

Информация

Рецензия на учебник для вузов «Металлургические печи. Теория и расчеты» под ред. В.И.Тимошпольского и В.И.Губинского

1. Общая оценка учебника

Фундаментальный труд «Металлургические печи. Теория и расчеты» подготовлен авторским коллективом, состоящим из специалистов Белорусского национального технического университета, Национальной металлургической академии Украины, Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», и выпущен в свет в Минске в 2007 г. издательством «Белорусская наука» под редакцией *докт. техн. наук, проф. В.И.Тимошпольского и докт. техн. наук, проф. В.И.Губинского* [1, 2]. Книга утверждена Министерством образования Республики Беларусь в качестве учебника для студентов металлургических и теплотехнических специальностей вузов.

Учебник включает 2 тома общим объемом около 90 условных печатных листов, а его структура обусловлена задачей изложения научных основ металлургических печей и стремлением сформировать и реализовать на конкретных примерах методологию выполнения тепловых и технологических расчетов печей различных типов и назначения.

1.1. Том 1 учебника разделен на две части, каждая из которых состоит из трех глав. В томе 1 учебника излагаются основы процессов аэродинамики и теплообмена, совместно с процессами горения определяющими тепловую работу пламенных печей — основных теплотехнологических агрегатов металлургии.

Том 2 также включает две части, первая из которых «Теплообменники металлургического производства» посвящена описанию конструкций и методов расчета утилизаторов теплоты рекуперативного и регенеративного типов. Авторы рассматривают только централизованные теплоутилизационные устройства и не затрагивают горелки-утилизаторы теплоты: рекупера-

тивные и регенеративные, получившие распространение в последние годы.

Часть II тома 2 «Огнеупоры и металлургические печи» включает 5 глав, три из которых посвящены тепловым расчетам плавильных печей производства чугуна и стали, а также расчетам нагревательных печей периодического действия (колодцев) и печей непрерывного действия с различными системами транспорта заготовок: методических толкательных, с шагающим подом, кольцевых (с вращающимся подом).

В последней главе книги представлены конструкции, температурные режимы и методы расчета электрических и пламенных печей для термообработки стали.

Задачи, связанные с расчетами печей различных типов, замыкают практически каждый из разделов глав 3–5 тома 2. При этом представление примеров подчинено выполнению реальных конструкторских задач.

Том 2 учебника снабжен *справочными данными*, касающимися химического состава, физико-химических и теплофизических свойств конструкционных материалов печей, утилизаторов теплоты, а также обрабатываемых в печи материалов, изделий и заготовок, подвергаемых тепловой обработке в печах. Благодаря включению в книгу всей необходимой справочной информации выполнение проектов печей и отдельных систем их функционирования: *тягодутьевых, горелочных, теплоутилизационных* — становится возможным при использовании исключительно одного настоящего учебника, без привлечения других источников. Все разделы работы сопровождаются примерами расчетов отдельных технологических процессов металлургии и тепловой работы печей.

Ознакомление с разделами книги обеспечивает конечную цель подготовки специалистов и их дальнейшей практической деятельности —

возможность выполнения проектных и поверочных расчетов с доведением заданий до численных результатов по отдельным системам печей, их конструктивным узлам и элементам, с выбором режимов и параметров эксплуатации.

Следует признать, что едва ли в других странах созданы в образовательных целях аналоги такого труда, представляемого как учебник для подготовки инженеров-металлургов и теплотехников. В странах Центральной и Восточной Европы изданы учебные пособия по отдельным разделам металлургической и огневой теплотехники (Польша, Силезская политехника [3, 4]; Венгрия, Технический университет, Мишкольц [5]; Румыния, Технический университет, Бухарест [6]; Хорватия, Технический университет, Загреб – Сисак [7]), быть может подготовленные с учетом мировых достижений на более современном уровне по отдельным разделам теплофизики и численным методам решения уравнений, однако отсутствует труд, системно обобщающий основы теории печей и методы теплового расчета основных типов печных агрегатов.

Сам факт подготовки и издания рецензируемого учебника является свидетельством высокой квалификации авторского коллектива в области металлургической теплотехники.

1.2. Концепцией теоретических разделов учебника, по нашему мнению, является представление фундаментальных основ — при изучении процессов переноса энергии (теплоты), а использование упрощенных, в том числе эмпирических инженерных подходов — при рассмотрении закономерностей сохранения импульса и массы. Такая методология справедлива при анализе и с целью выполнения расчетов тепловых процессов в топливных и электрических печах технологического назначения: плавильных, нагревательных, термических, химико-термических.

Прикладная направленность труда в целом является определяющей чертой всех разделов учебника: относящихся к теоретическим основам металлургической теплотехники (том 1), связанных с конструкциями отдельных типов печей, печного оборудования, а также с методологией расчета печей различных типов (том 2).

Важным достоинством учебника [1, 2] является включение большого объема справочной информации и демонстрация ее использования на конкретных примерах при решении практических задач: расчетах различных типов печей металлургического производства и с целью выбора необходимого универсального (для агрегатов различного типа) оборудования. Последнее относится к выбору воздухоподводящих средств и дымоходов (глава 2) и горелочных устройств (гла-

ва 3) — том 1, а также утилизаторов теплоты: рекуператоров и регенераторов (глава 1, том 2).

Включение в каждый раздел учебника *примеров выполнения расчетов* свойств веществ, характеристик процессов, по выбору оборудования и его обоснованию отдельно, а также в составе комплексного расчета печей — отличительная особенность этого далеко неординарного издания.

2. Анализ отдельных разделов учебника

В рассматриваемом обширном труде [1, 2], обобщающем состояние разделов металлургической теплотехники, теории конструирования и тепловой работы печей, отдельные разделы которого подготовлены в разное время авторским коллективом в составе более 20 специалистов из различных организаций Беларуси, Украины и России, освещение каждого аспекта рассматриваемой проблемы не могло быть одинаково удачным и единообразным по отдельным критериям, в частности, по соотношению базовых знаний и новейших научных подходов и результатов.

При более детальном анализе учебника следует учитывать разную степень консервативности и динамику обновляемости знаний для отдельных аспектов каждого из составляющих разделов науки, междисциплинарный характер знаний и технологий, воздействие пограничных разделов смежных наук на методы прикладных расчетов процессов и устройств.

2.1. Отметим в качестве примера изданий, *не уступающих лучшим мировым аналогам*, главы 2 и 3 части II тома 1 настоящего учебника. Именно здесь к традиционно обстоятельному для авторского коллектива [1] рассмотрению классических задач теплопроводности и аналитическим методам их решения для случаев нагрева тонких и массивных тел при различных граничных условиях добавлены разделы с представлением приближенных методов расчета. Изложение разделов сопровождается большим числом примеров их использования.

Для доказательства адекватности приближенных решений и их оценки погрешность результатов, полученных с привлечением приближенных методов расчета, сопоставлена с численными решениями и экспериментальными результатами по измеренным температурным распределениям в заготовках.

Достоинством изложения раздела науки о теплообмене, относящегося к теплопроводности применительно к процессам нагрева металла, является включение в книгу методик определения *температурных напряжений* в телах как

фактора, лимитирующего скорость нагрева, и *проведение термомеханических расчетов.*

Рассмотрение процессов плавления-затвердевания при различных граничных условиях, в том числе в условиях нагрева тел с жидкой сердцевинной, делает книгу полноценным учебным и справочным пособием для инженеров различных металлургических специальностей.

2.2. В отличие от разделов, проанализированных выше, следует признать не столь удачным и отвечающим современным требованиям представление разделов о горении топлива и факельных процессах. Значимость этих процессов при изложении теории печей следует даже из названия одного из наиболее известных в рассматриваемой области фундаментальных трудов — книги М.В.Тринга (M. W. Tring) «Наука о пламенах и печах» [8].

2.2.1. Глава 1 тома 1 «*Расчеты горения топлива*» включает балансовые расчеты, связанные с определением состава основных продуктов сгорания твердых, жидких и газообразных топлив, их огнетехнических и теплотехнических характеристик: теплоты и температур горения, объемных и массовых потоков окислителя, соответствующего стехиометрическому соотношению окислитель : топливо и выходу основных компонентов горения при различных избытках воздуха. Рассмотрено совместное сжигание разных видов топлива.

К сожалению, определение состава продуктов даже простых реакций окисления газовых топлив в рамках предлагаемой методологии требует громоздких ручных вычислений. Вместо этого (или наряду с этим) следовало бы изложить методику расчета равновесного состава продуктов сгорания при произвольных температурах T и давлениях P по принятым во всем мире методикам нахождения состояния равновесия химически реагирующих систем.

В соответствии с теоремой Я.Б.Зельдовича для смеси реагирующих газов система уравнений, вытекающих из законов сохранения вещества и действующих масс, при заданных T и P (T и V) имеет только одно вещественное положительное решение. Этот подход реализуется решением системы уравнений поэлементного баланса и линейно не зависимых между собой уравнений термодинамического равновесия. Условием достижения равновесного состояния реагирующей (в частности, горячей) смеси является обеспечение в системе минимума энергии Гиббса. На этой основе может выполняться расчет теоретической (адиабатной) температуры горения T_T вместо (или наряду с) устаревшей соответствующей характеристикой — калори-

метрической температурой горения T_K , а также определение тепловых эффектов реакции и теплоты сгорания топливоокислительных смесей любого состава.

Такое комплексное определение различных характеристик имеет практическое значение для современных инженеров: значение T_T дает представление о реальных температурных областях при горении топливоокислительных смесей разного состава, а значение T_K для стехиометрических топливовоздушных смесей вводится в перечень справочных характеристик европейских природных газов L и H [9, 10], хотя и является фиктивной величиной.

2.2.2. Разумеется, принятие строгих физических представлений при оценке эффективности использования топлива и теплоты вместо привлечения условных подходов и операций с нефизическими понятиями и их численными значениями является более обоснованным и продуктивными.

Это замечание относится, например, к условной величине «расчетной температуры источника теплоты» ($3400\text{ }^\circ\text{C}$ — в примере главы 5, тома 2), введенной для определения коэффициента использования теплоты в нагревательных колодцах.

3. Рекомендации по дальнейшему совершенствованию учебника

3.1. При создании столь обстоятельного труда, рассчитанного на десятилетия использования в качестве учебника для вузов, перед авторским коллективом возникает принципиальный методологический вопрос о требованиях к подаваемому учебному материалу с позиций усвоившихся базовых знаний, с одной стороны, и последних достижений науки и ее инженерных приложений, с другой. Наилучшую профессиональную подготовку обеспечивает оптимальное соотношение этих составляющих.

Авторы учебника сосредоточились на традиционных подходах при рассмотрении теории печей и максимально полном охвате материала, непосредственно связанного с конструкторскими и поверочными расчетами печей разных типов (том 2).

Современность обучения и подготовки инженеров XXI в. обеспечивается выбором содержательной (теоретической) части предмета, формой представления информации (учебного материала), а также методологией ее освоения. При проведении расчетов процессов, агрегатов и аппаратов речь идет не просто об использовании быстро обновляемых компьютерных технологий и конкретных программных кодов к при-

веденным в учебнике базовым представлениям и методикам. Соответствующий подход составил основу учебного пособия одного из наиболее известных восточноевропейских ученых в области металлургической теплотехники проф. А. Биро (Венгрия), издавшего книгу [5], где приведены программы ANALCALC компьютерного расчета основных составляющих этапов и характеристик, определяющих рабочий процесс в топливных и электрических печах. Несмотря на сравнительно небольшой срок, прошедший с момента издания этой книги (1995), при всей полезности ее как учебного пособия едва ли в настоящее время кто-либо станет использовать продукт ANALCALC для выполнения тепловых расчетов печей.

На самом деле необходим учет последних достижений науки в области горения, включая термодинамику горения, кинетические механизмы, связанные с горением в турбулентном потоке (механизмы турбулентности), а также методы расчета высокотемпературного теплообмена (модели излучения). К созданию новых технологий, устройств и систем следует привлечь накопленные в мире методы CFD (Computational Fluid Dynamics) моделирования и программные продукты, которые охватывают все упомянутые процессы в совокупности. С таким подходом выпускник вуза по специальности «Металлургическая теплотехника» должен быть ознакомлен [11–14].

3.2. В связи с изложенным в п. 2.2 следует признать упущением соответствующих разделов отсутствие полноценного изложения термодинамики горения. Такой раздел следовало подготовить на основе использования универсальной характеристики — энергетической функции («полной энтальпии») вещества (компонента и реакционной смеси), учитывающей теплоту образования любого компонента из химических элементов.

Использование удельной полной энтальпии в качестве функции состояния продуктов сгорания как первичного теплоносителя позволяет легко определить эффективность использования топлива и теплоты в зависимости от температурного режима эксплуатации печи и параметров первичной топливоокислительной смеси. Из равенства полной энтальпии единицы (1 кг) смеси исходных реагентов (топливо + окислитель), взятых при соответствующих начальных температурах исходной смеси, полной энтальпии 1 кг продуктов сгорания при теоретической температуре горения T_T непосредственно путем итераций рассчитывается значение T_T для любых топливоокислительных смесей, а также на-

ходятся теплота реакций, низшая и высшая теплота сгорания и другие характеристики топлив.

3.3. Современные методы расчета позволяют существенно уточнить характеристики новых и реконструируемых печей, добиваясь создания агрегатов с наперед (заранее) заданными параметрами и характеристиками реализуемых в печах процессов. К числу методов теплового расчета, расширяющих возможности уточнения конструкции печи и отдельных ее узлов, а также прогнозирования характеристик печей, относится, прежде всего, *зональный метод расчета*. Использование зонального метода предполагает учет многократных (бесконечного числа) поглощений лучистых потоков в газовой среде и их взаимных преотражений между всеми газовыми и объемными зонами замкнутой системы (печи). Эта методология развита в трудах Х. Хоттеля с сотрудниками (США), их европейских последователей, с одной стороны, Ю.А.Суринова и В.Г.Лисиенко (Советский Союз) — с другой [3, 6, 15].

В первом случае методология базируется на использовании представления о поверхностях взаимного обмена зон «поверхность — поверхность», «объем (газ) — поверхность», «объем (газ) — объем (газ)», во втором случае процедура расчета теплообмена реализуется через разрешающие угловые коэффициенты между зонами.

Зональный метод в постановке Х. Хоттеля прекрасно согласуется с моделью несерого (селективного) излучения в виде взвешенной суммы серых газов, предложенной им же.

В учебнике расчет лучистого теплообмена в печах базируется на рассмотрении методов поточной алгебры и использовании «простейшей печной системы Г.Л.Поляка» (по терминологии авторов учебника [1]), разработанных в 1930-е гг.

Достоинством зонального метода расчета является возможность расчета систем с переменной температурой и оптическими характеристиками газов в топочном пространстве печи.

Следует подчеркнуть, что зональный метод расчета теплообмена увязан с рассмотрением *массообменных процессов между газовыми зонами*, поскольку только такой подход позволяет составить уравнения теплового баланса каждой из объемных зон.

Использование понятия об эффективных тепловых потоках, представленного в разделе «Теплообмен в технологической зоне печи» (глава 1, часть II, том 1), позволило бы обеспечить изложение основ зонального метода расчета, во всяком случае в постановке Х. Хоттеля: условный эффективный поток от поверхностной зоны является величиной, определяющей полные поверхности взаимного обмена между зонами.

3.4. Определение выдающегося аэродинамика Т. Кагман: «Горение — это аэротермохимия», — сейчас актуально как никогда прежде, в том числе в связи с непрерывным ужесточением нормативов по вредным выбросам во всем мире и, прежде всего, в США, а также регламентацией выбросов CO_2 как основного парникового газа.

Несмотря на значимость процесса горения как источника энергии и факела(ов) как побудителя переноса массы и теплоты в топливных пламенных и муфельных печах, а также в печах с радиационными трубами, в книге этим процессам уделено недостаточно внимания. Рассмотрение *факельных процессов* ведется с устаревших упрощенных механистических позиций без какого-либо рассмотрения химизма горения топливоокислительных смесей (механизмов химических реакций), что не соответствует современному уровню знаний в области горения и значительно уступает даже достаточно давно изданным зарубежным учебным пособиям [4].

Достоинством представления современных знаний о физико-химических составляющих процесса и качества их изложения может служить книга [16], основанная на курсе лекций, прочитанных проф. Ю. Варнатцем в Штутгартском университете (Германия). Эта книга выдержала несколько изданий на немецком, английском, русском и других языках.

Процессы горения в изложении Ю. Варнатца, У. Мааса и Р. Диббла и в соответствии с их представлением в книге [16] составляют энергетическую основу использования топлива и причину экологических осложнений, а также влияния на атмосферу. Вместе с тем поглавная иллюстрация представленного материала учебными задачами без изложения их решения, как это выполнено в монографии [16], по нашему мнению, менее ценно методологически и информационно, чем примеры расчета, доведенные до конечного результата в рецензируемом учебнике [1, 2].

Недостатком издания является отсутствие раздела (ов), связанного с *экологической составляющей тепловой работы топливных печей*. В настоящее время к любым топливоиспользующим агрегатам предъявляются не только высокие требования по эффективности использования энергии (теплоты) и топлива, но и постоянно понижаемые уровни предельно допустимых выбросов (ПДВ) по NO_x , SO_x , CO , РАН (УНС) и дисперсным частицам. Существуют ограничения по выбросам парниковых газов (прежде всего CO_2), влияющих на изменение климата. Невыполнение международных и национальных нормативов по выбросам в окру-

жающую среду может явиться фактором, ограничивающим использование самых совершенных металлургических печей.

Соглашаясь в принципе с принятой концепцией учебника, его структурой и содержанием, мы полагаем, что последующие издания книги могут быть улучшены за счет включения современных представлений и подходов к описанию отдельных физико-химических процессов, протекающих в печах, а также благодаря учету созданных в последние годы за рубежом расчетных процедур, относящихся к печам. В этой связи следует расширить привлечение иностранных литературных источников (библиографию к книге).

Заключение

Создание учебника для вузов «Металлургические печи. Теория и расчеты» явилось современным ответом на появившиеся после 2000 г. запросы вузовского образования и теплотехнической подготовки инженеров-металлургов и теплоэнергетиков. Издание учебника стало возможным благодаря многолетним усилиям авторского коллектива и, прежде всего, научных редакторов проф. В.И. Тимошпольского и проф. В.И. Губинского.

Оценка книги и анализ ее содержания выполнялись с учетом того, что учебник должен отличаться и от научных монографий по отдельным направлениям металлургической теплотехники и теплотехники, где должны отражаться новейшие тренды в этих областях знания, и от справочных изданий.

Действительно, в книге «Металлургические печи. Теория и расчеты» в соответствии с требованиями к учебной литературе излагаются проверенные практикой и временем научные положения. Учебник несет необходимую сумму знаний по упомянутой дисциплине, отражающих концептуальные взгляды авторов и соответствующих учебной программе.

Материал, излагаемый в учебнике, может использоваться применительно к печам черной металлургии и при изучении печей машиностроения, цветной металлургии, процессов и агрегатов тепловой обработки неметаллических (например, строительных) материалов.

Прошедший после первого издания книги семилетний период (с 2007 г.) позволяет выявить и оценить наметившиеся тенденции собственно в печестроении и в развитии теоретических основ и методов расчета теплотехнических и огнетехнических процессов в печных агрегатах. В последние годы в мире растет объем тер-

мически обрабатываемой стали, быстро увеличивается число работающих термических печей и обновляется их парк. Как следует из анализа современных трендов [17, 18], наблюдается повышенный интерес к созданию новых и совершенствованию существующих процессов термической и термохимической обработки металла.

Мировой рынок литературы, связанной с промышленной теплотехникой и печным оборудованием, насыщен справочными изданиями общего характера (см., например, *H. Pfeifer «Handbuch Industrials Warmetechnik: Grundlagen/Berechnung/Verfahren», 5Aufgabe.* — 2013. — Essen : Vulkan-Verlag. — 500 S. mit interaktivem eBook) и книгами по отдельным технологиям и конструктивным узлам, относящимся к промышленным печам и топкам: от процессов сжигания и горелочных устройств до огнеупорных материалов, где представлены основные тенденции в использовании топлива.

Вместе с тем ограниченность учебной литературы прикладной направленности в рассматриваемой области позволяет особо оценить значимость издания учебника «Металлургические печи. Теория и расчеты» и рекомендовать его к переизданию с учетом наметившихся в мире тенденций развития печестроения.

Список литературы

1. *Металлургические печи. Теория и расчеты* / Под общ. ред. В.И.Тимошпольского, В.И.Губинского. — Минск : Белорусская наука, 2007. — Т. 1. — 596 с.
2. *Металлургические печи. Теория и расчеты* / Под общ. ред. В.И.Тимошпольского, В.И.Губинского. — Минск : Белорусская наука, 2007. — Т.2. — 832 с.
3. Rudnicki Z. Modelowanie matematyczne radiacyjnego przepływu energii/wydawnictwo politechniki slaskiej. — Gliwice. — 2003. — 418 s.
4. Tomeczek J. Spalanie i Płomienie Gazowe. — Gliwice : Politechnika Slaska im. W. Pstrowskiego. — 1982. — 220 s.
5. Biro A. Computing of Furnace Operations. — Budapest : Biro Engineering Ltd, 1994. — 221 pp.
6. Prisecaru T. et al. Probleme Speciale ale Sistemelor Vaporizatoare ale Generatoarelor de Abur. — Bucuresti : Editura Matrix Rom., 1996. — 146 pp.
7. Lazic L. Numericke metode u toplinskoj analizi / Sveucilite u zagrebu metalurski fakultet. — 2007. — 114 p.
8. Тринг М.В. Наука о пламенах и печах / Пер. с англ. под ред. В.В.Мурзанова. — М. : Металлургиздат, 1958. — 482 с.
9. Altfeld K., Schley P. Entwicklung der Erdgasbeschaffenheiten in Europa // GasWaerme Int. — 2012. — № 2. — S. 57–63.
10. Leicher J., Giese A., Tali E., Werschy M., Franke S., Krause H., Dorr H., Kunert M. Gasbeschaffenheitsanderungen : Lösungsansätze fuer industrielle Feuerungsprozesse // GasWaerme Int. — 2013. — № 6. — S. 43–57.
11. Белов И.А., Исаев С.А., Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие. — СПб. : Балт. гос. техн. ун-т, 2001. — 108 с.
12. Lazic L., Horbaj P. Trends in Mathematical Modelling of Gas-Fired Metallurgical Furnaces // GasWaerme Int. — 2002. — Bd. 51, № 6–7. — S. 298–300.
13. Wesseling P. Principles of computational fluid dynamics. — Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 2001. — 642 p.
14. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений : Учебное пособие. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. — 88 с.
15. Сорока Б.С. Интенсификация тепловых процессов в топливных печах. — Киев : Наук. думка, 1993. — 413 с.
16. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. — М. : Физматлит, 2003. — 352 с. (Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulations, Experiments, Pollutants Formation. 4th ed. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. — 378 p.)
17. GasWaerme Int.: 2011 (60 J.): Н. 1 — 2, S. 1–112; Н. 3, S. 113–228; Н. 4, S. 229–352; Н. 5, S. 353–444; Н. 6, S. 445–568; Н. 7–8, S. 569–664; 2012 (61 J.): Н. 1, S. 4–154; Н. 2, S. 4–104; Н. 3, S. 4–128; Н. 4, S. 4–132; Н. 5, S. 4–136; 2013 (62 J.): Н. 1, S. 2–140; Н. 2, S. 2–116; Н. 3, S. 4–148; Н. 4, S. 2–124; Н. 5, S. 2–136; Н. 6, S. 2–116; 2014 (63 J.): Н. 1, S. 4–132.
18. Heat Processing: 2011 (Vol. 9): № 1, P. 1–92; № 2, P. 93–216; № 3, P. 217–320; 2012 (Vol. 10): № 1, P. 2–140; № 2, P. 4–124; № 3, P. 4–128; № 4, P. 4–100; 2013 (Vol. 11): № 1, P. 4–124; № 2, P. 4–160; № 3, P. 1–148; № 4, P. 1–116; 2014 (Vol. 12): № 1, P. 1–124.

Сорока Б.С., доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники Украины, главный научный сотрудник Института газа НАН Украины