

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Электронный курс тепломассообмена в энергетических установках представляет собой комплекс электронных материалов, включающий

- *Электронную книгу* – структурированный гипертекстовый документ с изложением основных разделов тепломассообмена как базовой научной и инженерной учебной дисциплины, в соответствии с учебными планами Московского Энергетического института (ТУ)
- *Mathcad-документы* с полным набором компьютерных моделей для рассматриваемых в электронном учебнике проблем
- *Лабораторные работы*.

Электронный курс построен на базе стандартных информационных технологий, доступных широкому кругу преподавателей, инженеров и студентов. Текстовые документы создаются в Microsoft Word и конвертируются, в зависимости от варианта представления курса, либо в PDF формат, поддерживаемый свободным программным обеспечением, либо в HTML формат.

Изучение предмета организуется как разработка физических и математических моделей разного уровня сложности с их последующей компьютерной реализацией, преимущественно в математическом пакете Mathcad. Учебные компьютерные модели служат базой для проведения практических занятий и лабораторных работ, выполнения расчетных заданий и курсовых проектов. Специальная глава посвящена применению пакета Matlab и его расширений для численного интегрирования двухмерных задач. Демонстрируются сложные многомерные термогидродинамические поля в виде анимаций, полученных в специализированных математических пакетах.

В качестве базового вычислительного инструмента принят Mathcad, но это не ограничивает применений Электронного курса для тех, кто работает с другими инженерными математическими пакетами. Форма записи математических соотношений в Mathcad совпадает с общепринятой «книжной» нотацией, поэтому тексты вычислительных программ в Электронном курсе можно рассматривать как удобную алгоритмическую запись, которую нетрудно транслировать на другой язык программирования.

Пользователь имеет возможность двумя способами изучать содержание компьютерных моделей. Во-первых, читая Электронную книгу, где программные блоки приводятся в качестве иллюстраций и снабжаются подробными комментариями. Во-вторых, работая с вычислительными программами в среде Mathcad, когда можно изменять входные параметры или даже тексты программ и наблюдать изменения в численных результатах, диаграммах и анимациях.

Электронная форма структурированного учебного курса обеспечивает удобную навигацию, благодаря перекрестным ссылкам на формулы,

рисунки, вычислительные программы, термины, интернет-источники. Широко используются «живые» иллюстрации, т.е. анимации нестационарных температурных полей, погранслоевых течений на проницаемых поверхностях и т.п. Электронный курс интерактивен – он предоставляет возможность проводить численные эксперименты с компьютерными моделями, изучать и модифицировать открытые коды программ.

Главная методическая установка курса состоит в том, чтобы добиться понимания физического содержания процессов теплообмена, применяя компьютерное моделирование и визуализацию результатов (в том числе, анимацию), и снабдить обучаемого современным расчетным инструментом для решения актуальных инженерных задач.

Электронная книга состоит из шести частей:

*Часть 1 Принципы теплообмена*

*Часть 2 Теплопроводность*

*Часть 3 Конвективный теплообмен*

*Часть 4 Двухфазный теплообмен*

*Часть 5 Теплообмен излучением*

*Часть 6 Теплообменники*

В *части первой* Электронного курса сформулированы законы переноса теплоты, вещества, импульса (гл. 1), законы сохранения и дифференциальные уравнения теплообмена (гл. 2). Рассмотрены способы постановки краевых условий (гл. 3). В кратком изложении даны основы неравновесной термодинамики (гл. 4). Показано, как решаются реальные сложные задачи теплообмена, описываемые выведенными уравнениями в частных производных (гл. 5 «Компьютерное моделирование теплообмена: пакет Matlab»).

*Часть вторая* посвящена задачам теплопроводности. В гл. 6 Электронного курса изучаются одномерные стационарные задачи, являющиеся основой для расчета теплопередачи через плоскую, цилиндрическую и сферическую стенки. Ставится проблема интенсификации теплопередачи посредством оребрения, решается задача о теплопроводности вдоль стержня, излагается методика оптимизации оребрения, иллюстрируемая соответствующей компьютерной программой.

Гл. 7 посвящена специальному вопросу теплопроводности в твэле ядерного реактора. Расчеты демонстрируют характерное распределение температуры в стержне с внутренними источниками, гелиевом зазоре и циркониевой оболочке.

В гл. 8 подробно рассмотрены классические задачи нестационарной теплопроводности пластины и длинного цилиндра как прообразы пусковых и переходных режимов в элементах энергетического оборудования. Анимационные видеоклипы применяются для иллюстрации асимптотических пределов (малых и больших времен, малых и больших чисел Био). Формулируется теорема о перемножении решений и дается перечень геометрических тел, для которых возможны ее применения. Особое внимание уделено задаче о прогреве полуограниченного массива

(получена оценка толщины температурного пограничного слоя, введено понятие автомодельных переменных; как расчетный пример, решена задача Томсона об остывании Земли). Подробно рассмотрены температурные поля, создаваемые линейными и точечными источниками тепла, ввиду их важности для техники измерения теплофизических свойств.

В гл. 9 изложены основы численных методов теплопроводности. Сопоставлены явная и неявная схемы дискретизации. Подробно, с реализацией в виде вычислительной программы, разработан метод прогонки. Приведены примеры компьютерного моделирования периодических тепловых воздействий. Показано, как применяются встроенные функции инженерных математических пакетов для интегрирования уравнений в частных производных. Рассмотрены численные методы для многомерных задач. Изложение поддерживается работой с многочисленными компьютерными моделями.

В главе 10 «Исследование одномерных нестационарных температурных полей методом численного эксперимента» вводится обобщенное одномерное дифференциальное уравнение для расчета нестационарных полей в тонких стержнях, пластинах, оболочках. Учитывается теплообмен на боковых поверхностях и продольный конвективный перенос. Эта глава является базой для расчетных заданий, курсовых учебно-исследовательских и квалификационных работ студентов. Перечень решаемых задач очень широк: это базовые задачи курса с усложненными краевыми условиями, моделирование мощных импульсных воздействий, например, с целью поверхностного упрочнения или термической полировки, распространение фронта фазового превращения, анализ гиперболического уравнения теплопроводности и др. Глава содержит также поучительный пример анализа скрытых ошибок (или недостатков) стандартного математического обеспечения.

Тема *третьей части* Электронного курса – конвективный тепломассообмен. Центральное место занимает гл. 11, в которой излагаются инженерные методы расчета тепломассообмена в энергетических установках. Посредством наглядных модельных представлений, методами оценки порядка величин выводятся основные закономерности конвективного теплообмена при вынужденной и свободной конвекции. Показано, как, увеличивая скорость течения, можно создать высокие градиенты температуры у стенки и, следовательно, обеспечить большие значения теплового потока и коэффициента теплоотдачи. Приводятся критериальные расчетные соотношения для основных конфигураций, таких как продольное обтекание пластин и криволинейных профилей, поперечное обтекание труб и пучков труб, течение в трубах и каналах. Рассмотрен метод интерполяции между асимптотами, посредством которого получены *глобальные* аппроксимации для теплоотдачи, пригодные в широкой области изменения определяющих параметров (чисел Рейнольдса, Прандтля, Рэлея). Задачи массообмена решаются в рамках аналогии между процессами теплообмена и массообмена.

Глава 12 посвящена фундаментальным основам конвективного теплообмена в пограничных слоях. Показано, как, исходя из представлений о тонком пограничном слое при течениях с большими числами Рейнольдса, посредством преобразований подобия (метода автомодельных переменных) удастся свести сложную задачу с уравнениями в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) (для динамического пограничного слоя – к уравнению Фолкнера–Скэн). Разработаны необходимые компьютерные программы и проведены расчеты теплообмена для вынужденной и свободной конвекции, в том числе, на проницаемых стенках и с продольными градиентами давления (задачи управления пограничным слоем). Получены формулировки т.н. стандартного закона теплообмена как соотношения между локальным коэффициентом теплоотдачи и локальной толщиной пограничного слоя.

В гл. 14 изложены основы *интегрального метода* на примере анализа локальной теплоотдачи при поперечном обтекании трубы. Эта задача связана с проблемой надежности высокотемпературных поверхностей нагрева, например, пароперегревателя тепловой электростанции. Интегральный метод позиционируется как простой способ решения сложных задач пограничного слоя. Имеется в виду, что применение дифференциальной модели на базе полных уравнений в частных производных требует высокой квалификации и доступа к специальному программному обеспечению, а простая алгебраическая модель на базе (эмпирических) критериальных формул может оказаться слишком грубой или недостаточной при решении реальной инженерной задачи.

В таких случаях, для задач со сложными граничными условиями и внешними воздействиями (ускорением или замедлением потока, вдувом или отсосом через проницаемую стенку) эффективно применение интегрального метода. Необходимый математический аппарат – это интегрирование ОДУ, возможно, со сложной структурой правой части. В результате, математическая и компьютерная модель локальной теплопередачи оказывается сложнее обычного уравнения теплопередачи (она принадлежит к классу *одномерных дифференциальных моделей* теплообменных устройств), но позволяет рассчитать распределение температуры стенки и локализовать опасные зоны.

Гл. 15 «Теплообмен: горение, защита от высокотемпературных потоков» содержит дальнейшие приложения интегрального метода. Важной особенностью обеих рассмотренных здесь задач – горения частицы углерода и защиты от высокотемпературных потоков посредством вдува – является *проницаемость* стенки, т.е. отличие от нуля поперечного потока массы (или поперечной скорости) на стенке. Дополнительным (по сравнению с гл. 14) объектом изучения становится интегральное уравнение *диффузионного* пограничного слоя. Тема совместно происходящих процессов тепло- и массообмена развивается далее в гл. 20.

*Часть четвертая* Электронного курса посвящена двухфазному теплообмену.

Гл. 17 «Элементы термогидродинамики двухфазных сред» содержит необходимую вводную информацию для задач тепломассообмена с фазовыми превращениями. Кратко рассмотрены условия фазового равновесия с учетом поверхностного натяжения. Обсуждается проблема частоты нуклеации. Выведены формулы для критического радиуса зародышей новой фазы (пузырьков или капель). Рассмотрены эффекты газокинетического сопротивления, сформулированы условия сопряжения на границе раздела фаз, описан феномен гидродинамической неустойчивости границы раздела.

В гл. 18 рассмотрен теплообмен при кипении в большом объеме и при кипении в каналах. Изложение модели Д.А.Лабунцова для пузырькового кипения дополняется обращением к презентации (в формате «.ppt») расширенной компьютерной модели, сконструированной из известных элементарных механизмов, таких как перегрев жидкости при ее возобновляющемся контакте со стенкой, зарождение пузырьков на активных центрах парообразования, рост пузырьков в перегретой жидкости, испарение тонкой пленки под пузырьками. Модель иллюстрируется анимациями роста пузырьков при умеренных и высоких давлениях кипения.

Кипение в каналах также представлено компьютерной моделью, воспроизводящей различные режимы, включая кризисные. Характерным для стиля Электронного курса является подчеркнутое внимание к расчетным процедурам, чрезвычайно важным для реальной инженерной практики. Например, изображение кривых кипения (кривых Нукиямы) не является просто рисунком – в действительности это компьютерный график, построенный специальной компьютерной программой, описывающей все режимы кипения и переходы между ними. Вычисления дают реальное представление о характерных числовых значениях для двух важных теплоносителей: воды и «электронной жидкости» CF72 и могут быть повторены для разных давлений кипения.

Глава 19 содержит развернутое изложение теории пленочной конденсации. Основная идея – это раздельное рассмотрение четырех элементарных моделей конденсации (гравитационная пленка, ламинарная и турбулентная, плюс сдвиговая пленка, ламинарная и турбулентная) с последующим объединением в «глобальную» модель посредством метода интерполяции между асимптотами.

Рекомендуется акцентировать внимание на модели *турбулентной* сдвиговой пленки. Благодаря строго выполняемому условию постоянства напряжения трения, удается наглядно продемонстрировать применение Прандтлевской модели пути смещения (с демпфирующей поправкой Ван-Драйста). На рассчитанных профилях скорости и температуры в турбулентной пленке конденсата выделяются области пристенного вязкого течения, логарифмического распределения и внешнего течения. Полезным «побочным» результатом являются т.н. пристенные функции для расчета турбулентных потоков. Важным добавлением к модели является анализ межфазной турбулентности с учетом сил поверхностного натяжения.

Как обычно в Электронном курсе, изложение теории поддерживается разработкой компьютерных моделей. В данном случае это модель воздухоохлаждаемого конденсатора, принадлежащая к классу *одномерных дифференциальных моделей* тепломассообменных устройств.

Заключает главу формулировка обобщенной модели пленочной конденсации на поверхностях произвольной формы с учетом градиентов капиллярного давления.

Глава 20 «Тепломассообмен в парогазовом потоке при конденсации и испарении» является логическим продолжением глав 14 и 15 для задач двухфазного теплообмена. В прикладном отношении, важен эффект «отравления» конденсационных устройств накапливающимися по ходу парогазового потока примесями неконденсирующихся газов. В устройствах испарительного охлаждения, таких как градирни энергетических установок или промышленные кондиционеры, тепломассообмен в парогазовой среде является основным процессом, лимитирующим их производительность. То же относится к конденсационным установкам для улавливания влаги из уходящих газов (продуктов сгорания).

Анализ осуществляется интегральным методом пограничного слоя. Для модельной задачи решаются уравнения динамического, теплового и диффузионного пограничных слоев с учетом фактора проницаемости поверхности раздела (т.е. отличия от нуля поперечного потока массы на границе). Результаты обобщаются методом факторизации и представляются удобными аппроксимациями.

Читателю предоставляется возможность провести самостоятельные исследования работы конденсатора из парогазовой смеси, запустив прилагаемую компьютерную модель. Смысловым центром вычислительной программы является расчет температуры и концентрации на поверхности раздела фаз как важнейших внутренних характеристик процесса.

В части пятой Электронного курса рассматривается радиационный теплообмен.

Гл. 21 содержит основные определения и законы теплового излучения (закон Планка, закон Стефана–Больцмана, закон Ламберта). Обсуждаются ограничения, накладываемые модельными представлениями о свойствах «серости» и «диффузности» тел, участвующих в радиационном теплообмене.

В гл. 22 «Теплообмен излучением в прозрачной среде» центральным понятием является угловой коэффициент излучения. Для диффузных поверхностей и при равномерном распределении плотности эффективного излучения *угловой коэффициент излучения зависит исключительно от геометрии системы* и будет одинаковым для геометрически подобных конфигураций. Это важное свойство угловых коэффициентов позволяет применить простую матричную модель для расчета сложных конфигураций.

Получены решения для замкнутой системы изотермических поверхностей, а также для задачи со смешанными условиями, когда на некоторых поверхностях задана плотность результирующего потока излучения (например, нулевая для адиабатной поверхности огнеупорной обмуровки парогенератора). Показано, как учитывается теплопроводность и

конвекция в прозрачной среде. Приведены аналитические решения для базовых простых систем. Рассмотрены расчетные примеры: задача о радиационных заморозках, задача об интенсифицированном высокотемпературном газовом теплообменнике, задача об экранных поверхностях нагрева в парогенераторе, задача об орбитальной космической платформе. Компьютерная модель орбитальной платформы предоставляется для численных экспериментов по оптимизации ее теплового режима.

В гл. 23 «Теплообмен излучением в системе с излучающим и поглощающим газом» детально рассмотрены ограничения, накладываемые используемой на практике моделью «серого» газа, с тем чтобы инженер сохранял контроль над результатами при использовании этого приближения. Сформулирована система линейных уравнений для радиационного теплообмена при заданных температурах газа и поверхностей.

Если температуры поверхностей заранее неизвестны и необходимо привлекать уравнение теплопередачи для граничных поверхностей (например, задавать температуру пара в трубах пароперегревателя и коэффициент теплоотдачи при течении перегретого пара в трубе), определяющие уравнения становятся нелинейными. Для экспериментов с такой сложной радиационно-конвективной системой предоставляется компьютерная модель, разработанная в программной среде Visual Basic.

*Часть шестая* Электронного курса содержит введение в теплообменники.

В гл. 24 «Основы теплогидравлического расчета поверхностных теплообменников» рассматриваются базовые понятия и элементарные алгоритмы проектирования теплообменников. Необходимое внимание уделено понятию эффективности теплообменников, определению предельных достижимых температур теплоносителей, соотношению между эффективностью и числом единиц переноса тепла. Принятая форма определяющих уравнений для теплообменников предусматривает применение в вычислительной программе и возможное обобщение на более сложные системы, например, с проницаемыми поверхностями раздела и переменными расходами теплоносителей.

Рассмотрена задача многокритериальной оптимизации теплообменников. Оперирова с компьютерной моделью, читатель может спроектировать наилучший теплообменник, который обеспечит заданный тепловой поток и обойдется потребителю минимальными суммарными затратами. Эксперименты с компьютерными моделями противоточных и прямоточных теплообменников помогут начинающему специалисту избежать распространенных профессиональных ошибок.

В гл. 25 «Микротеплообменники» рассмотрен относительно новый класс теплообменников, с малыми характерными размерами каналов в диапазоне  $\sim 10 \text{ мкм} \div 1 \text{ мм}$ , работающих поэтому при ламинарном режиме. Несмотря на отсутствие турбулентного перемешивания, в микроканальных теплообменниках обеспечивается высокая интенсивность теплопередачи, благодаря малым значениям термических сопротивлений ( $\delta/\lambda$ ) стенок и

теплоносителей. Поверхность теплопередачи в расчете на единицу объема достигает исключительно больших значений порядка  $10^4 \text{ м}^2/\text{м}^3$ . В результате для объемной плотности теплового потока получаются экстремальные значения порядка  $10^8 \text{ Вт}/(\text{м}^3\text{К})$  (в расчете на единичный температурный напор). Сказанное в равной мере относится к диффузионным процессам в микрореакторах, испарителях, конденсаторах, и т.п.

Центральным пунктом главы является численное моделирование *двухмерной сопряженной задачи* для температурного поля в потоке жидкости и в твердой структуре, с целью учесть возможную сильную неоднородность температуры и плотности теплового потока по периметру каналов и найти эффективный коэффициент теплопередачи как функцию от геометрии микроструктуры и соотношения теплопроводностей теплоносителя и твердого скелета.

Использование поверхностных каталитических реакций в микроканальных устройствах приближает их к эффективным биологическим системам. Прогнозируется быстрый прогресс в технологии микротеплообменников и их все более широкое применение, особенно в распределенных и мобильных технических системах, подобно тому как это произошло в электронике благодаря микроминиатюризации элементной базы.

Второй, после Электронной книги, структурной единицей Электронного курса является обширная *коллекция Mathcad-программ*, начиная от служебных блоков для графического представления функциональных зависимостей, до алгоритмически сложных профессиональных программ. Доступ осуществляется как из текстовой части Электронного курса по гиперссылкам, так и непосредственно из пункта «Mathcad-документы» основной страницы. Кроме оформленных Mathcad-документов, автор счел возможным оставить доступными для пользователя многие пробные или черновые версии, которые могут быть полезными при освоении техники работы в пакете Mathcad.

*Лабораторные работы* (третья структурная часть курса) могут быть двух типов. Либо это описания работ на лабораторных стендах кафедры Теоретических основ теплотехники им. проф. М.П. Вукаловича, либо работы с компьютерными моделями. В обоих случаях одинакова методическая цель: оперируя с моделью, найти и осмыслить ее реакцию на внешние воздействия.

Лабораторные стенды представлены двумя позициями. Измерение теплопроводности воздуха методом нагретой нити является очень простым и быстро выполняемым экспериментом, однако обработка данных оказывается достаточно сложной, невыполнимой без применения компьютера. Техника работы с массивами экспериментальных данных, операции сглаживания и аппроксимации, дифференцирование кривой, полученной по экспериментальным данным – вот обоснование для включения этой лабораторной работы в Электронный курс. Следует добавить, что экспериментирование с виртуальной моделью этой установки позволило провести юстировку и уточнить значение постоянной прибора.



Второй лабораторный стенд предназначен для измерения локальных значений коэффициента теплоотдачи по окружности опытной трубки при различных скоростях поперечного потока газа. Напомним, что эта же задача решалась в гл. 14 Электронного курса, где были сопоставлены данные эксперимента и теории. Такое параллельное физическое и математическое моделирование является идеальной средой для научных исследований.

Как можно судить по содержанию Электронного курса, обязательные для учебного издания расчетные примеры и задачи для самостоятельного решения достаточно полно представлены в форме Mathcad-программ различного уровня, открытых для изучения, экспериментов и модификации. Для контрольных работ и, в большей степени, для самоконтроля может быть применен электронный вариант апробированного в учебной практике метода, состоящего в выборе правильного ответа из предложенных вариантов. Несмотря на элементарный характер, этот способ (при условии тщательной методической разработки) может обеспечить оперативный контроль знаний.

Методы построения электронного курса разрабатывались при подготовке книг по дифференциальным моделям [34, 50], нашедших положительный отклик у коллег у нас и за рубежом и используемых в учебном процессе. Эффективность параллельного физического и математического моделирования была обоснована в Практикуме по теплопередаче [29].

Электронный курс прошел к настоящему времени определенную апробацию. На протяжении нескольких последних лет разделы электронного курса и вычислительные программы были представлены в свободном доступе на странице Интернет <http://www.thermal.ru/> и эффективно использовались студентами разных специальностей (теплоэнергетика, атомная и термоядерная энергетика) при выполнении семестровых учебных проектов по компьютерному моделированию процессов теплообмена.

Опыт прикладных исследовательских работ в области теплообмена при фазовых превращениях позволяет указать на достаточно определившуюся тенденцию, которая была учтена при работе над Электронным курсом. По-видимому, место простых алгебраических соотношений (критериальных формул) в расчетной практике инженера должны постепенно занимать *компьютерные модели* процессов, аппаратов, технологий. Одномерные дифференциальные модели, с их способностью отразить многообразие и сложность реальных объектов, с одной стороны, и достигнутым совершенством и прозрачностью численной реализации, с другой – идеальная основа для эффективной творческой работы и для применений в учебном процессе.

В том, что касается литературных ссылок, мы следуем обычной для учебников практике, когда непосредственно в тексте таковые не приводятся. Этому имеется несколько оправданий. Одно из них состоит в том, что основные построения теории теплообмена воспроизведены в книге и могут быть самостоятельно повторены читателем, как это имеет место, например, с уравнением Фолкнера-Скэн. Следует учесть также доступность

информационных ресурсов в Интернете при работе с поисковыми и справочными системами, наличие подробных библиографических указателей в фундаментальных справочниках по тепломассообмену. С другой стороны, автор считал полезным сослаться на книги, по которым он сам учился тепломассообмену и которые, следовательно, в той или иной мере были использованы при подготовке Электронного курса.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х томах. М.: Мир, 1990. 728 с.
- 2 Базаров И.П. Термодинамика. М.:Высшая школа. 1991. 376 с.
- 3 Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир. 1986. 184 с.
- 4 Ван-Дайк М. Методы возмущений в механике жидкостей. М.: Мир. 1967. 310 с.
- 5 Вукалович М.П., Новиков И.И. Техническая термодинамика. М.: Энергия, 1968. 496 с.
- 6 Гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности. Под ред. Х.Суинни, Дж.Голлаба. М.:Мир. 1984.344 с.
- 7 Гребер Г. , Эрк С., Григуль У. Основы учения о теплообмене. М.: Изд-во ИЛ. 1958. 566 с.
- 8 Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия. 1975. 485 с.
- 9 Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. М.: Энергия, 1977. 240с.
- 10 Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука. 1978. 512 с.
- 11 Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Издательский дом МЭИ. 2008. 496 с.
- 12 Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. М.: Энергоатомиздат.1990. 360 с.
- 13 Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
- 14 Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
- 15 Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат. 1990. 367 с.
- 16 Кэйс В. М. Конвективный тепло- и массообмен. М.: Энергия. 1972. 448 с.
- 17 Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. М.: Издательство МЭИ, 2000. 388 с.
- 18 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.6. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 736 с.

- 19 Лапин Ю.В., Стрелец М.Х. Внутренние течения газовых смесей. М.: Наука. 1989. 368 с.
- 20 Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука. 1970. 904 с.
- 21 Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
- 22 Михеев, М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия. 1977. 344 с.
- 23 Моисеев Н.Н. Математика ставит эксперимент. М.: Наука. 1979. 224 с.
- 24 Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука. 1984. 288 с.
- 25 Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат. 1984. 152 с.
- 26 Петухов Б.С. Опытное изучение процессов теплопередачи. М.–Л.: ГЭИ, 1952. 343 с.
- 27 Петухов Б.С., Ковалев С.А., Генин Л.Г. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Энергоатомиздат. 1986 г. 472 с.
- 28 Петровский И.Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Наука. 1970. 279 с.
- 29 Практикум по теплопередаче: Учеб. пособие для вузов/ А.П.Солодов, Ф.Ф.Цветков, А.В.Елисеев, В.А.Осипова; Под ред. А.П.Солодова.- М.: Энергоатомиздат. 1986 –286 с.
- 30 Пригожин И.Кондепуди Д. Современная термодинамика. М.: Мир. 2002. 461 с.
- 31 Роуч. П. Вычислительная гидродинамика. М.:Мир. 1980. 616 с.
- 32 Себеси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. М.: Мир. 1987. 592 с.
- 33 Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1, 2. М.: Наука. 1970. 492 с, 568 с.
- 34 Солодов А.П., Очков В.Ф.. Mathcad / Дифференциальные модели. М.:Изд-во МЭИ. 2002. 239 с
- 35 Сполдинг Д.Б. Конвективный массоперенос. М.: Энергия. 1965. 383 с.
- 36 Справочник по теплообменникам. Пер. с англ. / под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. М.: Энергоатомиздат, 1987. в 2 т. Т.1, 560 с.
- 37 Теория тепломассообмена / Под ред. А.Н.Леонтьева. - М.: Изд-во МГТУ. 1997. 683 с.
- 38 Турбулентность. Принципы и применения. Под ред. У.Фроста, Т.Моулдена. М.: Мир. 1980. 535 с.
- 39 Теплообмен при пленочной конденсации и пленочном кипении в элементах оборудования АЭС / И.И. Гогонин, И.А. Шемагин, В.М. Будов, А.Р. Дорохов; Под ред. В.Е. Накорякова. М.: Энергоатомиздат, 1993. 208 с.

- 40 Теплоэнергетика и теплотехника: справочник. Книга 2. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Ред.: Клименко А.В., Зорин В.М. М.: Издательский дом МЭИ. 2007 г.
- 41 Тихонов А.Н., Самарский А.А.. Уравнения математической физики. М.: Наука. 1966. 624 с.
- 42 Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. 360 с.
- 43 Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. В 2-х томах. Москва. Мир. 1991. 504, 552 с.
- 44 Френкель Я.И. Собрание избранных трудов. Т.III. Кинетическая теория жидкостей. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1959. 458 с.
- 45 Хемминг Р.В. Численные методы. М.: Наука. 1968. 400 с.
- 46 Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.:Наука. 1969. 742 с.
- 47 Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло - и массообмена. М.: Госэнергоиздат. 1961. 680 с.
- 48 HEDH: Heat Exchanger Design Handbook. \ Hewitt G.F., Executive Editor. 1998
- 49 VDI-Waermeatlas, 10. bearbeitete und erweiterte Aufgabe. 2006.
- 50 Solodov A., Ochkov V. Differential models. An Introduction with Mathcad. Springer Berlin Heidelberg New York. 2004. p. 232.