

КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА

Сучкова Л.И.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
г. Барнаул

Моделирование изменения параметров микроклимата является одним из путей решения проблемы максимально эффективного использования существующих энергоресурсов.

Обычно в системах управления микроклиматом подобные задачи решаются путем установки достаточного количества датчиков: как в помещении, так и во всех точках технологического процесса теплоснабжения. Однако можно констатировать, что до сих пор нет четкой методики, позволяющей оптимизировать количество таких датчиков и их месторасположение. Одной из причин возникновения сложившейся ситуации является тот факт, что расчет динамических температурных полей в условиях реальных помещений сталкивается с целым рядом проблем, обусловленных как сложностью эмпирического определения реальных теплофизических свойств и особенностей конструкции исследуемого помещения, так и сложностью компьютерного моделирования процессов теплообмена в жидких и газообразных средах.

Классически подобные задачи решаются методами гидроаэродинамики, и в основе их решения лежат уравнения Навье – Стокса и законы сохранения массы, импульса и энергии [1,2]. При моделировании потоков в жидкой среде необходимо решать системы дифференциальных уравнений в частных производных с учетом свойств пограничного слоя. Погрешности решения связаны с точностью аппроксимации в тонком пограничном слое и с выбором конкретной разностной схемы для расчета. Однако подобный подход к моделированию требует огромных временных ресурсов и основан на множестве допущений (например, наличие одного источника теплоты, отсутствие преград в объеме при циркуляции среды), что затрудняет его использование для расчетов температурных полей для широкой инженерной практики в реальных условиях эксплуатации теплонагревательных приборов с учетом климатических условий. Кроме того, при использовании неявных схем затруднено распараллеливание вычислений.

В связи с этим появилось множество работ, направленных на замену классического подхода подходами, основанными на применении специальных методов вычислительной математики и, в частности, методов, основанных на применении теории клеточных автоматов [3,4,5]. Клеточный автомат является математической моделью, которая позволяет описывать поведение сложных систем, состоящих из большого количества одинаковых элементов, взаимодействующих друг с другом по определенным законам [3]. Рассматривая клеточный автомат как дискретную динамическую систему, будем называть решеткой автомата совокупность пространственных элементов – клеток, граничащих друг с другом. Клетки характеризуются состояниями, описывающими различные свойства соответствующего пространственного объекта. Множество возможных состояний клетки является конечным. Каждое состояние принимает некоторое множество значений. Значение может быть целым числом или числом с плавающей точкой, в зависимости от потребностей задачи.

Совокупность состояний клеток решетки меняется в соответствии с некоторыми законами, которые называются правилами клеточного автомата. Правила определяют, какое значение должно содержаться в клетке в следующий момент времени, в зависимости от значений в некоторых других клетках в текущий момент, а также, возможно, от значения, содержащегося в ней самой в текущий момент. Каждое изменение состояния решетки называется итерацией. Время в рассматриваемой модели дискретно.

Круг задач, для решения которых используются клеточные автоматы, в настоящее время достаточно обширен – это моделирование биологических явлений, анализ социально-экономических систем, распознавание образов, физика космических процессов, задачи механики взаимодействия частиц, аэродинамики. Востребованность клеточных автоматов в научных исследованиях привела к разработке ряда систем для моделирования их функционирования, например

CAM Simulator, CAMEL, CANL, CAPow, Cellsim, CellLab и т.д.

Применительно к решению задач о потоках жидкости и газа несомненным достоинством клеточных автоматов является легкость задания граничных условий, и возможность формирования различных правил для клеток разных типов. Например, при клеточно-автоматном моделировании переноса массы в пространстве различают клетки-источники частиц, граничные и рабочие клетки. При этом состояние одной клетки характеризуется набором частиц, каждая из которых имеет единичную массу, нулевой или единичный вектор скорости, направленный к одной из соседних клеток, причем одновременно в клетке отсутствуют частицы с одинаковыми векторами скорости [4]. Суть моделирования динамики изменения скоростей и переноса массы заключается в реализации на каждом такте работы автомата двух фаз - столкновения и сдвига. При столкновении внутри каждой клетки изменяются состояния ее частиц с учетом сохранения массы и импульса в клетке, что реализует диффузию. На фазе сдвига в соответствии со значениями скоростей осуществляется сдвиг частиц в соседние клетки. Автором [4] предложена модель RD-I, характеризующаяся представлением клетки в виде ромбического додекаэдра, имеющего в пространстве 12 соседей. В работе [4] показано, что эта модель с допустимой погрешностью аппроксимирует уравнения Навье-Стокса и позволяет вычислять поля скорости, давления и плотности жидкости или газа. Однако с применением данного клеточного автомата невозможно вычислять температурные поля.

В данной работе при реализации клеточного автомата в основу была заложена феноменологическая модель, основанная на классическом подходе к описанию физики наблюдаемого явления. В соответствии с данной моделью процесс выполнения вычислений осуществляется так, как это описано в [6,7]. При этом принципиальным отличием является то, что каждый элементарный объем рассматривается именно как клетка, и переход от одного состояния клетки к другому осуществляется так, как это принято в теории клеточных автоматов. Такой подход позволил полностью отказаться от необходимости решения системы линейных уравнений, заменив их решением линеаризованных уравнений классической гидроаэродинамики для шести граней элементарной клетки. Это позволило существенно ускорить процесс вы-

числений, что, в свою очередь, дало возможность существенно усложнить саму физическую модель, которую было решено сделать трехмерной и представить в виде набора отдельных слоев, в каждом из которых соблюдается условие псевдостационарности векторных и скалярных полей.

Для практической реализации моделирования разработана специальная среда, основу которой составляет интерпретатор правил клеточного автомата, осуществляющий вычисления по правилам, описанным с помощью формальной грамматики.

```
<программа> → <начальное описание> EndVar <описание> EndMod
<начальное описание> → <начальное описание>
<область> | <область> | <начальное описание>
<данные> | <данные> | <начальное описание>
<функция> | <функция>
<область> → District <константа> { Cells <размерность> = (<состояние>) }
<состояние> → <состояние>, State(<константа>) = <константа> | State(<константа>) = <константа>
<размерность> → <размерность> [константа] | [константа]
<данные> → var <список>;
<список> → <список>, <переменная> | <переменная>
<переменная> → <идентификатор> | <идентификатор> = <выражение>
<функция> → function () <составной оператор>
<составной оператор> → { <оператор> } | ε
<оператор> → <присваивание> | <составной оператор> | <вызов функции> | <if> | ; | <return>
<if> → if <выражение> <оператор> | if <выражение> <оператор> else <оператор>
<присваивание> → <идентификатор> = <выражение> | State (<константа>) [размерность 1] = <выражение>
<выражение> → <выражение> > <слагаемое> | <выражение> >= <слагаемое> | <выражение> < <слагаемое> | <выражение> <= <слагаемое> | <выражение> != <слагаемое> | <выражение> >== <слагаемое> | <слагаемое>
<слагаемое> → <слагаемое> + <множитель> | <слагаемое> - <множитель> | <множитель>
<множитель> → <множитель> * <элементарное выражение> | <множитель> / <элементарное выражение>
<элементарное выражение> → <идентификатор> | <константа> | <вызов функции> | limit(<выражение> | random | State(<константа>)) <размерность 1>
<размерность 1> → <размерность 1> [выражение] | [выражение]
<вызов функции> → <идентификатор>()
<описание> → <описание> <for>
<for> → District <константа> <составной оператор>
```

Данная грамматика позволяет реализовать гибкое задание правил изменения состояний клеток с применением синтаксических конструкций присваивания, разветвле-

ния, вызова функций. При этом допускается описание переменных, целых и вещественных констант и использование для вычислений случайных чисел, распределенных равномерно на интервале $[0;1]$ или по нормальному закону с заданными параметрами распределения. Ключевое слово *Cell* соответствует клетке, *State* обозначает состояние клетки, а *District* – область. Разработанная грамматика предусматривает, что конструкция, ею порожденная, состоит из двух основных блоков: начального описания и описания правил. Начальное описание представляет собой инициализацию состояния клеток, описания переменных и функций. Вся решётка клеточного автомата разделяется на области (количество областей произвольно), для трехмерной решетки вводится понятие слоя, в пределах которого клетки имеют две координаты. Рассмотрим простой пример описания клеточного автомата в терминах разработанного КС-языка (для простоты будем рассматривать двумерный случай): Пусть решетка клеточного автомата имеет размер 3×3 , количество состояний каждой клетки равно 2, и имеется две области. Автомат задан следующим образом:

```

1  var t=0, j=1;
2  function rul1()
3  {
4      State(0)[i][j]=State(1)[i][j]*j;
5      j=j+1;
6      return State(0)[i][j];
7  }
8  District 0
9  {
10     Cells[0][0] = (State (0)=0, State (1)=1);
11     Cells[1][0] = (State (0)=0, State (1)=2);
12     Cells[2][0] = (State (0)=0, State (1)=3);
13     Cells[2][1] = (State (0)=0, State (1)=4);
14 };
15 District 1
16 {
17     Cells[0][1] = (State (0)=1, State (1)=5);
18     Cells[0][2] = (State (0)=1, State (1)=6);
19     Cells[1][1] = (State (0)=1, State (1)=7);
20     Cells[1][2] = (State (0)=1, State (1)=8);
21     Cells[2][2] = (State (0)=1, State (1)=9);
22 };
23 EndVar

```

В строке (10) задаются состояния для клетки, находящейся в позиции $(0, 0)$, принадлежащей области 0. Аналогично для всех остальных клеток (11-21). В строке (1) описываются переменные, которые можно использовать как в функциях, так и в основном блоке правил. В строках (2-7) описывается функция. Все функции возвращают некоторое значение. Строка (22) означает окончание блока описания.

В блоке основного оператора для клеток,

принадлежащих одной области, задаётся набор правил, позволяющий изменять состояния клеток. Возможно использование условного оператора и присваивания, а также вызов функции. Рассмотрим эти возможности на примере для описанного выше случая:

```

1  for(District 0)
2  {
3      if (State (0)[i][j]<State (0)[i*1][j])
4          State (0)[i][j]=State (1)[i][j];
5      else
6          {
7              if (limit)
8                  State (0)[i][j]=rul1();
9          }
10 }
11 EndMod

```

В строке (1) описывается цикл, который будет выполняться для всех клеток, принадлежащих области 0. Конструкция в строке (4), означает, что 0-му состоянию клетки (i,j) присваивается значение 1-го состояния клетки (i,j) . В строке (3) записан условный оператор. В строке (8) осуществляется вызов функции *rul1()*, которая была описана в блоке описания функций. Строка (11) завершает описание правил для областей. Ключевое слово в строке (7) *limit* означает граничное положение клетки, может использоваться только в условном операторе и принимает значение *true* или *false*. Таким образом, конструкция в строке (7) означает, что если текущая клетка находится на границе между областями, то условие является истинным, иначе ложным. В выражениях возможно использование таких операций, как сложение, вычитание, умножение, деление, сравнение, определение границы области, унарные и логические операции. Синтаксический анализатор правил был реализован методом рекурсивного спуска [8].

В рамках интегрированной среды реализованы инициализация клеточного автомата (задание правил, описание клеток и областей клеток с одинаковыми правилами) и моделирование его функционирования с отображением результатов вычислений. Алгоритмическое описание законов изменения состояний клеток и областей основано на контекстно-свободной грамматике. Программное обеспечение для моделирования работы клеточного автомата состоит из 5 модулей: модуля визуального построения клеточного автомата, модуля создания и анализа правил изменения конфигурации клеточного автомата, модуля генерации файла-сценария, модуля интерпретации файла-сценария и модуля демонстрирования изменения конфигураций клеточного автомата [9].

Модуль визуального построения клеточного автомата позволяет создать начальную конфигурацию клеточного автомата визуально, то есть пользователю предоставляется возможность с помощью цветовой палитры наглядно представить структуру областей клеточного автомата путем их закрашивания в различные цвета. Параметры клеточного автомата представляют собой характеристики решётки клеточного автомата, то есть количество клеток, слоёв (в случае трехмерной решётки), состояний, а также настройку работы клеточного автомата, то есть управление возможностью построения графиков и ходом вычислений (через сколько итераций сохранять, использовать ли при сохранении радиус усреднения, через сколько шагов сравнивать текущую итерацию с предыдущими, через сколько итераций произвести останов).

Клетки объединяются в области, в зависимости от значений и законов изменения их состояний.

Модуль создания и анализа правил изменения конфигурации клеточного автомата представляет собой текстовый редактор для написания правил изменения конфигурации клеточного автомата при переходе его из одного состояния в другое.

После создания начальной конфигурации и задания правил проект можно сохранить в формате XML в так называемый файл сценария, где с помощью специальных тэгов описываются данные проекта, его содержание и модель поведения при демонстрировании. Впоследствии можно изменять файл сценария, и осуществлять его интерпретацию.

Демонстрацию функционирования клеточного автомата можно осуществлять как в пошаговом режиме, так и автоматическом. В процессе вычислений предусмотрено сохранение текущей конфигурации автомата через заданное число итераций, осуществление сравнения текущих значений состояний клеток решетки со значениями на предыдущих итерациях. Реализована возможность усреднения значений состояний клеток по заданному радиусу усреднения. Предусмотрено построение графика зависимости изменения значений состояний клеток и областей от номера итерации.

Разработанное программное обеспечение было протестировано на решении типовой классической задачи с известным решением, в качестве которой была выбрана задача нахождения распределения температуры в замкнутом прямоугольном объеме с за-

дачным значением температур на его стенках. Следующим этапом было нахождение пространственно-временного распределения температурного поля в помещении после внесения в него возмущений при введении нагревающих элементов. В данном случае критерием достоверности полученного решения служили показания датчиков DS1820, расположенных в разных точках помещения и подключенных через сеть MicroLAN к персональному компьютеру через контроллер сети DS9490R.

Результаты проведенного эксперимента показали, что предложенная модель не только позволяет качественно воспроизвести картину наблюдаемого физического явления и характер изменения контролируемой температуры, но и обеспечить погрешность расчета возникающих возмущений температурных полей в пределах 10%. Это позволит использовать разработанную систему для прогнозирования ситуаций, воспроизведение которых в натурном эксперименте нецелесообразно, либо затруднительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патанкар, С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 150 с.
2. Королев, С.А.. Исследование тепловых режимов помещений с помощью моделирования термогравитационной конвекции воздуха // Высокие технологии в механике: Матер. науч.-практ. конф. - Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2002. - с. 84 – 85.
3. Тоффоли, Т., Марголус, Н. Машина клеточных автоматов. - М.: Мир, 1991.- 280 с.
4. Медведев, Ю.Г. Метод моделирования трехмерных потоков жидкости клеточными автоматами // Автометрия. - 2005, том 41, № 3. - С.37-48.
5. Frisch U. a et al. Lattice Gas Hydrodynamics in Two and Three Dimensions // Complex Systems. Vol 1. 1987, P. 649.
6. Самойлович, Г.С. Газодинамика. - М.: Машиностроение, 1990. - 384 с.
7. Себиси, Т., Бредшоу, П. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы. - М.: Мир, 1987. - 592 с.
8. Серебряков В.А., Галочкин М.П., Гончар Д.Р., Фуругян М.Г. Теория и реализация языков программирования. - М.: МЗ Пресс, 2006. - 352 с.
9. Сучкова, Л.И. Синтаксически ориентированный подход к моделированию функционирования клеточных автоматов с пространственной решеткой // Труды международной конференции «Информационные и телекоммуникационные системы и технологии». - СПб, Изд-во Политехн. ун-та, 2007. - С. 391-395.