

Раздел III. Информационные технологии в управлении

УДК 518.5

А.И. Сухинов, Е.В. Алексеенко

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА В ЗАДАЧАХ МОРСКОЙ ГИДРОДИНАМИКИ НА ПРИМЕРЕ АЗОВСКОГО МОРЯ И ЛАГУНЫ ЭТАН ДЕ БЕР

Мелководные прибрежные районы морей задействованы в экономике страны. В прибрежных областях, как правило, располагаются крупные промышленные центры. Интенсивное развитие производительных сил, хозяйственное освоение природных ресурсов морей ставит перед исследователями этих географических районов ряд важных задач. Большое значение приобретает прогноз ожидаемых изменений в гидрологическом режиме, происходящих в результате естественных процессов и хозяйственной деятельности человека.

Качество воды в прибрежных районах зависит от динамики переноса загрязняющих веществ под воздействием приливных волн и ветра. Перенос субстанции любого происхождения и ее концентрация определяются не только диффузионными процессами, но и динамикой течений, расчет которых представляет сложную задачу, так как нужно иметь данные о векторном поле осредненных скоростей течений в исследуемом объекте и об изменении этого поля во времени.

Турбулентность играет существенную роль практически во всех процессах. Интенсивность турбулентности определяет процесс обмена, от которого зависят способность потока к самоочищению, трансформации и деградации загрязняющих веществ, его транспортирующая способность. Изучение турбулентности приливного течения также представляет практический интерес.

Прибрежные районы морей и устьевые области рек характеризуются мелководностью. Исследование приливов в таких районах осложняется тем, что волна существенно подвержена влиянию дна. При этом она отражается от берегов, где может отмечаться интерференция набегающих и отраженных волн.

На глубокой воде трение оказывает меньшее влияние на приливы по сравнению с отклоняющей силой вращения Земли. На мелководье же главное значение имеет трение о дно и берега. Трение изменяет амплитуду прилива, фазовую скорость, вызывает деформацию приливной волны. На мелководье происходит выход нижнего пограничного слоя в приповерхностную область и смыкание его с верхним пограничным слоем. Турбулентное перемешивание охватывает всю толщу вод, а зона смыкания двух пограничных слоев представляет собой фронтальную зону, отделяющую стратифицированные воды глубоководной части моря от однородных вод мелководья.

Процессы турбулентного перемешивания включаются в современные численные модели циркуляции морей в виде параметризации процессов, не разрешаемых на используемых пространственных сетках.

В современных численных моделях коэффициент вертикального турбулентного обмена часто фигурирует как подгоночный параметр, выбором которого

можно добиться достаточно хорошего согласия полученных решений и данных наблюдений. Но его значение часто выбирается из соображений вычислительной устойчивости счета на длительные сроки, и может на порядки превосходить физически разумные его оценки для реального моря.



Рис. 1. Схема рейса в сентябре 2005 г. в Азовском море



Рис. 2. Схема рейса в сентябре 2006 г. в лагуне Этан де Бер

Прямые методы основаны на определении турбулентных потоков как осредненных по пространству или времени (корреляции) произведений отклонений составляющих скорости течений и переносимой физической величины. Для прямых методов оценок характеристик вертикальной турбулентности существует проблема, заключающаяся в необходимости обработки больших объемов данных в длительных и дорогостоящих экспедиционных измерениях.

Рассмотрим 3 подхода к расчету коэффициента вертикального турбулентного обмена.

1. Параметризация Белоцерковского:

$$\nu = (C\Delta z)^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right].$$

2. Параметризация Буссинеска:

$$\nu = l_{\min}^2 0,5 \sqrt{\frac{du^2}{dz} + \frac{dv^2}{dz}}, \quad l_{\min} = 0,41z.$$

3. Параметризация Смагоринского:

$$\nu = 1000(C\Delta)^2 \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial x} \right)}, \quad \Delta = (dxdydz)^{1/3} \quad C = 0,1 - 0,2.$$

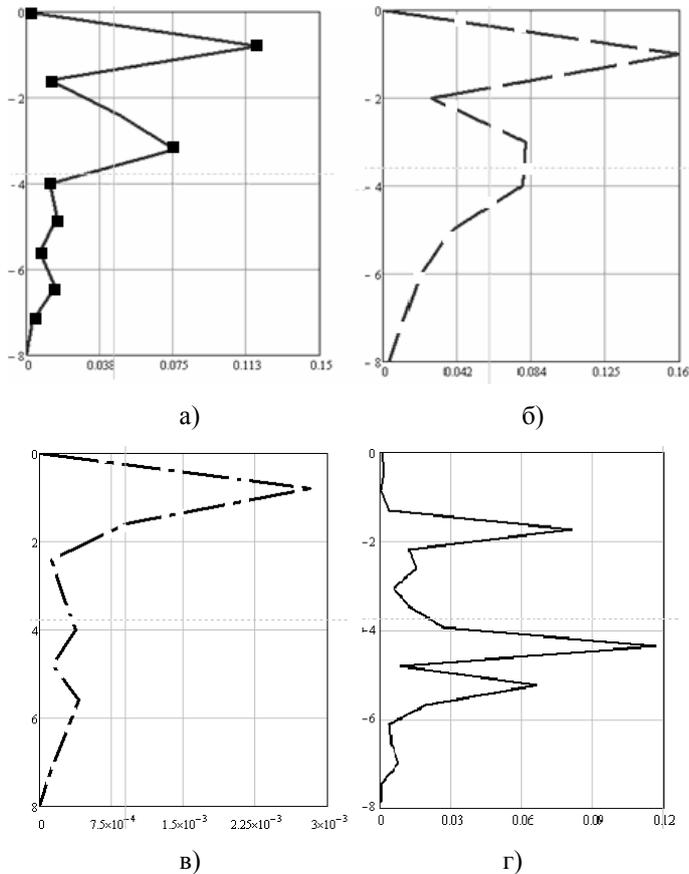


Рис. 3.
Распределение
коэффициента
вертикального
турбулентного
обмена по глубине в
точке 16
Азовского моря
а) – параметриза-
ция Смагоринского;
б) – параметриза-
ция Белоцер-
ковского;
в) – параметриза-
ция Буссинеска; г) –
экспедиционные
измерения

Был проведен численный эксперимент на основе каждого из трех подходов, в результате которого были получены распределения коэффициентов вертикального турбулентного обмена для Азовского моря и лагуны Этан де Бер.

В сентябре 2005 и 2006 гг. проводились экспедиции в Таганрогском заливе и Северо-Восточной части Азовского моря, а также в лагуне Этан де Бер (Франция) с целью получения данных для накопления информации о состоянии и изменении гидрофизических и гидрохимических параметров.

В ходе экспедиций 2005 и 2006 гг. были получены данные о пульсациях скоростей в некоторых точках (см. схемы рейсов на рис. 1 и 2). Для расчета коэффициентов вертикального турбулентного обмена необходимы компоненты скорости движения жидкости, а также значения глубин точек, в которых проводились

измерения. Для всех точек были рассчитаны распределения коэффициентов вертикального турбулентного обмена.

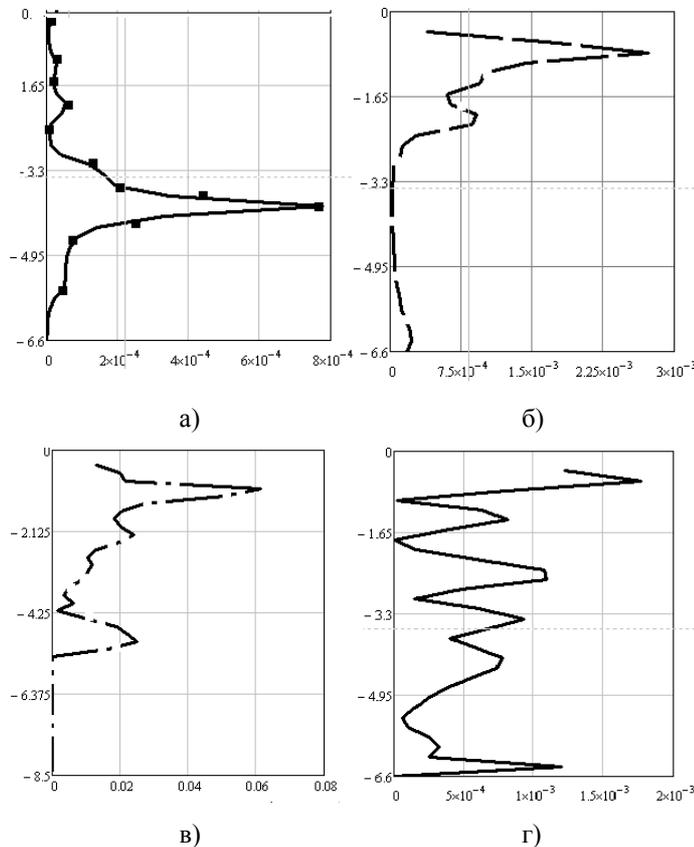


Рис. 4.
Распределение коэффициента вертикального турбулентного обмена по глубине в точке 4 лагуны Этан де Бер;
а) – параметризация Смагоринского;
б) – параметризация Белоцерковского;
в) – параметризация Буссинеска;
г) – экспедиционные измерения

Рассмотрим результаты численного эксперимента для каждого из трех подходов в сравнении с экспериментально измеренными значениями коэффициента вертикального турбулентного обмена для некоторых точек Азовского моря и лагуны Этан де Бер (рис. 3 и 4).

Таким образом, параметризация коэффициента вертикального турбулентного обмена в мелководных водоемах играет существенную роль в динамике моря. И сложность состоит в подборе модели, которая бы позволяла получить коэффициент, наиболее совпадающий с данными натурных измерений.

При анализе полученных распределений коэффициента вертикального турбулентного обмена для мелководных водоемов, таких как Азовское море и лагуна Этан де Бер, мы увидели, что в большинстве случаев по порядку величины, а также по местоположению пиков на графиках наилучший результат был получен с использованием параметризации Белоцерковского, немного хуже в сравнении с экспериментом оказался результат параметризации Смагоринского, и, наконец, самым ненадежным оказался метод Буссинеска, давший результат меньший на несколько порядков, что значительно влияет на гидродинамические процессы в водоемах.

Таким образом, аппроксимация Белоцерковского в наибольшей степени определяет процессы турбулентного перемешивания в мелководных водоемах и дает результат, сходный с экспериментальными данными, полученными в ходе экспедиций 2005 и 2006 гг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Монин А.С. Турбулентность и микроструктура в океане // Успехи физических наук. Т. 109.
2. Белоцерковский О. М. Турбулентность: новые подходы. – М.: Наука, 2003.
3. David C. Wilcox. Turbulence Modeling for Cfd, 2002.

УДК 519.6

А.И. Сухинов, Д.А. Зорина

**РЕАЛИЗАЦИЯ БИБЛИОТЕКИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ
БЫСТРЫХ ПРЯМЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ СЕТОЧНЫХ ЗАДАЧ
ДЛЯ МВС С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПАМЯТЬЮ**

Число научных работ, посвященных параллельным методам решения вычислительно трудоемких научно-технических задач, составляет многие тысячи. Существенная часть этих работ посвящена построению и исследованию параллельных алгоритмов для решения задач вычислительной алгебры и математической физики. Это обусловлено тем, что к системам алгебраических уравнений, а также к сеточным задачам математической физики, как правило, сводятся все большие научно-технические задачи, особенно в прикладной математике, компьютерной механике, физике, гидродинамике, экологии и т.д.

При разработке параллельных программ для МВС требуется, чтобы структура алгоритма и программы соответствовали особенностям архитектуры вычислительной системы. Только в этом случае может быть достигнуто максимальное значение показателей производительности. Выбор системы с распределенной памятью в качестве архитектуры МВС для решения больших сеточных задач обусловлен следующими преимуществами: соотношение цена/производительность у систем с распределенной памятью ниже, чем у компьютеров других классов; гибкая конфигурируемость при создании подобной системы в зависимости от имеющегося бюджета и потребностей в вычислительной мощности; схема системы с распределенной памятью дает возможность практически неограниченно наращивать число процессоров в системе и увеличивать ее производительность.

Системы линейных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей возникают в процессе применения локально-двумерных схем расщепления параболических и эллиптических уравнений в задачах математической физики [1]. Алгоритмы решения трехточечных разностных уравнений входят в состав более сложных алгоритмов решения векторных задач, и потому программная реализация данных алгоритмов должна обладать высокой эффективностью.

Разработаны параллельные алгоритмы методов прогонки Коновалова-Яненко и циклической скалярной редукции, их модификации. Для решения двумерных сеточных эллиптических уравнений разработаны и реализованы параллельные алгоритмы метода полной редукции, метода неполной редукции [2].

Каждый параллельный алгоритм оценивается по двум параметрам – ускорению S_p и эффективности E_p , которые определяются по формулам

$$S_p = \frac{t_1}{t_p}, \quad E_p = \frac{S_p}{p} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где t_1 – время решения исходной задачи на одном процессоре, t_p – время решения исходной задачи по параллельному алгоритму на p процессорах; они могут быть определены теоретически и экспериментально.