

УДК 004.57

А.А. Чемерис, М.Ю. Савченко, С.А. Резникова

Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины, Киев

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТЕВЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ НА ГРИД

В статье рассматривается подход для построения высокопроизводительной вычислительной системы для решения задачи моделирования нестационарных режимов магистральных газопроводов. Авторами предлагается использование грид-технологий с применением асинхронных итерационных методов. На примерах показана эффективность асинхронных итерационных методов для решения систем линейных алгебраических уравнений.

Ключевые слова: *грид, моделирование, асинхронные итерационные методы, газотранспортная сеть.*

Введение

В качестве объекта моделирования в статье рассматривается система магистральных трубопроводов. Задачей является моделирование нестационарных режимов этой системы.

В Концепции развития, модернизации и переоснащения газотранспортной системы Украины на 2009-2015 годы отмечены основные проблемы современной газотранспортной системы (ГТС) Украины, среди которых:

- моральный и физический износ технологического оборудования и оборудования;
- отрицательные результаты диагностики и обследования технологического и вспомогательного оборудования;
- снижение показателей надежности и эффективности транспортировки газа;
- и некоторые другие.

Среди прочего, реализация концепции должна обеспечить:

- надежное и эффективное функционирование газотранспортной системы Украины и ее интеграцию в общеевропейскую сеть газопроводов;
- модернизацию и техническое переоснащение объектов газотранспортной системы или отдельного технологического оборудования;
- повышение уровня безопасности эксплуатации газопроводов.

Магистральный газопровод (МГ) является чрезвычайно сложной системой для анализа и управления. Физическая природа газа позволяет в широких пределах осуществлять изменения его основных физических параметров – объема, давления, температуры. В связи с этим эксплуатационные процессы, реально происходящие в трубопроводах магистральных газопроводов, описываются очень сложными математическими зависимостями – системами дифференциальных уравнений в частных производных. Кроме этого, в системах МГ работают десятки компрессорных станций, на каждой из ко-

торых, в свою очередь, установлено значительное количество газоперекачивающих агрегатов. Эти технические объекты описываются большими системами уравнений, которые необходимо решать в общих системах с дифференциальными уравнениями в частных производных. Поэтому математические задачи, связанные с анализом и оптимизацией эксплуатационных режимов магистральных газопроводов, принадлежат к наиболее сложным [1].

Таким образом, построение систем моделирования транспорта газа является актуальной и трудоемкой задачей, для решения которой должны быть использованы новейшие многопроцессорные вычислительные комплексы. Для построения такой системы моделирования авторами предлагается использование грид-технологий. В статье рассматривается математическая постановка задачи и организация асинхронного итерационного процесса в грид для ее решения. Работа выполняется в рамках «Державної цільової науково-технічної програми впровадження і застосування грид-технологій на 2009-2013 роки», договор № 200-12 от 30.03.2012.

Математическая модель трубопровода

Нестационарные режимы в газотранспортной системе (ГТС) возникают под влиянием многих факторов, среди которых различные плановые технологические операции, например, включение/отключение дополнительных мощностей на компрессорных станциях и изменение режимов их работы, изменение конфигурации линейных частей газопроводов и т.д. Аварийные ситуации, например, порыв трубопровода или непредсказуемый отказ газоперекачивающих агрегатов на компрессорных станциях, приводят также к возникновению достаточно длительного переходного процесса в ГТС. Атмосферные процессы, такие как изменение температуры или давления, также играют значительную роль в возникновении переходных процессов [2].

Обобщенная структура математической модели ГТС представлена на рис. 1. Основные составляю-

шие модели, а именно, модель линейной части трубопровода, модель компрессорной станции и модель узла, представляют основу для создания модели динамических режимов ГТС Украины. За основу для реализации с использованием грид-технологий взята математическая модель, подробно описанная в [1].

Современные ГТС объединением мощных магистральных газопроводов со сложной структурой и некоторые части трубопроводов объединены в круг. Магистральный газопровод состоит из компрессорных станций и линейных участков (ЛУ).

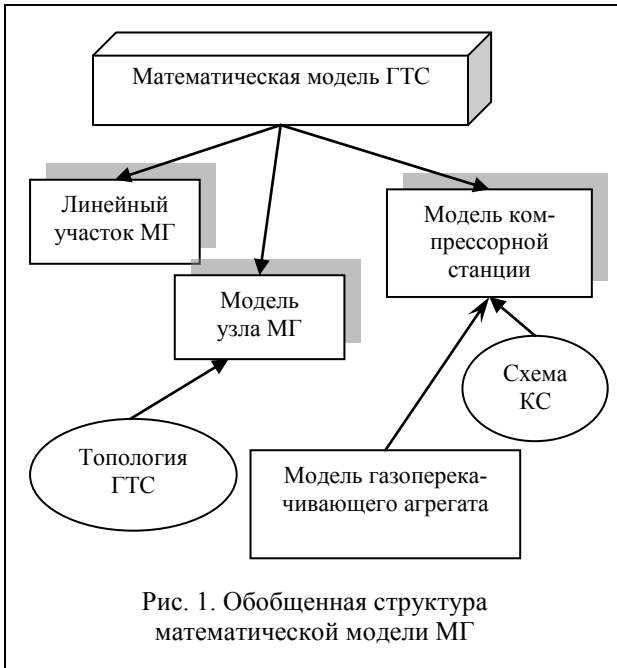


Рис. 1. Обобщенная структура математической модели МГ

Методологической основой моделирования задач газовой динамики в трубопроводах являются уравнения Навье-Стокса [3]. Рассмотрим более подробно модель линейного участка газопровода, течение газа в котором описывается системой из трех уравнений, связывающих давление, температуру и скорость течения газа.:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(P + \rho v^2) = -\rho \left(\frac{\lambda v |v|}{2D} + g \frac{dh}{dx} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x} \rho v \left(E + \frac{P}{\rho} \right) = \frac{4K(T_{гр} - T)}{D} - \rho v g \frac{dh}{dx}, \quad (3)$$

где $P = \rho g z R T$. Параметры, необходимые для включения в алгоритм: диаметр трубопровода, коэффициенты гидравлического сопротивления и теплопередачи от трубы в грунт, температура почвы и другие. Искомыми переменными являются удельные затраты газа, давление и температура газа [4].

В [1] подробно рассмотрен подход к построению модели, которая после линеаризации приводится к системе линейных алгебраических уравнений с

диагональной матрицей коэффициентов (см. рис. 2). Здесь применяются обозначения, соответствующие [2], а именно, s – номер итерации; $\delta W_0^{k,s}, \dots, \delta W_N^{k,s}, \phi_0^{k,s-1}, \dots, \phi_N^{k,s-1}$ – векторы поправок и отклонений (невязок) в соответствующих точках пространства; $\left[\frac{\partial \phi}{\partial W} \right]_0^{k,s-1}, \dots, \left[\frac{\partial \phi}{\partial W} \right]_N^{k,s-1}$ – матрицы Якоби в этих точках; N – число точек; k, n – индексы для дискретизации по времени и длине трубы соответственно.

$\frac{\partial \phi_0}{\partial W_0}$	$\frac{1}{x} B_0$							δW_0	ϕ_0
$-\frac{1}{2x} B_1$	$\frac{\partial \phi_1}{\partial W_1}$	$\frac{1}{2x} B_1$						δW_1	ϕ_1

	$-\frac{1}{2x} B_n$	$\frac{\partial \phi_n}{\partial W_n}$	$\frac{1}{2x} B_n$					δW_n	ϕ_n

		$-\frac{1}{2x} B_{N-1}$	$\frac{\partial \phi_{N-1}}{\partial W_{N-1}}$	$\frac{1}{2x} B_{N-1}$				δW_{N-1}	ϕ_{N-1}
			$-\frac{1}{2x} B_N$	$\frac{\partial \phi_N}{\partial W_N}$				δW_N	ϕ_N

Рис. 2. Структура линеаризованной системы уравнений

С учетом математических моделей КС и узлов трубопроводной сети математическая задача приводится к системе алгебраических уравнений с сильно разреженной матрицей коэффициентов диагональной структуры. Структура такой задачи приведена на рис. 3.

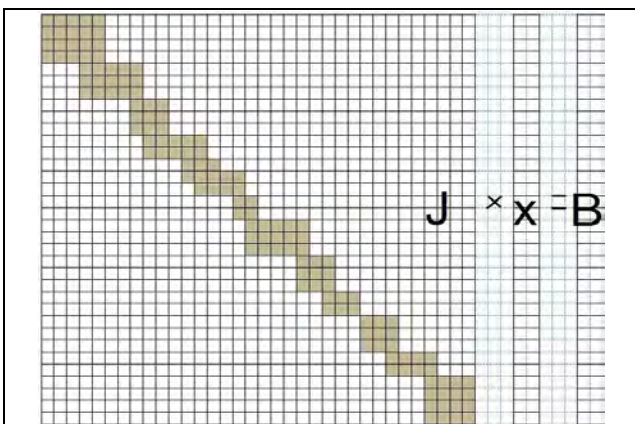


Рис. 3. Структура математической задачи, которая решается при моделировании ГТС

Использование грид-технологий для моделирования ГТС

Использование грид-технологий при моделировании задач транспорта газа позволит увеличить вычислительную мощность и распределить вычисления на разные узлы грид. Примерная схема организации вычислений приведена на рис. 4.

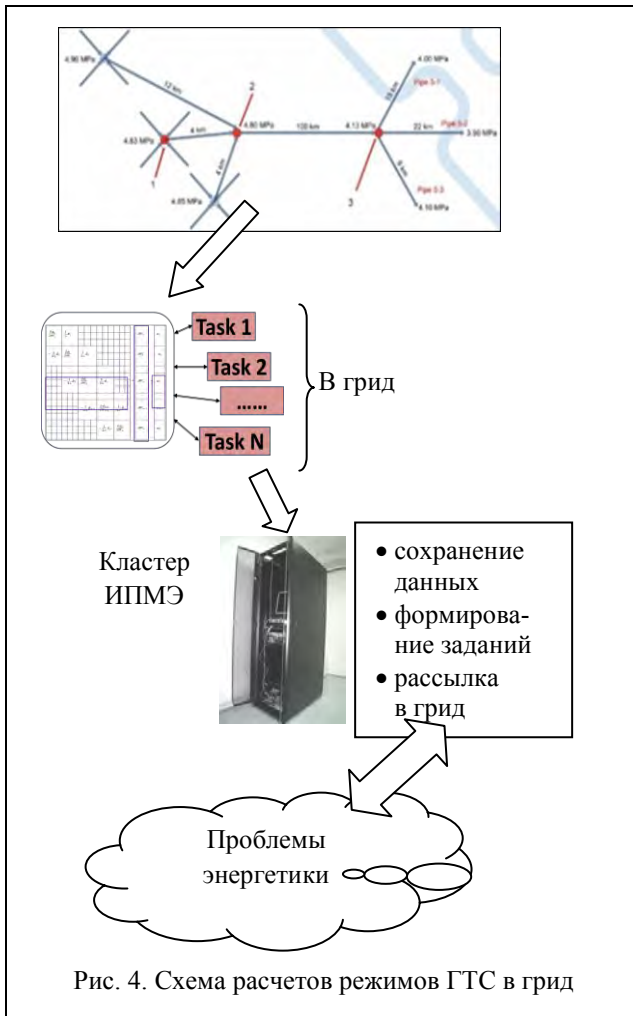


Рис. 4. Схема расчетов режимов ГТС в грид

Процесс моделирования по своей сути соответствует характеру грид благодаря использованию асинхронных итерационных методов для вычисления системы алгебраических уравнений. Общая система может быть представлена в виде блоков, которые распределяются для вычислений в грид-сети в рамках виртуальной организации. Поскольку матрица модели относится к классу очень разреженных, то это значительно уменьшает количество данных, которые надо передавать, т.е. грид является подходящим инструментом для решения таких задач.

Для эффективной работы грид при решении системы линейных алгебраических уравнений требуется применение специальных методов, эффективных при применении параллельных вычислительных комплексов. К таким методам относятся асинхронные итерационные методы. При этом ис-

ходная система разбивается на отдельные задачи, которые могут быть отправлены для решения на отдельные узлы грид. Асинхронность итерационного метода позволяет не ожидать окончания всех задач для того, чтобы продолжить вычисления.

Рассмотрим эффективность асинхронных итерационных вычислений при помощи простых примеров.

Для системы линейных алгебраических уравнений $Ax = B$, где A – квадратная матрица размером $n \times n$, рассматривались метод простой итерации (Якоби), метод Гаусса-Зейделя и метод релаксации (SOR). Вычисления проведены по синхронной и асинхронной схемам и проведено их сравнение между собой. Асинхронная схема организована в соответствии с [7]. Каждый из методов и их асинхронные аналоги вычислялись пять раз для получения более статистически точных данных, причем с небольшим шагом по n и каждое вычисление выполнялось 100 раз. На рис. 5 приведено время решения задачи $T \cdot 100$, необходимое для достижения заданной точности ϵ для исследуемых итерационных методов. Как видим, метод релаксации (SOR) в синхронной реализации в большинстве случаев дает наибольшее ускорение вычислений, хотя его асинхронный аналог оказался не столь эффективным. Последнее можно объяснить сложностью в выборе параметра релаксации ω . Тем не менее, уже эти простые примеры показывают эффективность асинхронных вычислений для рассмотренной выше задачи моделирования ГТС.

Список литературы

1. Кулик М.Н. Методы системного анализа в энергетических исследованиях / М.Н. Кулик. – К.: Наук. Думка, 1987. – 200 с.
2. Котляр И.Я. Эксплуатация магистральных газопроводов / И.Я. Котляр, В. М. Пиляк. – 2-е изд., перераб. и дополн. – Л.: Недра, 1971. – 248 с.
3. Яковлев Е.И. Анализ неустановившихся процессов в нитках магистрального газопровода статистическим методом / Е.И. Яковлев // Известия ВУЗов. Нефть и газ, Баку. – 1968. - №9. – С. 29-36.
4. Селезнев В.Е. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов; под ред. В.Е. Селезнева. – М.: МАКС Пресс, 2007. – 695 с.
5. Турчак Л.И. Основы численных методов: Учебное пособие / Л.И. Турчак, П.В. Плотников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 304 с.
6. Белов С.А., Золотых Н.Ю. Лабораторный практикум по численным методам линейной алгебры / С.А. Белов, Н.Ю.Золотых. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2005. – 235 с.
7. Белецкий В.Н. Многопроцессорные и параллельные структуры с организацией асинхронных вычислений / В.Н. Белецкий. – К : Наукова думка, 1988. – 240 с.

Поступила в редколлегию 30.06.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.М. Порошин, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

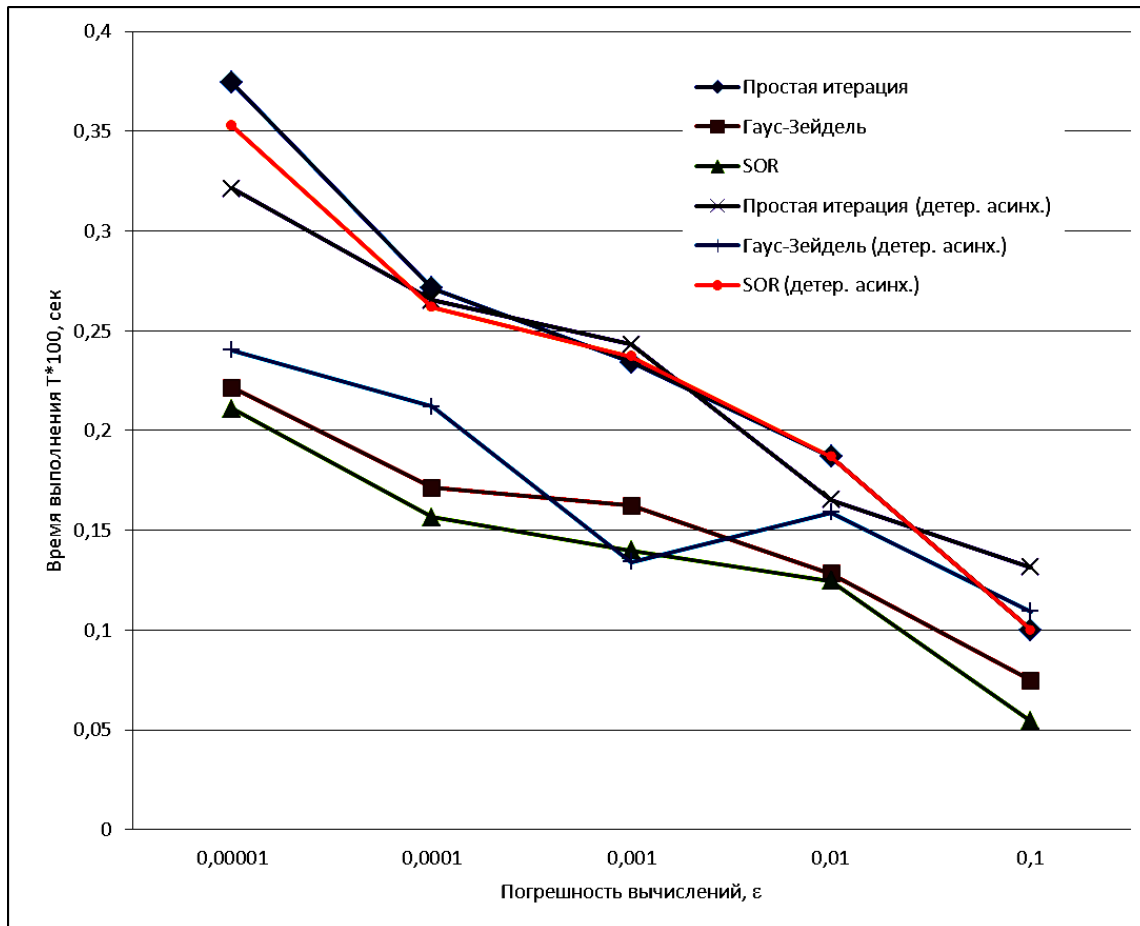


Рис. 5. Зависимость времени выполнения вычислений в зависимости от заданной точности ϵ для различных итерационных методов

МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖЕВИХ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ НА ГРІД

О.А. Чемерис, М.Ю.Савченко, С.О.Резнікова

У статті розглядається підхід для побудови високопродуктивної обчислювальної системи для вирішення задачі моделювання нестационарних режимів магістральних газопроводів. Авторами пропонується використання ґрид-технологій з застосуванням асинхронних ітераційних методів. На прикладах показана ефективність асинхронних ітераційних методів для розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

Ключові слова: ґрид, моделювання, асинхронні ітераційні методи, газотранспортна мережа.

SIMULATION OF PIPELINE NETWORK SYSTEM USING GRID

A.A. Chemeris, M.Yu. Savchenko, S.A. Reznikova

The paper considers an approach to build high-performance computing systems to solve the problem of simulating unsteady regimes of gas pipelines. The authors propose the use of grid technology with the use of asynchronous iterative methods. The example shows the effectiveness of asynchronous iterative methods for solving systems of linear algebraic equations.

Keywords: grid, modeling, asynchronous iterative methods, gas transportation network.