид углерода; 7 – водяной пар; 8 – метан; 9 – аммиак; 10 – этан.

Пример использования: для аргона при $300\text{ }^\circ\text{C}$ $\mu = 35,5 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

С допустимым приближением данными номограммы можно пользоваться и при давлении, в несколько раз превышающих атмосферное.

Теплопроводность λ , Вт/(м·К), газов при атмосферном давлении [1]



1 – метан; 2 – кислород; 3 – азот; 4 – водяной пар; 5 – аммиак;
 6 – оксид углерода; 7 – диоксид углерода; 8 – водород (правая шкала).

С допустимым приближением данными диаграммы можно пользоваться и при давлениях, в несколько раз превышающих атмосферное.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ И РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авчухов В.В., Паюсте В.В. Задачник по процессам тепломассообмена: учебное пособие для студентов вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
2. Воскресенский В.Ю. Тепломассообмен: методические указания и контрольные задания для студентов-заочников энергетических специальностей вузов. – 4-е изд. – М.: Высш. шк., 1990. – 63 с.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
4. Кудинов А.А. Тепломассообмен: учебное пособие для вузов. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 374 с.
5. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1969. – 264 с.
6. Теплотехника [Текст]: учеб. для вузов / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2005. – 672 с.
7. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – 2-е изд., стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
8. Рудобашта С.П. Теплотехника: учебник для вузов. – 2-е изд., доп. – М.: Издательство «Перо», 2015. – 672 с.
9. Смородина Т.В. Основы теплотехники и применение тепла в сельском хозяйстве: методические указания. – Балашиха: ВСХИЗО, 1983. – 35 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. Объем дисциплины и виды учебной работы для студентов заочной формы обучения.....	5
2. Тематический план лекций и семинарских занятий по дисциплине для студентов заочной формы обучения.....	5
3. Методические указания по изучению дисциплины.....	6
Тема 1. Основные положения учения о теплопроводности.....	6
Тема 2. Теплопроводность при стационарном режиме.....	7
Тема 3. Нестационарные процессы теплопроводности.....	8
Тема 4. Основные положения конвективного теплообмена.....	9
Тема 5. Подобие и моделирование процессов конвективного теплообмена	11
Тема 6. Теплоотдача при вынужденном продольном омывании плоской поверхности (пластины).....	12
Тема 7. Теплоотдача при вынужденном течении жидкости в трубах.....	13
Тема 8. Теплоотдача при вынужденном поперечном омывании труб и пучков труб.....	15
Тема 9. Теплоотдача при свободном движении жидкости.....	16
Тема 10. Теплообмен при конденсации чистого пара.....	17
Тема 11. Теплообмен при кипении однокомпонентных жидкостей.....	18
Тема 12. Тепло- и массообмен в двухкомпонентных средах.....	20
Тема 13. Основные законы теплового излучения.....	21
Тема 14. Теплообмен излучением между твердыми телами, разделенными прозрачной средой.....	22
Тема 15. Теплообмен в поглощающих и излучающих средах.....	23
4. Методические указания по выполнению контрольных работ.....	24
5. Контрольная работа №1.....	25
6. Контрольная работа №2.....	27
Приложение.....	29
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ И РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	39

Авторы-составители
Очиров Вадим Дансарунович
Федотов Виктор Анатольевич

ТЕПЛОМАССОБМЕН

методические указания и контрольные задания для студентов
высших аграрных учебных заведений, обучающихся
по направлениям подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
(уровень бакалавриата) и 35.03.06 Агроинженерия (уровень бакалавриата)

Лицензия на издательскую деятельность
ЛР №070444 от 11.03.1998 г.

Подписано в печать 18.06.2018 г.
Формат 60×86/16
Печ. л. 1,9
Тираж 50 экз.

Издательство Иркутского государственного
аграрного университета им. А.А. Ежевского
664038, Иркутская обл., Иркутский р-н,
пос. Молодежный