

Ускорение процессов моделирования при анализе ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ

Г.В. Кулинченко, Е.Н. Мозок

Сумский государственный университет, 2 ул. Р-Корсакова, Сумы, Украина

heorhy@rambler.ru, mozok_e@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены задачи построения и реализации модели распределения теплового поля, характеризующего протекание тепловых процессов. Модель поля формируется в результате анализа теплового излучения объекта. Необходимость оптимизации процесса в реальном масштабе времени обуславливает требования ускорения процесса моделирования поля.

Ключевые слова

Тепловое поле, пирометрия, метод конечных элементов, параллельные вычисления, GPU, CUDA.

1 Введение

Эффективность процессов теплообразования в топках паровых котлов электростанций обеспечивается в результате оптимизации протекающих тепловых процессов. В настоящее время известно много различных критериев оценки эффективности теплообразования. Наиболее перспективным при построении управляющих систем являются такие критерии, который позволяют оптимизировать процесс в реальном масштабе времени.

Однако нестационарность технологических режимов и значительное число управляемых переменных процессов теплообразования настолько усложняет реализацию задачи управления, что оптимизация по общему критерию сводится к управлению по частным оценкам. Определяющую роль в формировании критерия играют возможности ведения оперативных измерений текущих параметров.

Рассматривая возможности идентификации объекта по измеренным параметрам в аспекте управления, представляется целесообразным получить его описание в виде теплового поля, конфигурацию которого можно изменять в соответствии задачами управления. Тогда на основе анализа распределения теплового поля, изменяющегося как по высоте, так и в поперечном сечении топочной камеры, возможно достижение оптимальных параметров процесса сгорания. Ввиду сложности взаимодействия поля поступающего воздуха с полем зоны горения топлива, распределенных в едином объемном пространстве объекта, анализ параметров горения может быть проведен только в результате численного моделирования.

Таким образом, необходимость проведения обработки получаемых данных в режиме реального времени обуславливает повышенные требования к быстродействию процесса обработки информации.

2 Анализ предшествующих исследований

Методология моделирования, основанная на аналитических выражениях и экспериментальных исследованиях теплообмена в топках паровых котлов, изложенная в работе [1], позволяет проводить расчеты, которые учитывают особенности процессов излучения, поглощения и рассеяния энергии как в объеме среды, так и на граничных поверхностях. При этом в силу осложнений расчетов теплообмена излучением, связанного с другими механизмами переноса энергии (теплопроводность, конвекция), которые протекают в условиях горения топлива, точное решение поставленной задачи практически невыполнимо.

Зональные методы расчета теплообмена в огневых камерах [2], основанные на условном делении топки на ряд объемных и поверхностных зон, предполагают замену этих зон на конечное число ступенчато-прерывных однородных участков, в пределах которых температура и все физические характеристики принимаются постоянными. При этом интегральные уравнения теплообмена излучением заменяются аппроксимирующей конечной системой алгебраических уравнений. Из решения этой системы уравнений совместно с уравнениями

движения, конвективного теплообмена и горения определяются неизвестные характеристики температуры и потоки энергии между зонами. Но теплообмен в топочной камере зависит не только от объемов воздуха, подаваемого в топку, расходов топлива, но и от аэродинамической структуры газо-воздушных потоков. Кроме того, позонные (одномерные) расчеты не позволяют четко определить зоны и уровень максимальных тепловых нагрузок, выяснить аэродинамические причины смещений факела.

Для повышения точности расчета локальных и усредненных характеристик радиационного теплообмена впоследствии [3] было предложено учитывать коэффициенты распределения оптических и термических неоднородностей внутри зон. Практическое использование зонального метода расчета, в основу которого положены уравнения баланса энергии для всех условно изотермических объемных и поверхностных зон, показано в инженерной апробации технических возможностей метода [4].

Противоречия между точностью моделирования и временем вычислений, которые разрешаются на основе компромисса между величиной шага вычислений и размерностью системы уравнений, долгое время определялись вычислительными возможностями используемых вычислительных средств. Поэтому при моделировании тепловых полей использовались альтернативные методы, например, поэтапное моделирование [5] или раздельное моделирование взаимодействующих полей [6].

Существенный прогресс в представлении тепловых полей стал заметен в результате использования численных методов моделирования. Самым распространенным из них является метод конечных разностей (МКР) [6]. Он применяется для анализа задач с прямолинейными границами областей определения функций, поскольку строятся на базе регулярных сеток, при этом особенности геометрии области учитываются только в около граничных узлах. Метод граничных элементов (МГЭ) [7], сочетая достоинства аналитических и численных методов, позволяет легко описать объект любой формы, обладает высокой устойчивостью, более точно описывает распределение температур при небольшом числе элементов по сравнению с МКР. В методе конечных элементов (МКЭ) [8] разбиение на элементы производится с учетом геометрических особенностей области, что позволяет за счет большего числа элементов по сравнению с МГЭ решить и нелинейную задачу полей сложной формы. МКЭ и МКР различны в том, что в МКР аппроксимируются производные искомого функций, а МКЭ – само решение, т.е. зависимость искомого функций от пространственных координат и времени. Общей проблемой методов является высокая размерность результирующей системы алгебраических уравнений (несколько десятков тысяч в реальных задачах). Поэтому реализация МКР и МКЭ требует разработки специальных способов хранения матрицы коэффициентов системы и методов решения последней.

Решение практических прикладных задач моделирования, базирующихся на перечисленных методах, характеризуется трудоемкостью написания и отладки компьютерных программ. Поэтому в исследовательской среде ряд коммерческих программных продуктов (ANSYS, STAR-CD, FLUENT, CFX, MARC, PHOENICS и др.) получил широкое распространение. В этих продуктах в основном используются традиционные вычислительные методы, при этом внутреннее содержание скрыто для пользователя программного комплекса. Поэтому трудно самостоятельно приспособить его к решению задачи, не предусмотренной разработчиками. Дальнейшее совершенствование программного обеспечения вызывает необходимость разработки новых численных методов решения нелинейных уравнений, обладающих скоростью сходимости, близкой к оптимальной, и высоким уровнем формализации и параллелизма. В ряде случаев огромные размеры машинного кода и сопутствующих программ, достигающих сотен мегабайт, приводят к потере гибкости и невозможности решения задач оценки поля в реальном масштабе времени.

3 Постановка задачи

Построение математической модели распределения теплового поля топки базируется на пространственном уравнении теплопроводности вида:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q(C_\gamma)}{C_\gamma} \quad (1)$$

где: T – температура среды; τ – время; a – коэффициент теплопроводности среды; C_γ – объемная теплоемкость среды; Q – плотность мощности источника тепла; x, y, z – координаты пространства.

В начальный момент времени температура среды равна T_0 :

$$T(x, y, z, 0) = T_0$$

Заданы граничные значения температур на стенках топki:

$$T_{cp} = T(x_{cpi}, y_{cpj}, z_{cpk})$$

где: i, j, k – порядковый номер датчика теплового излучения объекта;

а также тепловой поток в канале:

$$-\beta \frac{\partial T}{\partial n} = Q_{cp}(x_{cp}, y_{cp}, z_{cp})$$

где β - коэффициент теплоотдачи; n - вектор нормали к поверхности раздела.

В общем случае распределение $T(x, y, z)$ заранее неизвестно, и требуется найти значения $T(x, y, z)$ в пространстве топки. Значения температур определяются в узловых точках пространства и являются переменными. Область моделируемого пространства (рис.1) разбивают на элементы, на каждом элементе определяют соответствующую функцию. Значения $T(x, y, z)$ в узлах «подстраиваются» таким образом, чтобы обеспечить наилучшее приближение к истинному температурному распределению.

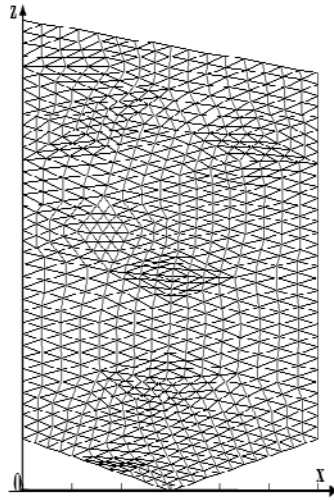


Рис.1. Построение сетки топочной камеры.

Эта подстройка осуществляется посредством минимизации функционала, строящегося на основе дифференциальных уравнений, описывающих процесс:

$$J = \iiint \left[\frac{1}{3} a(\text{grad}T) - QT \right] dx dy dz \quad (2)$$

В результате решения уравнения (1) по МКЭ соответствует нахождению функции $T(x, y, z)$ в данный момент времени, которая минимизирует функционал (2) [8] и удовлетворяет заданным граничным условиям.

В итоге задачу нахождения распределения температуры в пространстве топочной камеры можно представить в матричном виде:

$$\left\{ \frac{\partial J}{\partial T_n} \right\} = [H] * \{T\} - \{Q_u\}$$

где $[H]$ - глобальная матрица теплопроводности; $\{Q_u\}$ - вектор тепловых источников.

Таким образом из рассмотренных приведенных соотношении следует, что для построения модели теплового поля топочной камеры требуются большие вычислительные ресурсы, включая возможность проведения параллельных вычислений на многопроцессорных системах.

Помимо математического аспекта постановки задачи исследований, функциональный аспект проводимых исследований формулируется как оценка и поиск факторов увеличения быстродействия процесса моделирования теплового поля, обеспечивающего возможности оптимизации процесса в реальном масштабе времени.

4 Решение задачи моделирования теплового поля

Исследования распределения температуры внутри топки проводились на основе классического подхода к численному моделированию процессов в распределенных объектах. Процесс моделирования, в котором реализуются основные и сервисные функции, строится по схеме: препроцессор – процессор – постпроцессор.

Препроцессор, взаимодействуя с модулем ввода, обеспечивает ввод исходных данных, описание геометрии объекта и генерацию сеточного разбиения. Процессор(вычислитель), в соответствии с разработанными

алгоритмами, производит вычисления значений узловых температур. При этом формируется матрица $[H]$ - теплопроводности и вектор тепловых источников $\{Q_u\}$. Поскольку каждый элемент матрицы рассчитывается независимо от остальных, то этот этап расчетов проводится параллельно во времени, обеспечивая решение системы уравнений (3). Главной задачей постпроцессора является визуализация полученных данных.

Для реализации разработанной модели был использован математический пакет MatLab, в который включен пакет расширений для использования метода конечных элементов PDE Toolbox Matlab (PDE) [9]. Функциями *pdeinit* и *pdetool* запускаются GUI-приложение PDETool, которое позволяет в интерактивном режиме выполнять операции препроцессора по подготовке PDE модели (прорисовка геометрии, задание граничных условий и распределения коэффициентов PDE и др.), решать PDE (процессор) и визуализировать решение (постпроцессор). Функция *pdetool* с входными параметрами выполняет различные команды GUI-приложения PDETool. Визуализация модели теплового поля одного из режимов топки приведена на рис.2.

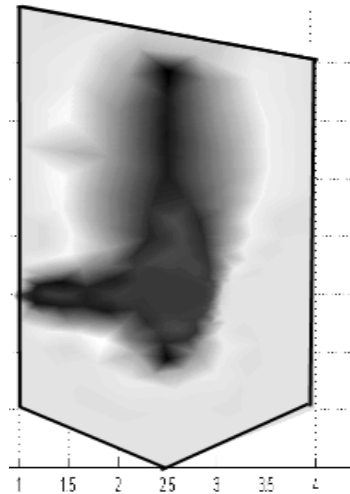


Рис.2. Визуализация теплового поля топочной камеры.

Использование технических средств на основе процессора Intel Core i3-1150 с частотой 3,5 ГГц, оперативной памяти 8 Гб, а также видеокарты NVidia GeForce GTX 280 в качестве GPU, позволило ускорить процесс моделирования за счет приложения MatLab «Поддержка GPU Parallel Computing Toolbox. Поскольку в процессе моделирования выполняется большое количества однотипных операций, то распараллеливание расчетов позволяет ускорить процесс моделирования на данном этапе исследований в 1.5 раза.

5 Заключение

В результате рассмотрения задачи построения модели распределения теплового поля сконфигурировано техническое обеспечение системы и разработан алгоритм обработки данных, поступающих от пирометрических датчиков. Недостаток реальных экспериментальных данных на данном этапе исследований затрудняет оценку адекватности рассмотренной модели. Полученные результаты позволяют использовать разработанный инструментарий для оценки распределения теплового поля топки.

Литература

- [1] А. Г. Блох: Теплообмен в топках паровых котлов. -Л., Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. - 240 с.
- [2] Ю. А. Журавлев: Разработка зональной математической модели теплообмена в топках котельных агрегатов и исследование ее свойств. *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*, № 6, с. 133-139, 1976.
- [3] В. Н. Адрианов: Физико-математические основы аналогии различных процессов переноса в энергетических и технологических устройствах. -Минск Изд. Ин-та теплообмена АН БССР, с. 86—91, 1981.
- [4] Н. С. Hottel, А. F. Sarofim: Radiative transfer—Me. New York *Grow-Hill Comp.* 1967. – 519p.
- [5] Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В.Сигалов: Методы расчета теплового режима приборов. -М.: Радио и связь, 1990. – 312с.
- [6] А.А. Самарский, А.В. Гулин: Численные методы. М.: Наука, 1989. 432с.
- [7] К. Бреббия, Ж. Теллес Л. Вроубел: Методы граничных элементов. -М.: Мир, 1987. - 524с.
- [8] Л. Сегерлинд: Применение метода конечных элементов. -М.: Мир, 1979- 393с.
- [9] В.Е. Шмелев: "Partial Differential Equations Toolbox. Инструментарий решения дифференциальных уравнений в частных производных" <http://matlab.exponenta.ru/pde/index.php>