



The existing methods of modeling of the thermalphysic processes taking place in working space of heating and thermal furnaces are analysed. And also the comparative appraisal of the program complexes in which these methods are realized is given.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И. А. ТРУСОВА, Д. В. МЕНДЕЛЕВ, П. Э. РАТНИКОВ, БНТУ

УДК 669.04

АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ ДЛЯ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

При математическом моделировании тепловой работы нагревательных и термических печей в настоящее время развиваются две тенденции [1,2]:

1) разработка комплексных (сопряженных) математических моделей, включающих процессы внешнего и внутреннего теплообмена, движение теплоносителей, несимметричность нагрева, учет геометрии заготовок, конструктивных особенностей и т. д.;

2) разработка математических моделей, которые позволяют изучить процессы теплообмена путем разделения комплекса происходящих в печи явлений на отдельные группы.

Постановка краевой задачи теплопроводности состоит в выборе математической модели, в той или иной мере соответствующей исследуемому физическому процессу. В эту математическую модель на стадии ее постановки входят дифференциальное уравнение теплопроводности, условия теплообмена на поверхности тела (граничные условия), температурное состояние тела перед началом исследуемого процесса (начальное условие).

Известно, что теплообмен в высокотемпературных печах происходит излучением и конвекцией, перенос теплоты внутри тела – теплопроводностью.

Обобщенное дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\frac{a}{r^m} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^m \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\omega}{c\gamma} = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где m – параметр формы тела ($m = 0$ – пластина, $m = 1$ – цилиндр, $m = 2$ – шар); a – коэффициент температуропроводности, м/с²; c – удельная теплоемкость заготовки, Дж/(кг·К); γ – плотность, кг/м³; T – абсолютная температура заготовки, К; ω – удельная мощность внутренних источников теплоты, Вт/м³; r – координата.

Дифференциальное уравнение теплопроводности (1) дополняется соответствующими начальными условиями и граничными условиями I, II и III рода.

При рассмотрении объекта с более сложной геометрией можно представить моделируемый объект в качестве суперпозиции элементарных под-объектов, описываемых параметром формы тела.

К методам расчетного анализа температурного состояния тел относятся точные и приближенные аналитические методы. Среди точных аналитических методов решения задач теплообмена применение получили [3] методы интегральных преобразований, парных интегральных уравнений и парных сумматорных рядов, Винера-Хопфа, метод функции Грина, тепловых потенциалов, обобщенных степенных рядов, дифференциальных рядов, функциональных преобразований.

Однако не всегда возможно применение точных аналитических методов. В частности, при выполнении конкретных расчетов на ЭВМ и особенно при большом количестве исходных данных процесс получения решения значительно усложняется, вследствие чего невозможно получить точные зависимости изменений температур. В результате широкое распространение получили приближенные аналитические методы. Эти методы менее универсальны, но их преимущество в том, что они позволяют получать решения, хотя и приближенные, но в аналитической форме. К приближенным аналитическим методам решения задач теплообмена относятся [3] методы Ритца, Треффтца, Канторовича, взвешенных невязок, коллокаций, метод Галеркина. Существует также класс приближенных аналитических методов, объединенных под названием «методы термического слоя». Наиболее широкое распространение получил метод эквивалентных источников (МЭИ) [4].

В настоящее время, учитывая развитие вычислительной техники, предпочтение отдается программным расчетным комплексам, базирующимся на решении сложных мультифизических задач с использованием численных методов. Наиболее практичные и широко используемые среди численных методов методы конечных элементов и конечных разностей [5–7].

Ниже рассмотрены существующие в технической литературе подходы при решении задач теплообмена в высокотемпературных печах с использованием численных методов.

В работе [8] приводится математическое моделирование теплообмена в многозонной методической печи стана 600 Алчевского металлургического комбината. При моделировании тепловой работы печи формулируется задача сопряженного теплообмена, учитывающая специфику конструкции конкретной печи и условия ее функционирования, что позволяет детально исследовать особенности ее тепловой работы в конкретных условиях производства. Авторы предложили сложную геометрию по кладке разбить на прямоугольные расчетные зоны, при этом отмечено, что необходимо стремиться к их минимальному количеству при сохранении возможности учета всех основных особенностей теплообмена в печи. Алгоритм решения данной математической модели базируется на итерационной схеме решения задач сопряженного лучисто-кондуктивного теплообмена. Указано, что данная математическая модель прошла параметрическую идентификацию по данным промышленного эксперимента и расхождение по значениям температуры имеет удовлетворительную сходимость. По результатам математического моделирования предложен новый тепловой режим, согласно которому удельный расход условного топлива может быть снижен на 4,5 кг у. т./т, а коэффициент полезного действия увеличен на 4%.

Специалистами украинской днепропетровской школы [9] также отмечено влияние конструктивных особенностей печи на эффективность отопления. Авторами проведен анализ двух математических моделей лучистого теплообмена: плоского слоя и реальной конфигурации печи, на основании чего показана необходимость учета реальной конфигурации рабочего пространства печи и тепловых потерь через кладку.

Работы уральской металлургической школы [10,11] посвящены использованию зональных методов при моделировании процессов теплообмена в высокотемпературных печах.

В работе [10] приводится способ моделирования сложного теплообмена в печи с помощью зо-

нального метода или, как отмечает автор [11], метода крупной сетки. Идея зонального метода заключается в разбиении системы, в которой происходит теплообмен, на объемные и поверхностные зоны, в пределах которых все теплофизические характеристики можно приближенно считать постоянными. Автор работы [11] указывает, что с позиции точности и быстродействия количество зон при расчете процессов теплообмена в энерготехнологическом агрегате должно составлять около 200–300. Однако, как отмечает автор [10], при использовании этого метода возникает проблема при расчете отражений излучения поверхностными зонами. Использование резольвентного зонального метода вместо классического позволяет исключить потоки эффективного излучения, а учет отражений производится путем расчета разрешающих обобщенных угловых коэффициентов излучения. Также автором [11] отмечено, что упрощенные инженерные расчеты, применяемые при конструировании печей, как правило, не позволяют проводить детализированные многовариантные расчеты с выбором оптимальных конструктивных и режимных параметров с учетом не только интегральных, но и локальных характеристик теплообмена (тепловые потоки, температуры, скорости). А это исключает возможность детального анализа таких важнейших показателей тепловой работы, как гибкая переменная производительность (темп), стойкость кладки, качество нагрева, длина и месторасположения факела, размещение нагревательных элементов, оптимальные траектории нагрева для АСУТП, места установки датчиков, динамика пусков и остановок. Именно эти показатели определяют на современном уровне возможность оптимизации тепловой работы и конструкций теплоагрегата. Автор также отмечает, что самые передовые методы расчета и моделирования процессов теплообмена в печах основаны на применении систем САПР и компьютерного анализа.

В работе [12] показано, что одним из основных направлений развития методов математического моделирования сложных теплофизических процессов в настоящее время является разработка и применение мощных программных комплексов как основы для решения весьма широкого круга задач. Детерминированные математические модели теплофизических процессов, протекающих в промышленных печах, давно и широко используются исследователями и проектировщиками для совершенствования конструкций и режимов работы промышленных печей. При этом наиболее важными практическими задачами их совершенствования являются уменьшение угара металла в печах,

экономию топлива и снижение образующихся при горении парниковых газов. Однако качество этих моделей нельзя считать удовлетворительным с точки зрения возможности надежного решения многих практических задач, главным образом, математического описания движения газов в рабочих камерах печей. Между тем, как отмечают авторы, без решения задач этого типа невозможно с достаточной точностью и достоверностью описать процессы конвективного переноса теплоты и массы, играющие важную роль в формировании поля температуры и поля концентраций компонентов газовой среды. Указанное обстоятельство обусловлено чрезвычайной сложностью процесса турбулентного течения газа в камерах при наличии процессов горения и теплообмена. Авторы отмечают, что инженерные расчеты могут быть использованы лишь для получения ориентировочных данных, в то время как последние достижения нового направления науки, называемого в зарубежной литературе вычислительной гидродинамикой (CFD), позволяют существенно повысить качество рассматриваемых математических моделей за счет детального описания газодинамики рабочего процесса печи. Фактически создается новый математический инструмент для инженеров-исследователей и конструкторов, работающих в области промышленной теплоэнергетики, металлургической теплотехники и др. Проанализировав зарубежную литературу, авторы отмечают, что любая серьезная реконструкция металлургической печи включает в себя в качестве необходимого этапа разработку математической модели на базе какого-либо программно-вычислительного комплекса.

Авторами работы [13] проведен анализ применения современных методов моделирования для расчета тепловой работы топливных нагревательных печей. Отмечено, что современные методы расчетов сложного конвективно-радиационного теплообмена с учетом процессов горения топлива позволяют оценить влияние числа и расположения горелочных устройств, а также их конструктивных особенностей на качество сжигания топлива и нагрева изделий в печах различного типа. Указано, что на сегодняшний день существует ряд мощных коммерческих программных комплексов, в которых реализованы эти методы, например, Fluent, Phoenix, Ansys, Comsol и др. Образование вредных веществ при горении можно рассчитать с помощью программного комплекса Chemkin, который может быть подключен к Fluent как дополнительный модуль. Однако следует отметить, что в приведенных комплексах отсутствует возможность расчета различной тепловой обработки ма-

териалов, окисления металла и других технологических процессов. Необходимо отметить высокую сложность и значительную стоимость лицензии для этих программ, с другой стороны, наличие таких комплексов повысило уровень требований, предъявляемых к современным моделям. Авторы отмечают, что для упрощения решения задач движения они используют уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости, которые решаются в примитивных переменных с использованием разнесенных сеток для компонентов скорости.

На стадии предпроектных исследований при модернизации промышленных печей необходимо оценивать не только интегральные характеристики теплообмена, но и детализированные локальные характеристики – показатели равномерности в объеме рабочего пространства и по сечению обрабатываемых изделий [14, 15]. Одновременно с процессами теплообмена требуется оценивать и гидроаэродинамику потоков наряду с определением локальных характеристик. Авторы также отмечают, что появившиеся в последнее время зарубежные коммерческие программные средства (Phoenix, Fluent, Deform, Ansys, Comsol и др.) в той или иной степени могут быть применены при решении указанных проблем. Однако при использовании этих программ часто проявляется отсутствие достоверной информации о заложенных в них алгоритмах, что затрудняет возможности развития и усовершенствования программ пользователем по мере возникновения новых задач. В свою очередь, авторы рекомендуют использовать динамический зонально-узловой метод расчета (ДЗУ-метод), разработанный в УГТУ-УПИ, используемый в программном комплексе GERB. С точки зрения авторов работ, основная сложность моделирования заключается в геометрическом и режимном сопряжении четырех процессов, происходящих в печи (в том числе гидродинамический процесс, лучистый теплообмен, нагрев движущихся заготовок, передача тепла в движущемся поде печи), поэтому были приняты определенные геометрические упрощения. Согласно методике, предложенной авторами, конвективный перенос энергии от факелов к поду и заготовкам должен определяться в процессе решения уравнений движения и переноса тепла, а не задаваться априори в виде коэффициентов теплоотдачи конвекцией. В качестве граничных условий для скоростей авторы предлагают принимать условия Дирихле на поверхностях всех стенок печи, заготовок и в выходных сечениях туннелей горелок, а для температур – условия Дирихле только на поверхности заготовок и в выходных сечениях туннелей горелок, при этом на

внутренних стенках печи температуры предлагается рассчитывать из решения уравнений их теплового баланса, а во внешнюю среду – с заданным коэффициентом теплопередачи 1–2 Вт/(м²·К). При расчете лучистого теплообмена предлагается разбивать печь на участки и зоны, а заготовки – только на поверхностные зоны, при этом только одна зона имеет контакт с подом, а все остальные – с газовой средой. При этом потоки на одинаково ориентированные зоны всех заготовок одного расчетного участка печи одинаковы. Торцы заготовок, обращенные к стенкам печи, разделяются на секторы по границам смежных зон и имеют те же номера (торцы получают некоторый средний поток тепла из всех зон заготовки). Граничные условия для пода: условия Дирихле на верхней части пода, условия III рода на нижней части подины и условия IV рода для правого и левого торцов. В качестве численного метода решения системы уравнений используется метод неполной нижней и верхней факторизации, а для решения уравнений Пуассона – метод сопряженных градиентов. Следует отметить, что при проведении параметрической идентификации модели расхождение опытных и расчетных данных по температуре заготовок в некоторых зонах печи достигло 10–15%.

В работах [16, 17] рассмотрено математическое моделирование камерной термической печи периодического действия. Авторы использовали современный ДЗУ-метод моделирования с одновременным расчетом как температурных, так и скоростных полей в поперечных и продольных сечениях печи, при этом трехмерное математическое моделирование камерной печи использовалось при определении полей скоростей и температур по периметру печи и в межтрубном пространстве садки труб для количественной оценки интенсивности локального омывания труб продуктами сгорания с целью выбора расположения горелок, а также для расчета теплоотдачи от продуктов сгорания к трубам. Авторы приняли следующее допущение: факел полагается полностью сгоревшим на выходном срезе туннеля. Моделирование включало в себя расположение горелок, при котором происходит наиболее равномерное омывание дымом поверхностей труб, а также моделирование гидродинамики и теплообмена. Основной трудностью в процессе моделирования являлась сложность построения и расчета геометрии и сетки с большим количеством заготовок. Поля скоростей и температур определялись путем численного решения системы трехмерных уравнений Навье-Стокса, турбулентности и энергии. Задача трехмерного радиационного теплообмена решалась зональным мето-

дом, обобщенные угловые коэффициенты зон определялись путем прямого численного интегрирования на крупной сетке с последующим сопряжением с мелкой гидродинамической сеткой. Авторами было установлено, что основная масса потоков в печном пространстве между садкой и стенками печи движется со скоростями в пределах 10–100 м/с, а вихревые потоки имеют сложную неординарную структуру с резкими градиентами, сменой направления движения и плохо поддаются описанию, при этом вихревые потоки в межтрубном пространстве определяются немонотонными полями скоростей и давлений на его границах. Результаты данной работы показывают возможность расчета температурных и скоростных полей на таких сложных объектах, как печь с садкой, состоящей из большого количества изделий.

В работе [18] была разработана трехмерная теплогазодинамическая модель кольцевой печи для нагрева трубных заготовок, которая была реализована с помощью аналогичных подхода и расчетных инструментов. Следует отметить, что использованная авторами расчетная схема включает в себя всю печь как единое целое со всеми заготовками и горелочными устройствами.

В работе [19] рассмотрено математическое моделирование сложного теплообмена в камерной печи периодического действия ООО «ССМ Тяжмаш». В основу математической модели было заложено следующее допущение: из горелки истекает газовая смесь, процесс горения в которой завершен (в камере печи горение отсутствует). Это допущение обосновано использованием в печи скоростных горелок, в камере сгорания которых и происходит сжигание топлива. Математическая постановка задачи сводится к записи в декартовой системе координат дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы (уравнение неразрывности), импульса (уравнения Навье-Стокса), энергии и соответствующих начальных и граничных условий. Авторы используют программный комплекс Phoenix, использующий конечно-разностный подход к решению дифференциальных уравнений, а для сокращения машинного счета использована *k-l*-модель турбулентности. При моделировании был учтен радиационный теплообмен, а для аппроксимации конвективных слагаемых используется комбинированная схема. Следует отметить, что при выполнении параметрической идентификации разница расчетных и экспериментальных температур заготовок не превышает 8,5%, а значения температуры контрольной термопары оказались ниже на 15–30% действительной температуры газа.

В работе [20] приводится описание моделирования процесса нагрева слитка в многозонной печи. Авторы предлагают компьютерное моделирование, основанное на совместном применении теории клеточных автоматов и конечно-разностных методов. Для определения температурного поля слитка в процессе ступенчатого нагрева использовали разностную аппроксимацию уравнения теплопроводности. В качестве программного вычислительного комплекса авторы использовали Delphi. Однако следует отметить, что были сделаны упрощения – печное пространство заполнено воздухом, моделирование выполнено для первых 4400 с процесса нагрева, а конечным итогом работы стало определение температурных напряжений, возникающих в слитке за этот промежуток времени, при этом конечное состояние слитка (распределение температуры по слитку в конце нагрева) не было рассчитано.

В работе [21] те же авторы используют клеточно-автоматное моделирование в программном комплексе «ПроТерм-1н» (Delphi) собственной разработки, предназначенного для моделирования процессов нагрева и окисления в слитках, движущихся в многозонных печах. Температурное поле нагревающей среды описывается в виде набора тепловых зон с указанием их температуры и протяженности, т. е., по сути, авторы изначально исключили в предложенной методике моделирования учет технических и конструктивных параметров зон печи (мощность и расположение горелок, гидродинамика и лучистый теплообмен, геометрия рабочего пространства, заготовок и т. д.), что фактически сводится к классическому тепловому расчету печи, оформленного в виде программного комплекса.

В работе [22] отмечается, что зарубежные специалисты RHI Refractories (Австрия) на протяжении последних десятилетий используют метод конечных элементов в качестве эффективного инженерного инструмента в процессе расчета распре-

деления температур в разрабатываемой огнеупорной продукции и при проектировании печей. В качестве программного комплекса была использована DIANA, которая позволяет учитывать гидродинамику и турбулентность процессов. Однако прямое численное решение и прямое численное моделирование этих процессов требует такого разбиения на конечные элементы, при котором размер ячейки будет меньше длины самого малого турбулентного вихря, а шаг по времени меньше, чем масштаб турбулентных флуктуаций. Таким образом, для подобных расчетов необходимы вычислительные ресурсы, отсутствующие в настоящее время на промышленном рынке. В свою очередь авторы работы отмечают, что альтернативой может быть моделирование крупного вихря (LES), при котором находится решение только для самого крупного нестационарного движения, а остальные моделируют, при этом решение уравнений Навье-Стокса с осреднением по Рейнольдсу (RANS), где все турбулентные факторы воздействуют на средний поток, моделируют в функции параметров среднего потока текучей среды. Однако и такой подход требует большого ресурса времени для решения поставленной задачи. Также авторы отмечают, что в данном случае имеет смысл использовать k - ε -модель, но при моделировании только полностью турбулентных потоков. В качестве программного комплекса для таких вычислений предлагается использовать Fluent.

Выполненный анализ методов математического моделирования тепловой работы высокотемпературных нагревательных и термических печей показал, что в настоящее время наряду с традиционными методами решения задач теплопроводности широкое распространение находят программные комплексы, позволяющие учитывать ряд сложных теплофизических и гидродинамических процессов, происходящих в высокотемпературных теплотехнологических установках.

Литература

1. Тимошпольский, В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня / В. И. Тимошпольский. Минск: Навука і тэхніка, 1995.
2. Тимошпольский, В. И. Стальной слиток: в 3-х т. / В. И. Тимошпольский [и др.]. Минск: Белорусская наука, 2001. Т. 3: Нагрев.
3. Кудинов, В. А. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций: учеб. пособ. для вузов / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, В. В. Калашников; под ред. В. А. Кудинова. М.: Высш. шк., 2005.
4. Тимошпольский, В. И. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии / В. И. Тимошпольский, Ю. С. Постольник, Д. Н. Андрианов. Минск: Беларуская навука, 2005.
5. Zienkiewicz, O. C. The finite element method: the basis / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor. Fifth edition. Vol. 1. Bristol: Plant a tree, 2000.
6. Zienkiewicz, O. C. The finite element method: solid mechanics / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor. Fifth edition. Vol. 2. Bristol: Plant a tree, 2000.
7. Zienkiewicz, O. C. The finite element method: fluid dynamics / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor. Fifth edition. Vol. 3. Bristol: Plant a tree, 2000.

8. Ц к и т и ш в и л и, Э. О. Математическое моделирование и усовершенствование тепловой работы многозонной методической печи / Э. О. Цкитишвили [и др.] // Изв. вузов и энергет. объедин. СНГ. Энергетика. 2001. № 2. С. 69–80.
9. С в и н о л о б о в, Н. П. Влияние конструктивных особенностей печи на эффективность сводового отопления / Н. П. Свинолобов, В. Л. Бровкин // Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. НМетАУ: в 2-х кн. Днепропетровск, 2005. Кн. 1. С. 393–408.
10. Б у х м и р о в, В. В. Повышение эффективности зональных методов расчета радиационного и сложного теплообмена / В. В. Бухмиров [и др.] // Тез. докл. и сообщ.: VI Минский междунар. форум по тепло- и массообмену. Минск, 19–23 мая 2008 г. Минск, 2008. Т. 1. С. 193–194.
11. Л и с и е н к о, В. Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Интегрированный энерго-экологический анализ: теория и практика: в 2-х т. / В. Г. Лисиенко. М.: Теплотехник, 2010. Т. 1.
12. А р у т ю н о в, В. А. Развитие методов математического моделирования теплофизических процессов в топливных промышленных печах / В. А. Арутюнов, Т. Б. Ибадуллаев // Металлург. 2011. № 1. С. 33–36.
13. С и б и р ь, А. В. Применение современных методов моделирования для расчета тепловой работы топливных нагревательных печей / А. В. Сибирь, С. И. Решетняк, Я. В. Романько // Теплотехника и энергетика в металлургии: сб. тр. XV Междунар. конф. Днепропетровск, 7–9 октября 2008 г. Днепропетровск, 2008. С. 204–205.
14. Л и с и е н к о, В. Г. Применение современных методов математического моделирования при предпроектных исследованиях процессов / В. Г. Лисиенко [и др.] // Сталь. 2006. № 8. С. 84–88.
15. Л и с и е н к о, В. Г. Современные подходы к методам предпроектных модельных исследований при создании промышленных печей и агрегатов XXI века / В. Г. Лисиенко [и др.] // Пече-трубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: материалы III междунар. конгресса. 2008. С. 6–24.
16. Л и с и е н к о, В. Г. Промышленная печь XXI века. Конструкция, тепловые режимы, автоматизация / В. Г. Лисиенко [и др.] // Пече-трубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: материалы II междунар. конгресса. 2006. С. 12–25.
17. Л и с и е н к о, В. Г. Разработка термической печи усовершенствованной конструкции / В. Г. Лисиенко [и др.] // Сталь. 2006. № 4. С. 63–66.
18. Л и с и е н к о, В. Г. Разработка трехмерной теплогазодинамической модели кольцевой печи для нагрева трубных заготовок / В. Г. Лисиенко [и др.] // Пече-трубостроение: тепловые режимы, конструкции, автоматизация и экология: материалы II междунар. конгресса. 2006. С. 152–162.
19. И б а д у л л а е в, Т. Б. Математическое моделирование сложного теплообмена в камерной печи периодического действия / Т. Б. Ибадуллаев, В. А. Арутюнов, И. А. Левицкий // Изв. вузов. Черная металлургия. 2006. № 7. С. 49–52.
20. Ч и ч к о, А. Н. Моделирование процесса нагрева слитка в многозонной печи / А. Н. Чичко, А. С. Бороздин // Сталь. 2006. № 1. С. 46–48.
21. Ч и ч к о, А. Н. Компьютерная система «ПроТерм-1н» для моделирования ступенчатого нагрева слитков / А. Н. Чичко, Н. В. Андрианов, А. С. Бороздин // Сталь. 2005. № 11. С. 66–71.
22. М а р ш а л л, Х. У. Применение анализа методом конечных элементов и вычислительной гидродинамики при разработке огнеупорной продукции / Х. У. Маршалл, О. Цах // Сталь. 2005. № 9. С. 28–31.