

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 622691.4:519.711.3

ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ОБЪЕКТОВ

Н.В. КУДИНОВ

(Донской государственный технический университет)

Рассмотрены проблемы, методы и результаты создания программ имитационного моделирования, а также их алгоритмического и программного обеспечения. Проблемы рассмотрены на примерах технологических распределённых объектов, таких как участок магистрального газопровода и многослойная структура материалов, в которой протекают тепловые процессы.

Ключевые слова: *распределённые объекты, имитационное моделирование, математическое моделирование, программы имитации.*

Введение. Решая многие задачи оптимизации, диагностики, управления технологическими процессами, необходимо получать подробную информацию об этом процессе. Как правило, наиболее важная для этих задач информация носит «предсказывающий» характер. Такая информация порождается в ходе имитации, она позволяет ответить на вопрос, как вёл бы себя объект управления и какие бы там протекали процессы, если определённым образом воздействовать на объект. Обладая такой информацией, можно строить эффективные и близкие к оптимальным технические системы.

Имитация в технических системах находит применение в информационно-управляющих диалоговых системах, которые сигнализируют и блокируют последствия «ошибочных» действий оператора технологического процесса.

Имитационное моделирование в информационной поддержке технологических процессов. Особую роль имитация технологических процессов приобретает, когда поведение управляемой системы чрезвычайно сложно предсказать. Одной из таких систем является система распределённых технологических объектов (РТО). Современные специализированные программные пакеты справляются с анализом и синтезом систем РТО на основе их статических характеристик. Непосредственно РТО – широкое понятие, описывающее технологические агрегаты, имеющие дело с распределённой в пространстве средой, в то же время под РТО иногда понимают комплекс технологических объектов, пространственно распределённых по территории производства. В дальнейшем примем первый смысл этого выражения. Наиболее сложные математические модели получаются для распределённых технологических объектов, в которых процессы протекают не только во времени, но и в пространстве. К ним относятся: трубчатые и колонные реакторы, печи, накопители газа (газгольдеры), газопроводы, транспортеры, механические фильтры и фильтруемый материал, среды передачи информации электромагнитными волнами. Распределённость учитывается в математических моделях технологических объектов, когда объем, занимаемый рабочей средой, достаточно большой по сравнению с величинами локальных неоднородностей (волн) в переходных процессах.

Имитационное моделирование как надстройка над математическим моделированием применяется в тех случаях, когда методы аналитического вывода решения оказываются ограничены выбором пространств и метрик, а также необходимой строгостью выводов и доказательств. Суть имитационного моделирования заключается в образовании таких информационных связей (рис. 1) в уравнениях, которые бы имитировали связи в моделируемом объекте другой природы,

например энергетические, массовые и др. Помимо связей в имитационных моделях информация обрабатывается в узлах по более сложным законам, задаваемым уравнениями, иногда дифференциальными. Наиболее просто имитационная модель реализуется в виде программы на языке высокого уровня или как структурно-блочная схема в среде специализированных пакетов (AnySYS, FlowVision, COMSOL, Simulink, и т. д.).

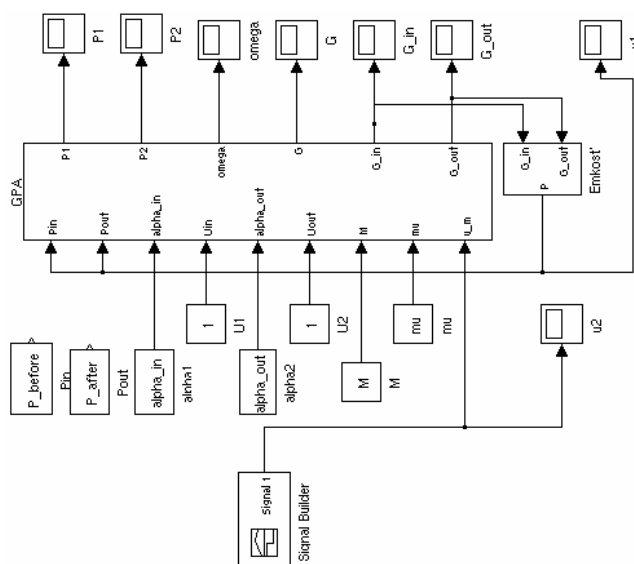


Рис. 1. Имитационная модель газоперекачивающего агрегата в среде пакета Simulink

Проблемы имитационного моделирования. В имитационном моделировании применяются системы методов численного решения, применение которых, в свою очередь, связано с принятием системы обоснованных допущений, позволяющих исследование объекта и процессов, там протекающих, свести к исследованию функций и числовых рядов. Вариации допущений в сторону усиления дают простые математические модели, позволяющие предсказать поведение объекта за небольшое число вычислительных операций. Ослабляя допущения, в ходе аналитического моделирования исследователь-разработчик получает более точную модель. Такие модели описываются более сложными системами уравнений, требующими большего количества вычислений. Предсказывающая способность таких формул по отношению к процессу будет лучшей. Поэтому на этапе построения вычислительных формул и самой имитационной модели стоит проблема принятия системы допущений, которая, с одной стороны, позволит получить нужную информацию, а с другой стороны, позволит рационально организовать вычислительный процесс.

При моделировании многих распределённых технологических объектов принимают допущения, которые условно можно разделить на необходимые и дополнительные. К необходимым можно отнести параметры функций состояния (интенсивности их изменения известны только на некоторых границах или сечениях); среда в технологическом аппарате локально ведёт себя во всех точках достаточно большой области одинаково, а погрешности математических аппроксимаций и пространственно-временной дискретизации качественно не изменяют поведение модели по отношению к моделируемому объекту. Эти допущения позволяют выписать математическую модель. Допущения, принимаемые для упрощения математической и имитационной модели и, как следствие, для уменьшения объёма вычислений, можно отнести к дополнительным. Описанные зависимости поясняются далее.

Желание исследователя сделать моделирование максимально точным приводит к уменьшению глубины допущений, принимаемых при математическом моделировании, что приводит к

появлению сложностей математической и алгоритмической природы. Большое количество допущений позволяет получать простые связи между причиной и следствием выраженными в виде алгебраических уравнений; при меньшем числе допущений получают математические модели в виде системы дифференциальных уравнений. Невозможность в большинстве случаев принять допущение о сосредоточенности процессов в распределённых объектах приводит к математическим моделям в виде систем дифференциальных уравнений в частных производных; при ещё меньшей глубине допущений можно получить интегродифференциальные и статистические уравнения. Естественно, что с первыми объектами – алгебраическими уравнениями – проще иметь дело, а дифференциальные уравнения в частных производных вызывают определённые математические и алгоритмические сложности, особенно когда некоторые математические зависимости, связывающие параметры среды – газа, жидкости – являются нелинейными. Ярким примером может служить модель участка магистрального газопровода (УМГП), в которой учёт распределённости процессов в пространстве и времени – естественная необходимость, а допущения, которые рационально принять: течение осесимметричное, допустимо радиальное усреднение параметров при турбулентном движении (рис. 2) [1]. В этом случае в качестве модели выступает «компактный» математический объект – система дифференциальных уравнений в частных производных [2, 3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} = -\left(1 + \frac{2}{i}\right) \frac{\partial p}{\partial x} v - \frac{\partial v}{\partial x} p - \frac{8\mu\lambda}{iRD} \frac{pv^3}{T} - \frac{8A}{iD} (T - T_{cp}); \\ \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial x} v - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{RT}{\mu p} - \frac{4}{D} \lambda v |v|; \\ \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{8\mu}{iRD} \lambda v^3 - \frac{8AT}{iDp} (T - T_{cp}) - \frac{\partial T}{\partial x} v - \frac{2}{i} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{Tv}{p}. \end{cases} \quad (1)$$

В (1) t, x – независимые аргументы дифференциального уравнения – время и пространственная координата; p, v, T – неизвестные функции двух координат: давление, скорость и температура; μ, R, I – параметры транспортируемого газа: молярная масса, универсальная газовая постоянная, количество степеней свободы молекулы газа; λ, D – параметры, характеризующие трубопровод: коэффициент трения (параметр Дарси – Вейсбаха), диаметр поперечного сечения газопровода; T_{cp} – характеристика среды залегания трубопровода – температура, характеризующая интенсивность потери тепла и, как следствие этого, – полной энергии газа.

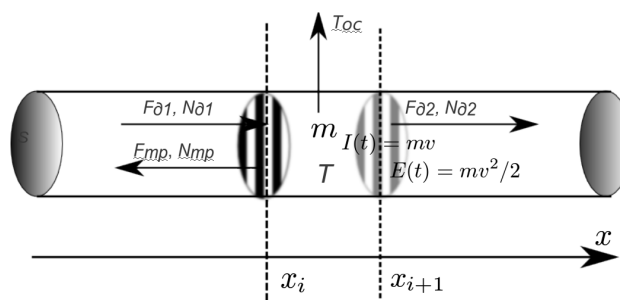


Рис. 2. Расчетная схема взаимодействия частиц газа

Дальнейшие допущения ещё больше огрубляют математическую модель. Предположение об изотермическом поведении газа при транспортировке даёт модель (2), а исключение из модели динамических процессов даёт модель статики (3):

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} v - \frac{\partial v}{\partial x} p \\ \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial x} v - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{RT}{\mu p} - \frac{4}{D} \lambda v |v|; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = -\frac{4 \lambda \mu p v |v|}{D(RT - \mu v^2)}; \\ \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{4 \lambda \mu v^3}{D(RT - \mu v^2)}. \end{cases} \quad (3)$$

На выборе системы допущений сложности и проблемы имитационного моделирования не заканчиваются. Необходимо исследование математических моделей и решение уравнений, их представляющих. Количество итераций вычислительного алгоритма, как правило, велико и зависит от требуемой точности и от пространственно-временных масштабов моделируемого объекта. Данную проблему осложняет ещё одно «необычное» свойство большинства исследуемых процессов – жёсткость. Дифференциальные уравнения, особенно учитывающие несколько видов взаимодействий (например, химические и механические), часто имеют жёсткие решения [4]. Жёсткость – возможность возникновения в модели взаимодействующих процессов с существенно разными скоростями протекания. Область решения более простых алгебраических уравнений может быть «сильно овражистой», что может потребовать большого количества итераций для численного решения. Жёсткость математической модели транспортировки газа по участку магистрального газопровода иллюстрируется спектральными диаграммами линеаризованного приближения математической модели (2). На графиках рис. 3 видно расслоение мод на быстрые и медленные.

Неоднозначен и слабо формализован подход к дискретизации распределённых объектов при аппроксимации дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП). Возможен подход с полной аппроксимацией. В результате получается система алгебраических уравнений большой размерности, описываемая разреженными матрицами. Желание авторов программ максимально использовать хорошо зарекомендовавшие себя разностные методы приводит к частичной аппроксимации ДУЧП по одной из координат, например пространственной, в результате получается система дифференциальных уравнений большой размерности, решаемая в дальнейшем такими методами, как метод Рунге – Кутты, Адамса – Крылова, Милна. Такой подход называется методом прямых или в силу поэтапного перехода – полудискретизацией.

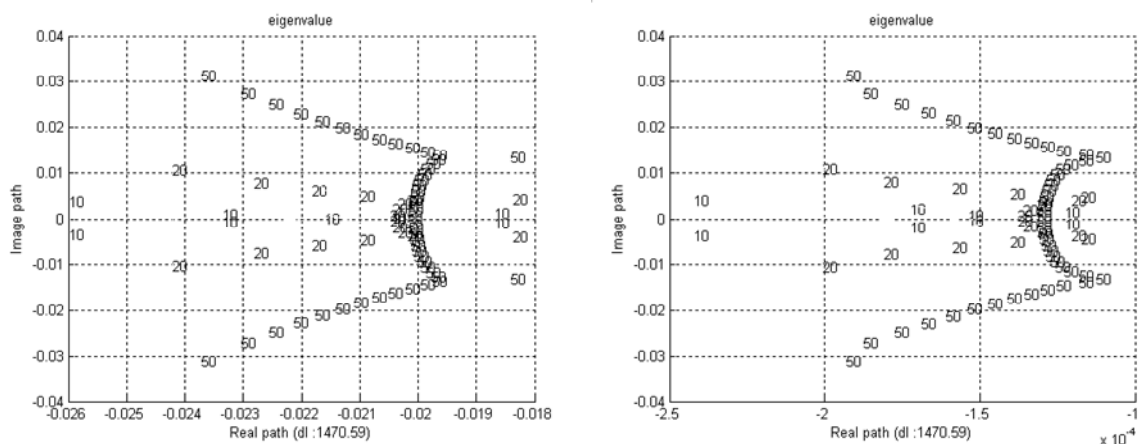


Рис. 3. Расположение мод линеаризованной модели на комплексной плоскости. Цифрами показаны моды, полученные дискретизацией по пространству на соответствующее количество элементов – ячеек

Для вывода, построения алгоритмов моделирования строятся вычислительные формулы, основанные на той или иной математической модели. Для вывода вычислительных формул используется прямая ячеечная алгебраическая аппроксимация дифференциальных уравнений. Она применяется в методах конечных разностей, конечных объёмов (рис. 4) [5–7], конечных элементов и в подавляющем большинстве случаев нарушает интегральный баланс массы, энергии и импульса. Нарушение баланса можно компенсировать построением неравномерной сетки (рис. 5). Этот вопрос подробно исследовался в кандидатской диссертации автора [8] и других публикациях [9] о модели участка магистрального газопровода. Для уравнения неразрывности (4) был получен закон формирования пространственной сетки (5):

$$P_{i+1} \cdot v_{i+1} = P_{i-1} v_{i-1} ; \quad (4)$$

$$l_{i+1} = l_i + \frac{d \cdot (R \cdot \theta - \mu \cdot v_i^2)}{4 \cdot \lambda \cdot \mu \cdot v_i \cdot |v_i|} \cdot \left(\frac{P_{i-1}}{P_i} - \frac{v_{i-1}}{v_i} \right). \quad (5)$$

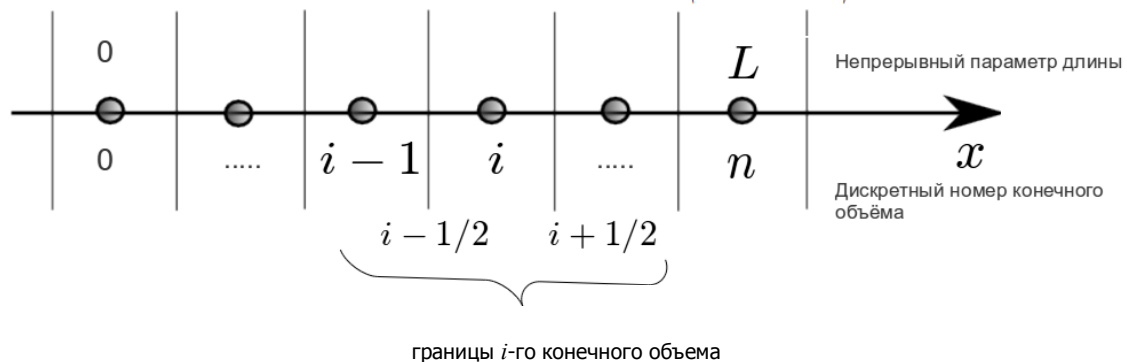


Рис. 4. Схема полудискретизации пространства для моделирования участка магистрального газопровода методом конечных объёмов

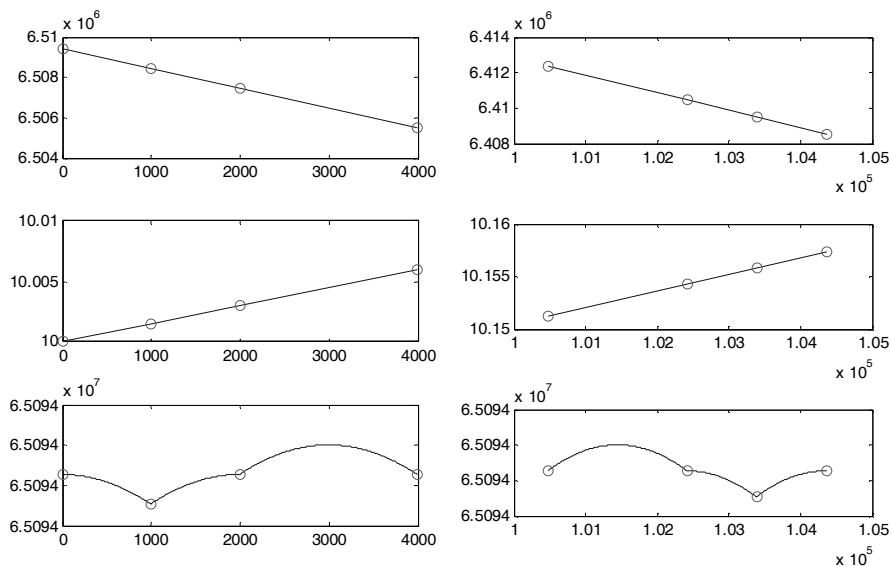


Рис. 5. Диаграммы распределения импульса при дискретизации параметров в уравнении неразрывности

Сохранение подобного баланса называют консервативностью [6]. Одним из способов получения консервативных разностных схем и моделей является непосредственная аппроксимация (по квадратурным формулам) интегралов энергий исходной математической модели.

Для повышения точности моделирования используют разностные схемы повышенного порядка (второго и выше) точности. Такие схемы неплохо моделируют медленноменяющиеся колебания и «гладкие» зависимости времени. При попытке воспроизвести резкие изменения в модели такие разностные схемы ведут себя излишне колебательно, порождая паразитные гармоники. Для решения этой проблемы возвращаются к разностным схемам первого порядка: правосторонним и левосторонним, а общее решение этой проблемы приводит к разностным схемам со сложным переключаемым шаблоном, называемым схемой с уменьшением полной вариации (TVD – Total Variation Diminition). Выражения, которые их описывают, называются лимитерами. В современных научных работах по моделированию течений различной природы исследовано множество лимитеров (limiter): «min-mod», «van Leer», «superbee» и др. [10].

Замена разностного шаблона пространственной аппроксимации с правостороннего на левосторонний шаблон первого порядка (две точки) сильно сказывается на решениях обыкновенного уравнения переноса. Для этого уравнения противотокные дают устойчивое решение [6], что адекватно физике процесса. При выполнении шагов по времени в разностных выражениях соблюдается такая же зависимость. Неявные разностные схемы абсолютно устойчивы при любых шагах численного метода. Явные разностные схемы устойчивы условно, т. е. величина шага ограничена условием Куранта – Фридрихса – Леви (КФЛ), что обосновывается спектральным анализом, при этом условие КФЛ называется спектральным условием Неймана [6, 7]. В кандидатской диссертации [7] подробно изучены спектры линеаризованного приближения математической модели магистрального газопровода, которые показывают предпочтительность центрально-разностной схемы аппроксимации и левосторонней схемы.

Программное обеспечение, поддерживающее исследование. Разработано программное обеспечение (ПО), осуществляющее моделирование участка магистрального газопровода с парой компрессорных станций. ПО представлено в виде законченного модуля – приложения ОС Windows и программы для среды пакета Matlab, которая в силу удобного синтаксиса системы Matlab используется как экспериментальный образец, в котором легко перестраиваются информационные связи, в связи с чем удобно получить модель кольцевого газопровода, энергия газа в котором поддерживается одной компрессорной станцией. Вычислительные выражения получены нами методом полудискретизации исходной математической модели [11].

Для сравнительного анализа подходов к моделированию была разработана программа моделирования одномерного температурного поля набора слоёв материалов методом элементарных энергетических балансов (рис. 6). Программа обладает графическим интерфейсом и работает под управлением системы Matlab, используя среду GUIDE [12, 13].

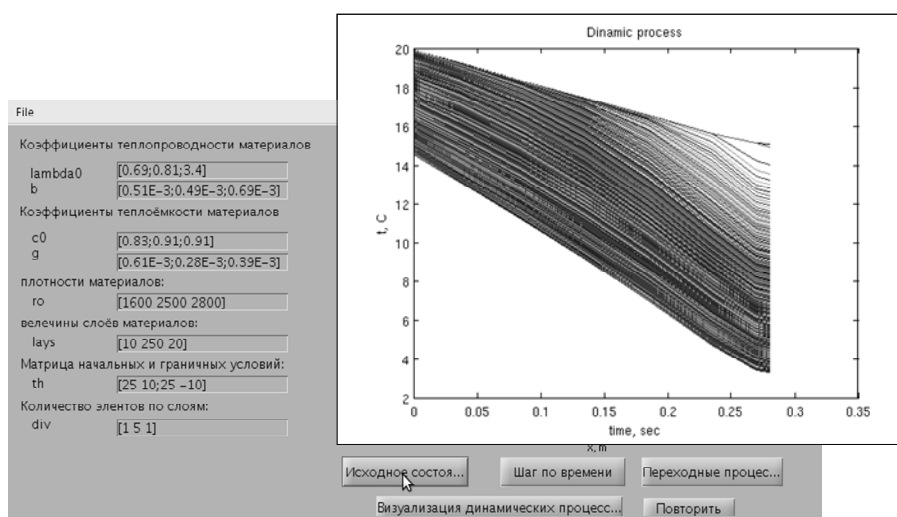


Рис. 6. Интерфейс программы моделирования одномерного температурного поля

В ходе исследования проблем и походов к моделированию распределённых объектов была поставлена задача подробного исследования отдельных этапов моделирования. В соавторстве со студентом Д. Лауром, выполняющим дипломный проект, был разработан программный комплекс исследования разностных аппроксимаций распределённой модели участка газопровода (рис. 7). Допускается ввод произвольных разностных шаблонов и выполнение моделирования по временным шагам.

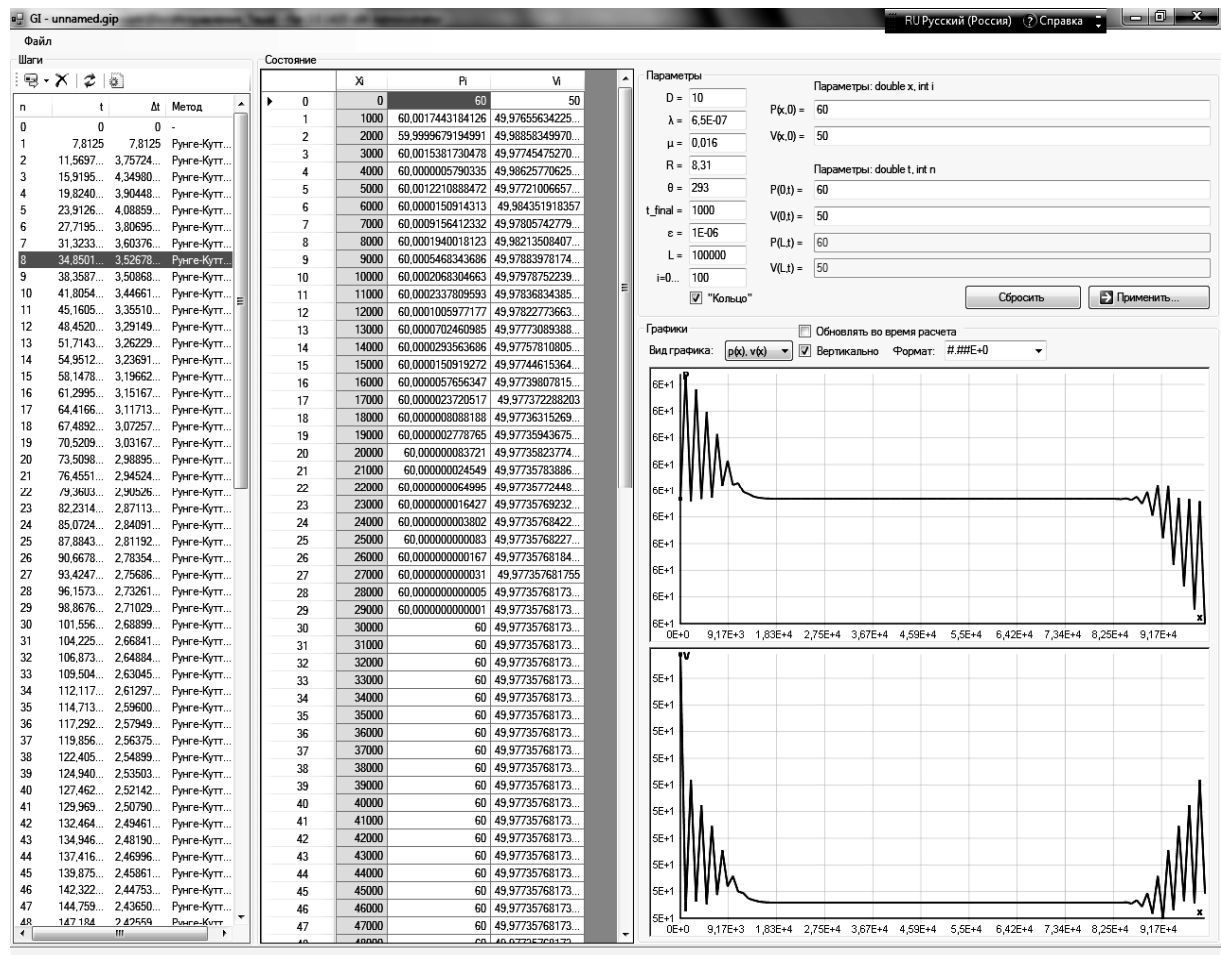


Рис. 7. Интерфейс интегрированной среды исследования разностных аппроксимаций

Отдельным направлением ведётся разработка программы имитационного моделирования типовых распределённых объектов, которая нужна для того, чтобы верифицировать алгоритмы моделирования и проверить адекватность моделей технологическим объектам [14].

В ходе разработки были выработаны принципы построения программ имитационного моделирования распределённых технологических объектов общей природы. Были выделены слои описания моделей, опубликована иерархия классов и архитектура взаимодействия объектов в ходе имитационного моделирования [8, 15].

Заключение. В рамках исследования построены алгоритмы, позволяющие формировать пространственную сетку сбалансированной аппроксимации для шаблонов разностных схем с произвольной структурой; разработаны и протестированы алгоритмы численной интерполяции, интегрирования и дифференцирования, позволяющие моделировать транспортировочные процессы на разнесенных сетках произвольными разностными шаблонами. Разработанные алгоритмы позволяют имитационными методами подобрать рациональный по точности и сходимости разностный аппроксимирующий шаблон.

Библиографический список

1. Селезнёв В.Е. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы / В.Е. Селезнёв, В.В. Алёшин, С.Н. Прялов; под. ред. В.Е. Селезнёва. – М.: МАКС Пресс, 2007. – 695 с.
2. Нейдорф Р.А. Моделирование и имитация процессов транспортировки газа магистральными газопроводами / Р.А. Нейдорф // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-15: сб. тр. междунар. науч. конф. 4–6 июня 2002 г. В 10 т. Т. 8. Секция 8, Тамбов, 2002. – С. 128–132.
3. Нейдорф Р.А. Моделирование динамики магистральных газопроводов с учётом тепловых процессов / Р.А. Нейдорф, В.Е. Бачурин // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-16: сб. тр. XVI междунар. науч. конф.: в 10 т. Т. 3. Секция 3 / СПб. гос. технол. ин-т. – СПб.: Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2003. – С. 183–186.
4. Современные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / под ред. Дж. Холла, Дж. Уатта. – М.: Мир, 1979.
5. Пантакар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С.В. Пантакар; под ред. В.Д. Виленского. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.
6. Самарский А.А. Математическое моделирование: идеи, методы, примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2002. – 320 с.
7. Математическое моделирование гидрометеорологических процессов. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://pages.rshu.ru/mamor/MaMOP.html> (дата обращения: 15.05.2009).
8. Кудинов Н.В. Методы обработки информации для задач управления переходными процессами в магистральных трубопроводах: дис. ... канд. техн. наук. – Ростов н/Д, 2006. – 215 с.
9. Kudinov N. An Application of Integral-Interpolation Method for Sampling of Nonlinear Gas Transportation Models / N. Kudinov, R. Neydorf, E. Teterevleva // Paper of Workshop Odborníkov z Univerzít, Vysokých Škôl a Praxe v Oblasťi Automatizácie a Riadenia, Technická univerzita v Košiciach 16-18 февраля 2011 г., Stará Lesná.
10. Галанин М.П. Нелинейная монотонизация схемы К.И. Бабенко («квадрат») для уравнения переноса / М.П. Галанин, Т.Г. Еленина [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.keldysh.ru/papers/2002/prep4/prep2002_4.html (дата обращения: 03.04.2011).
11. Кудинов Н.В. Метод конечных объёмов в применении к задачам моделирования трубопроводного транспорта газа / Н.В. Кудинов // Системный анализ, управление и обработка информации: тр. 1-го междунар. семинара студентов, аспирантов и учёных. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – С. 74–79.
12. Кудинов Н.В. Программное обеспечение распределённого моделирования нестационарного температурного поля в локальной компьютерной сети / Н.В. Кудинов, В.А. Бек // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. Спецвыпуск. – 2009. – Т. 9. – Ч. II: техн. науки. – С. 31–34.
13. Кудинов Н.В. Перспективные подходы к параллельному моделированию одномерных технологических объектов / Н.В. Кудинов, В.А. Бек // Системный анализ, управление и обработка информации: тр. 1-го междунар. семинара студентов, аспирантов и учёных. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – С. 59–68.
14. Кудинов Н.В. Алгоритмы моделирования типовых распределённых химико-технологических объектов / Н.В. Кудинов, А.А. Болдырева, Е.В. Тетеревлева // Системный анализ, управление и обработка информации: тр. 1-го международного семинара студентов, аспирантов и учёных. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – С. 68–74.
15. Кудинов Н.В. Модульный подход к компьютерному моделированию участка магистрального газопровода / Н.В. Кудинов, А.А. Болдырева // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 10. – № 4. – С. 501–507.

Материал поступил в редакцию 06.06.11.

References

1. Seleznyov V.E. Matematicheskoe modelirovanie truboprovodny`x setej i sistem kanalov: metody`, modeli i algoritmy` / V.E. Seleznyov, V.V. Alyoshin, S.N. Pryalov; pod. red. V.E. Seleznyova. – M.: MAKS Press, 2007. – 695 s. – In Russian.
2. Nejdorf R.A. Modelirovanie i imitaciya processov transportirovki gaza magistral`ny`mi gazoprovodami / R.A. Nejdorf // Matematicheskie metody` v tekhnike i texnologiyax – MMTT-15: sb. tr. mezhdunar. nauch. konf. 4–6 iyunya 2002 g. V 10 t. T. 8. Sekciya 8, Tambov, 2002. – S. 128–132. – In Russian.
3. Nejdorf R.A. Modelirovanie dinamiki magistral`ny`x gazoprovodov s uchyotom teplovy`x processov / R.A. Nejdorf, V.E. Bachurin // Matematicheskie metody` v tekhnike i texnologiyax – MMTT-16: sb. tp. XVI mezhdunar. nauch. konf.: v 10 t. T. 3. Sekciya 3 / SPb. gos. texnol. in-t. – SPb.: Izd-vo SPbGTI(TU), 2003. – S. 183–186. – In Russian.
4. Sovremennyy`e metody` resheniya oby`knovenny`x differencial`ny`x uravnenij / pod red. Dzh. Xolla, Dzh. Uatta. – M.: Mir, 1979. – In Russian.
5. Pantakar S.V. Chislenny`e metody` resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti / S.V. Pantakar; pod red. V.D. Vilenskogo. – M.: E`nergoatomizdat, 1984. – 368 s. – In Russian.
6. Samarskij A.A. Matematicheskoe modelirovanie: idei, metody`, primery` / A.A. Samarskij, A.P. Mixajlov. – 2-e izd., ispr. – M.: Fizmatlit, 2002. – 320 s. – In Russian.
7. Matematicheskoe modelirovanie gidrometeorologicheskix processov. [E`lektron. resurs]. Rezhim dostupa: <http://pages.rshu.ru/mamop/MaMOP.html> (data obrashheniya: 15.05.2009). – In Russian.
8. Kudinov N.V. Metody` obrabotki informacii dlya zadach upravleniya perexodny`mi processami v magistral`ny`x truboprovodax: dis. ... kand. texn. nauk. – Rostov n/D, 2006. – 215 s. – In Russian.
9. Kudinov N. An Application of Integral-Interpolation Method for Sampling of Nonlinear Gas Transportation Models / N. Kudinov, R. Neydorf, E. Teterevleva // Paper of Workshop Odbornikov z Univerzit, Vysokych Skol a Praxe v Oblasti Automatizacie a Riadenia, Technická univerzita v Košiciach 16-18 fevralya 2011 g., Stará Lesná.
10. Galanin M.P. Nelinejnaya monotonizaciya sxemy` K.I. Babenko («kvadrat») dlya uravneniya perenosa / M.P. Galanin, T.G. Elenina [E`lektron. resurs]. – Rezhim dostupa: http://www.keldysh.ru/papers/2002/prep4/prep2002_4.html (data obrashheniya: 03.04.2011). – In Russian.
11. Kudinov N.V. Metod konechny`x ob`yomov v primenenii k zadacham modelirovaniya trubo-provodnogo transporta gaza / N.V. Kudinov // Sistemny`j analiz, upravlenie i obrabotka informacii: tr. 1-go mezhdunar. seminar studentov, aspirantov i uchyony`x. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 2010. – S. 74–79. – In Russian.
12. Kudinov N.V. Programmnoe obespechenie raspredelyonnogo modelirovaniya nestacionarnogo temperaturnogo polya v lokal`noj komp`yuternoj seti / N.V. Kudinov, V.A. Bek // Vestn. Donsk. gos. texn. un-ta. Speczvy`pusk. – 2009. – T. 9. – Ch. II: texn. nauki. – S. 31–34. – In Russian.
13. Kudinov N.V. Perspektivny`e podxody` k parallel`nomu modelirovaniyu odnomerny`x texnologicheskix ob`ektov / N.V. Kudinov, V.A. Bek // Sistemny`j analiz, upravlenie i obrabotka informacii: tr. 1-go mezhdunar. seminar studentov, aspirantov i uchyony`x. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 2010. – S. 59–68. – In Russian.
14. Kudinov N.V. Algoritmy` modelirovaniya tipovy`x raspredelyonny`x ximiko-texnologicheskix ob`ektov / N.V. Kudinov, A.A. Boldy`reva, E.V. Teterevlyova // Sistemny`j analiz, upravlenie i obrabotka informacii: tr. 1-go mezhdunarodnogo seminar studentov, aspirantov i uchyony`x. – Rostov n/D: Izdatel`skij centr DGTU, 2010. – S. 68–74. – In Russian.
15. Kudinov N.V. Modul`ny`j podxod k komp`yuternomu modelirovaniyu uchastka magistral`nogo gazoprovoda / N.V. Kudinov, A.A. Boldy`reva // Vestn. Donsk. gos. texn. un-ta. – 2010. – T. 10. – # 4. – S. 501–507. – In Russian.

PROBLEMS AND SIMULATION METHODS OF DISTRIBUTED OBJECTS

N.V. KUDINOV

(Don State Technical University)

Problems, methods and results of the simulation programs development as well as their algorithmic support and software are considered. The problems are discussed in terms of the technologic distributed objects, such as the main gas pipeline division and the material multilayered structure where thermal processes take place.

Keywords: distributed objects, simulation technique, mathematical simulation, simulation programs.