Посвящается году Науки и Технологий

МАТЕРИАЛЫ XXII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ И СОВРЕМЕННЫМ ПРИКЛАДНЫМ ПРОГРАММНЫМ СИСТЕМАМ

ВМСППС'2021

4–13 сентября 2021 г.
Алушта, Крым

УДК 519.6:517.958:533.6
ББК 22.2:2218
М34

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)

М34 **Материалы XXII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021), 4–13 сентября 2021 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2021. — 696 с.: ил.**

ISBN 978-5-4316-0824-7

Сборник включает в себя научные работы, отражающие современные мировые достижения в вычислительной механике, механике деформируемого твердого тела, механике жидкости, газа и плазмы, аэрокосмической механике, прикладной математике, разработке прикладных программных средств.

Для специалистов в области прикладной математики и механики, математического моделирования, информационных технологий, разработчиков современных прикладных программных систем, аспирантов и студентов старших курсов технических вузов.

Материалы XXII Международной конференции по вычислительной механике
и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021),
4–13 сентября 2021 г., Алушта

Дизайн и компьютерная верстка *Ал. А. Пярнпуу*

Подписано в печать 11.08.2021. Формат 70×100 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 56,55
Тираж 400 экз. Изд. №959. Заказ №251

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «Компания АРТИШОК»,
125362, Москва, Волоколамское шоссе, д. 116, стр. 2, e-mail: info@artishok.ru

ISBN 978-5-4316-0824-7

2. *Велданов В. А., Ручко А. М., Сотский М. Ю.* Ретроспектива становления и развития акселерометрии конечной баллистики в МГТУ им. Н. Э. Баумана // Сб. матер. Междунар. конф. «Проблемы баллистики — 2006», Санкт-Петербург, 19–23 июня 2006 г. Т. II. — СПб: БГТУ, 2007. — С. 74–77.
3. *Ручко А. М., Сотский М. Ю., Ячник О. Е.* Высокочастотный измерительный преобразователь для регистрации ускорений до 10^7 м/с^2 // Тез. докл. Всесоюзн. научн.-техн. семинара машиностроительного фак-та. — М.: Изд-во МВТУ, 1980.
4. Пьезометрия в применении к процессам терминальной баллистики: 45 лет развития технологии в МГТУ им. Н. Э. Баумана / М. Ю. Сотский, В. А. Велданов, А. М. Ручко, В. И. Пусев, В. В. Селиванов // Сб. матер. V Всеросс. научн.-техн. конф. «Фундаментальные основы баллистического проектирования», Санкт-Петербург, 27 июня — 1 июля 2016 г. — СПб: БГТУ, 2016. — С. 197–198.

РАЗРАБОТКА ГИБРИДНОЙ СХЕМЫ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА*

А. В. Старченко, Е. А. Данилкин, С. А. Проханов, Д. В. Лещинский

ТГУ, Томск, Россия

Введение. В настоящее время при исследовании окружающей среды наряду с экспериментальными методами большое внимание уделяется применению методов математического моделирования. Именно математическое моделирование позволяет изучать и прогнозировать развитие атмосферных процессов без активного воздействия на них. Современные математические модели представляют собой систему из нескольких конвективно-диффузионных уравнений, дополненную замыкающими алгебраическими соотношениями, а также начальными и граничными условиями.

Для решения рассматриваемых систем дифференциальных уравнений применяются методы конечных разностей, конечного объема или конечных элементов. Приближенное решение ищется на весьма подробной сетке, состоящей из нескольких миллионов вычислительных узлов или ячеек. Причем часто при оперативном моделировании атмосферных процессов необходимо в кратчайшие сроки вычислений на компьютере представить результаты прогностического моделирования. Возможность ускорить процесс получения численного решения дает применение многопроцессорной и многоядерной вычислительной техники.

Целью данной работы является разработка эффективного параллельного метода численного решения уравнения переноса для прогностической метеорологической мезомасштабной модели TSUNM3 [1] с использованием гибридной схемы распараллеливания MPI+OpenMP.

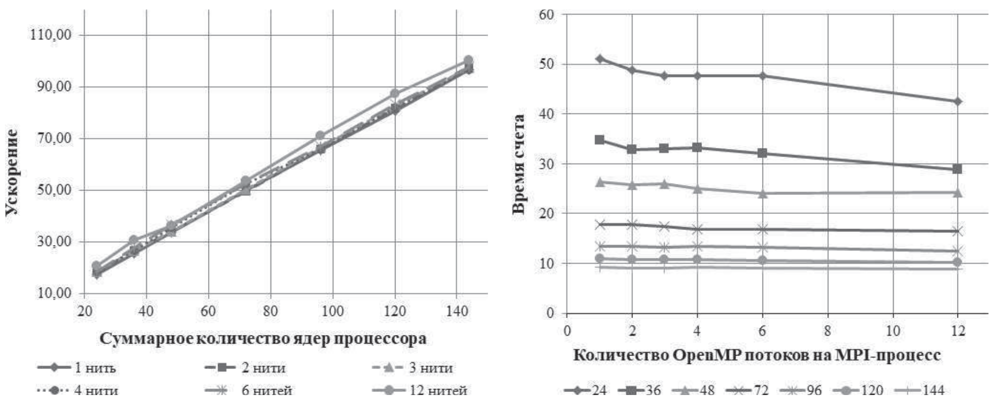
Постановка задачи. Рассматривается процесс распространения газообразной инертной примеси от точечного источника в идеализированной области, представляющей собой прямоугольный параллелепипед. Источник примеси находится в центре области исследования на некоторой высоте над землей. Предполагается, что примесь не поглощается почвой и может свободно покидать область исследования. Математическая постановка задачи сводится к решению обобщенного трехмерного дифференциального уравнения конвективно-диффузионного переноса с граничными условиями Неймана (производная по нормали к поверхности равна нулю).

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-71-20042).

Для дискретизации используется декартовая равномерная по горизонтальным направлениям и сгущающаяся к поверхности Земли сетка. Аппроксимация дифференциальной задачи выполнена методом конечного объема со вторым порядком аппроксимации по времени и пространству. Для обеспечения второго порядка точности по времени используется комбинация неявной схемы Кранка–Николсон для вертикальной диффузии и явной схемы Адамса–Бэшфорда для остальных слагаемых уравнения. Выбранный способ аппроксимации по времени позволяет использовать при численном решении экономичный метод прогонки по вертикальной координате. Величина шага интегрирования по времени выбиралась из условия устойчивости разностной схемы. Используемый для численного решения метод идентичен алгоритму численного решения уравнений переноса в модели TSUNM3 [1].

Программная реализация численного алгоритма. Расчеты проводились на кластере ТГУ Cyberia. Один узел кластера объединяет два 6-ядерных процессора Intel® Xeon® X5670. Таким образом, на один вычислительный узел приходится 12 процессорных ядер на общей памяти.

Программная реализация алгоритма численного решения уравнения переноса выполнена на языке программирования Fortran. Оценка времени работы программной реализации выполнена для случая моделирования переноса примеси от постоянно действующего точечного источника в области с горизонтальными размерами (L) 50 на 50 км и высотой (H) 0,6 км. Источник примеси смещен относительно центра области исследования на $0{,}007L$ и $0{,}007L$ по осям Ox и Oy соответственно и расположен на высоте $0{,}0101H$. Компоненты скорости принимались постоянными: $U = 1$ м/с, $V = 1$ м/с, $W = 0$ м/с. Коэффициенты диффузии также принимались постоянными 100 м^2/с. Шаг по времени τ выбирался равным 6 с, а время окончания моделирования 5000τ. Расчеты проводились на сетке $240 \times 240 \times 32$.



а *б*

Рис. 1. Ускорение параллельной программы при разном количестве потоков/нитей в рамках одного MPI-процесса (*а*); время выполнения программы при порождении разного количества потоков в рамках одного MPI-процесса (*б*)

При расчетах на каждом вычислительном узле всегда были задействованы все 12 ядер процессора, но менялось соотношение числа процессов/потоков следующим образом: 12/1, 6/2, 4/3, 3/4, 2/6, 1/12. Первая цифра указывает на количество процессов, которое приходится на вычислительный узел, вторая — на количество потоков, порождаемых в рамках процесса. Например, 12/1 — это 12 процессов по одному потоку на процесс (чистый MPI), а 1/12 — это 1 процесс с 12 потоками.

На рис. 1 представлено время выполнения программы при порождении разного количества потоков в рамках одного MPI-процесса. Минимальное время счета получено при использовании одного MPI-процесса на вычислительный узел. Значительнее это проявляется при использовании 24 или 36 процессорных ядер. В этом случае ускорение по сравнению с чистым MPI (по одному потоку на каждый процесс) составляет 16%. При использовании от 48 до 120 процессорных ядер время счета по сравнению с чистым MPI уменьшилось в среднем на 7,5%. При использовании 144 ядер только на 3,8%.

Таким образом, на рассматриваемой задаче получено, что наибольший эффект от гибридного распараллеливания проявляется при небольшом количестве задействованных ядер центрального процессора. Разработанный гибридный алгоритм будет применен для распараллеливания метеорологической мезомасштабной модели TSUNM3.

1. *Старченко А. В.*, *Барт А. А.*, *Кижнер Л. И.*, *Данилкин Е. А.* Мезомасштабная метеорологическая модель TSUNM3 для исследования и прогнозирования состояния метеопараметров приземного слоя атмосферы над крупным населенным пунктом // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. — 2020. — №66. — С. 35–55.

ПЛП-ПОИСК КАК МЕТОД ЭВРИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

И. Н. Статников, Г. И. Фирсов

ИМАШ РАН, Москва, Россия

Общим для проектирования машин и механизмов является то, что они часто поддаются математической формализации как задачи нелинейной (в общем случае) оптимизации: для заданной математической модели требуется подобрать такие значения варьируемых параметров, чтобы они обеспечивали получение экстремальных величин одного или нескольких критериев качества. Значит, приходится иметь дело с задачами многопараметрической и многокритериальной оптимизации. Среди численных методов поиска оптимальных решений нет и не может быть универсального, пригодного для решения любой задачи метода нелинейной оптимизации. Естественным для разработчиков методов является эвристический подход к разработке таких методов «... решения той или иной задачи, которое, сводя к минимуму или в какой-то мере ограничивая перебор возможного множества решений этой задачи, сокращает время на решение» [1]. В такой подход хорошо вписывается метод Монте-Карло, при этом обилие информации требует умения ее преобразовывать в характеристики, зависящих и определяющих одновременно свойства проектируемого объекта, а не только отыскивать экстремумы заданных критериев качества.

С этой целью в ИМАШ РАН был разработан метод ПЛП-поиска (планируемого ЛП-поиска) [2, 3]. В основание метода положена рандомизация расположения векторов $\overline{\alpha}$ в области $G(\overline{\alpha})$, задаваемой неравенствами типа $\alpha_{j*} \leq \alpha_j \leq \alpha_{j**}$ ($j = \overline{1, J}$, а само J — число варьируемых параметров; $J = \overline{1, N}$) и рассчитываемых с помощью ЛП$_\tau$-последовательностей [4]. На сегодняшний день в ПЛП-поиске используются величины $J \leq 51$ и $N < 2^{20}$, где N — одинаковое количество неповторяющихся псевдослучайных чисел в каждой из 51 последовательностей. Процесс рандомизации расположения векторов $\overline{\alpha}$ в области $G(\overline{\alpha})$ состоит в случайном смешении