

Комплекс программ и алгоритмов для расчета транспорта наносов и многокомпонентных взвесей на многопроцессорной вычислительной системе

А.И. Сухинов¹, А.В. Никитина², А.А. Семенякина²,

Е.А. Проценко³

¹Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону

²Научно-исследовательского институт многопроцессорных вычислительных систем имени академика А.В. Каляева, Таганрог

³Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (РИНХ)

Аннотация: Работа посвящена обзору исследований по разработке взаимосвязных программных комплексов, предназначенных для математического моделирования перемещения донных материалов и примесей, в том числе биологических веществ, в прибрежных системах, реализуемых на высокопроизводительных вычислительных системах.

Ключевые слова: многопроцессорная вычислительная система, сеточные уравнения, взвеси, наносы.

Введение

Проблема решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) является одной из важных задач вычислительной математики. Приближенное решение СЛАУ дают прямые и итерационные методы. Попеременно-треугольный метод (ПТМ), предложенный А.А.Самарским стал одним из наиболее эффективных двухслойных итерационных методов. Исследования академика А.Н. Коновалова посвящены применению ПТМ. В 2002 году им был предложен адаптивный вариант ПТМ в самосопряженном случае. Алгоритм ПТМ показал себя как наиболее эффективный метод, в классе двухслойных итерационных методов, для решения вычислительно трудоемких задач. В работе [1] данный метод, в случае несамосопряженного оператора (с несимметричной матрицей), был применен для решения задач гидродинамики. Позднее был предложен вариант метода конечных объемов в случае учета заполненностей контрольных областей [2]. Алгоритм расчета, учитывающий заполненность исследуемых областей, позволяет более эффективно использовать представление о границах области на

прямоугольной сетке. Данный метод был применен для решения трехмерных задач гидродинамики [3]. Применение схем, учитывающих «заполненности» контрольных областей, потребовало создания модифицированного варианта ПТМ [4]. Данный метод имеет те же оценки скорости сходимости, как и его не модифицированный вариант, в случае равномерной прямоугольной сетки. Метод эффективен для решения задач на сетках, учитывающих сложную геометрию рассматриваемых объектов [5].

Двумерная модель перемещения донных материалов в прибрежных акваториях, предложенная авторским коллективом, включает уравнения движения, неразрывности и перемещения донных материалов, учитывает 2 пространственные координаты. В разработанном комплексе программ касательное напряжение рассчитывается на основе двумерной модели гидродинамики.

Позже разработана и программно-реализована математическая модель транспорта наносов, учитывающая переход донных материалов во взвешенное состояние и обратно [7, 8]. Описание гидродинамических процессов в данном программном комплексе происходило на основе модели, учитывающей три уравнения движения (без гидростатического приближения). Анализ численного решения модельной задачи показал, что временные затраты с увеличением размеров расчетной сетки для явной разностной схемы уменьшаются существенным образом. Такая модификация явной разностной схемы, как введение в разностную схему слагаемого-регуляризатора, описываемого производной второго порядка, позволяет существенно уменьшить ограничения на величину шага по времени [9]. Явные регуляризованные схемы имеют преимущество по реальному расчетному времени на решение задачи (10-15 раз и более) по сравнению с зачастую используемыми нерегуляризованными явными и неявными схемами [10]. В области программной реализации и разработки

математических моделей и алгоритмов, описывающих динамику популяций, разработаны и численно реализованы модели, предназначенные для расчета условий формирования заморозов в мелководных водоемах [11] и изучение возможностей улучшения качества вод [12].

Разработана и программно реализована математическая модель движения многокомпонентной воздушной среды, учитывающая перенос тепла и вредоносной примеси; изменение коэффициента турбулентного обмена; переход воды из жидкого в газообразное состояние; силу Архимеда; влияние растительного покрова; осаждение вещества; переменную плотность, зависящую от концентрации загрязняющих веществ, температуры и давления; касательное тангенциальное напряжение на границах раздела различных сред; изменение температуры за счет испарения аэрозоли и конденсации; турбулентное перемешивание многокомпонентной воздушной среды; наличие распределенных источников вещества и температуры; теплообмен между газообразными и жидкими состояниями; сжимаемость среды из-за испарения и конденсации жидкости, давления, изменения температуры наличия источников [13].

Цели и задачи моделирования

Цель работы заключается в создании единого программного комплекса для решения двумерных непрерывных и дискретных задач транспорта донных материалов в прибрежных водных акваториях, описывающих изменение геометрии прибрежной зоны водоемов за счет движения водной среды и транспорта твердых частиц. Поставленная цель предполагает решение следующих задач.

1. Разработка и программная реализация пространственно-двумерной модели перемещения донных материалов в мелководных акваториях, позволяющей предсказывать изменения донной поверхности, вызванные движением воды и твердых частиц. Модель учитывает определяющие

физические факторы и процессы: пористость грунта, критическое значение касательного напряжения, при котором происходит транспорт наносов, процесс турбулентности, изменения геометрии дна водоема, ветровые течения и трение о дно.

2. Разработка и программная реализация трехмерной математической модели динамики популяций, предназначенной для моделирования условий формирования заморов в мелководных водоемах и изучения возможностей улучшения качества вод.

3. Разработка и программная реализация модели волновых гидродинамических процессов, учитывающей такие физические параметры, как турбулентный обмен, сложная геометрия дна и береговой линии, трение о дно, наличие примеси и предназначенной для расчета интенсивности перемешивания субстанций в водоеме в зависимости от параметров поверхностных волн.

4. Разработка и программная реализация трехмерной модели гидродинамики, учитывающей определяющие физические факторы, такие как сила Кориолиса, турбулентный обмен, зависящий, в том числе, от параметров поверхностных волн, сложная геометрия дна и береговой линии, испарение, стоки рек, динамическое перестроение расчетной области, ветровые напряжения и трение о дно.

5. Построение разностных схем для разрабатываемых моделей, проведение аналитических исследований для схем повышенного порядка точности, расчет оптимальных весовых и регуляризирующих параметров.

6. Разработка комплекса программ на многопроцессорной вычислительной системе, предназначенного для моделирования перемещения примесей и донных материалов в прибрежной акватории, с учетом турбулентного перемешивания водной среды, для прогнозирования динамики экосистемы и берегового рельефа.

Предлагаемые методы и подходы

При разработке гидродинамической модели движения водной среды будет использована трехмерная модель, включающая: три уравнения движения Навье-Стокса и уравнение неразрывности. При исследовании аппроксимации гидродинамической модели будет использован метод поправки к давлению и применены схемы с весами, устойчивость которых будет исследована на основе сеточного принципа максимума.

Аппроксимация модели расчета перемещения взвеси будут применены аддитивные двумерно-одномерные разностные схемы расщепления по пространственным координатным направлениям, схемы повышенного (четвертого) порядка точности. Сеточные уравнения будут решены адаптивным модифицированным ПТМ вариационного типа. Использование быстросходящихся итерационных методов является эффективным способом уменьшения времени работы алгоритма, хотя и не единственным. Для увеличения временного шага будут использованы схемы с оптимальным значением весового параметра. Как показали исследования, точность при решении модельной задачи диффузии повышается приблизительно в 66 раз, при решении модельной задачи диффузии-конвекции – в 48 раз [14]. С целью увеличения эффективности алгоритмов решения задач диффузии-конвекции на основе двухслойных разностных схем, выполнены оценки точности схемы в зависимости от шага по временной переменной и веса схемы. Выявлены оптимальные значения весового параметра [15].

При разработке программного обеспечения будут использованы схемы с оптимальными весами. Для увеличения точности расчетов будут использованы схемы, учитывающие заполненности ячеек [16]. Улучшение аппроксимации границы расчетной области дает существенное повышение точности модели. Будут представлены параллельные реализации математической трехмерной модели процессов гидродинамики, перемещения



донных материалов и взвесей на основе метода декомпозиции по одному и двум пространственным координатным направлениям.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проектам №15-07-08626, № 15-01-08619.

Литература

1. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Алексеенко Е.В. Численная реализация трехмерной модели гидродинамики для мелководных водоемов на супервычислительной системе // Математическое моделирование. – 2011. – Т.23, №3, – С. 3–21.

2. Сухинов А.И., Тимофеева Е.Ф. Чистяков А.Е. Построение и исследование дискретной математической модели расчета прибрежных волновых процессов// Известия ЮФУ. –2011. №8 (121). – С 22-32.

3. Сухинов А.И., Чистяков А.Е. Параллельная реализация трехмерной модели гидродинамики мелководных водоемов на супервычислительной системе// Вычислительные методы и программирование: Новые вычислительные технологии. – 2012. – Т.13. – С. 290–297.

4. Сухинов А.И., Чистяков А.Е. Адаптивный модифицированный попеременно-треугольный итерационный метод для решения сеточных уравнений с несамосопряженным оператором// Математическое моделирование. 2012. Т. 24. № 1. С. 3-20.

5. Никитина А.В., Чистяков А.Е., Фоменко Н.А. Применение адаптивного модифицированного попеременно-треугольного итерационного метода для численной реализации двумерной математической модели движения водной среды// Инженерный вестник Дона. – 2012, – Т.20, №2, – С. 335–339.

6. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Проценко Е.А. Математическое моделирование транспорта наносов в прибрежной зоне мелководных водоемов// Математическое моделирование. 2013. Т. 25. № 12. С. 65-82.



7. Сухинов А. И., Чистяков А. Е., Проценко Е. А., Математическое моделирование транспорта наносов в прибрежных водных системах на многопроцессорной вычислительной системе// Вычислительные методы и программирование, 2014, Т 15, №4 , 610–620.

8. Дегтярева Е.Е., Проценко Е.А., Чистяков А.Е. Программная реализация трехмерной математической модели транспорта взвеси в мелководных акваториях// Инженерный вестник Дона. 2012. Т. 23. № 4-2. С. 30.

9. Четверушкин Б.Н. Пределы детализации и формулировка моделей уравнений сплошных сред// Математическое моделирование. -2012. -Т. 24, № 11. -С. 33-52.

10. Сухинов А.И., Проценко Е.А., Чистяков А.Е., Шретер С.А. Сравнение вычислительных эффективностей явной и неявной схем для задачи транспорта наносов в прибрежных водных системах// Вычислительные методы и программирование, 2015, Т 16, №3 , 328-338.

11. Сухинов А.И., Никитина А.В., Чистяков А.Е., Семенов И.С. Математическое моделирование условий формирования заморов в мелководных водоемах на многопроцессорной вычислительной системе// Вычислительные методы и программирование. – 2013. – Т.14. – С. 113–122.

12. Сухинов А.И., Никитина А.В., Чистяков А.Е. Моделирование сценария биологической реабилитации Азовского моря// Математическое моделирование. – 2012. – Т.24, №9, – С. 3–21.

13. Сухинов А. И., Хачунц Д. С., Чистяков А. Е. Математическая модель распространения примеси в приземном слое атмосферы прибрежной зоны и ее программная реализация// Журнал вычислительной математики и математической физики, 2015. Т. 55, №7.С.1238–1254.

14. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Семенякина А.А., Никитина А.В. Параллельная реализация задач транспорта веществ и восстановления донной

поверхности на основе схем повышенного порядка точности//
Вычислительные методы и программирование, 2015, Т 16, №2, 256-267.

15. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Шишеня А.В. Оценка погрешности решения уравнения диффузии проведена на основе схем с весами// Математическое моделирование. 2013. Т. 25. № 11. С. 53-64.

16. Сухинов А.И., Чистяков А.Е., Фоменко Н.А. будет использована методика построения разностных схем для задачи диффузии-конвекции-реакции, учитывающих степень заполненности контрольных ячеек// Известия ЮФУ. Технические науки. –2013. №4. – С 87-96.

References

1. Suhinov A.I., Chistjakov A.E., Alekseenko E.V. Matematicheskoe modelirovanie, 2011. V.23, №3, pp. 3-21.
2. Suhinov A.I., Timofeeva E.F. Chistjakov A.E. Izvestija JuFU, 2011. №8 (121). pp. 22-32.
3. Suhinov A.I., Chistjakov A.E. Vychislitel'nye metody i programmirovaniye: Novye vychislitel'nye tehnologii. 2012. V.13. pp. 290-297.
4. Suhinov A.I., Chistjakov A.E. Matematicheskoe modelirovanie, 2012. V. 24. № 1, pp. 3-20.
5. Nikitina A.V., Chistjakov A.E., Fomenko N.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, V.20, №2, pp. 335-339.
6. Suhinov A.I., Chistjakov A.E., Procenko E.A. Matematicheskoe modelirovanie. 2013. V.25. № 12, pp. 65-82.
7. Suhinov A. I., Chistjakov A. E., Procenko E. A., Vychislitel'nye metody i programmirovaniye, 2014, V. 15, №4, pp. 610-620.
8. Degtjareva E.E., Procenko E.A., Chistjakov A.E. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012. V. 23. № 4-2, pp. 30.
9. Chetverushkin B.N. Matematicheskoe modelirovanie. 2012. V. 24, № 11, pp. 33-52.



10. Suhinov A.I., Procenko E.A., Chistjakov A.E., Shreter S.A. Vychislitel'nye metody i programmirovaniye, 2015, V. 16, №3, pp. 328-338.
11. Suhinov A.I., Nikitina A.V., Chistjakov A.E., Semenov I.S. Vychislitel'nye metody i programmirovaniye, 2013. V. 14. pp. 113-122.
12. Suhinov A.I., Nikitina A.V., Chistjakov A.E. Matematicheskoe modelirovaniye, 2012. V. 24, №9, pp. 3-21.
13. Suhinov A. I., Hachunc D. S., Chistjakov A. E. Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki, 2015, pp. 1238-1254.
14. Suhinov A.I., Chistjakov A.E., Semenjagina A.A., Nikitina A.V. Vychislitel'nye metody i programmirovaniye, 2015, V. 16, №2, pp. 256-267.
15. Suhinov A.I., Chistjakov A.E., Shishenja A.V. Matematicheskoe modelirovaniye. 2013. V. 25. № 11, pp. 53-64.
16. Suhinov A.I., Chistjakov A.E., Fomenko N.A. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2013. №4. pp. 87-96.