

Взаимодействие пятен турбулентности и локальных возмущений поля плотности в пикноклине *

О.Ф. ВОРОПАЕВА, Г.Г. ЧЕРНЫХ

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: vorop@ict.nsc.ru, chernykh@ict.nsc.ru

1 марта 2011 г.

Выполнено численное исследование процесса зарождения, взаимодействия и последующего распространения уединенных внутренних волн, генерируемых двумя локальными возмущениями в пикноклине. Задача взаимодействия пятен турбулентности и внутренних волн солитонного типа рассмотрена в широком диапазоне параметров локальных возмущений. Выполнен численный анализ анизотропного вырождения турбулентности.

1. Постановка задачи

Динамика локальных ламинарных и турбулентных областей перемешанной жидкости (пятен турбулентности), оказывающих существенное влияние на формирование тонкой микроструктуры гидрофизических полей океана [1], активно исследуется в последние годы в лабораторных и численных экспериментах. Достаточно подробный обзор исследований можно найти, в частности, в [2]. Наибольший интерес представляет случай, когда волновая картина течения, генерируемого при эволюции области смешения, характеризуется возникновением в каждом квадранте плоскости (x, y) уединенных внутренних волн, распространяющихся в горизонтальном направлении в сторону роста $|x|$. Скорость распространения и амплитуда этих волн близки к постоянным значениям и связаны между собой известным соотношением Бенджамина [3].

При исследовании динамики ламинарного течения, возникающего при эволюции локального возмущения поля плотности, задача сводится к численному интегрированию системы уравнений Эйлера в приближении Обербека-Буссинеска. Для численного моделирования задачи взаимодействия с учетом турбулентности привлекаются осредненные по Рейнольдсу уравнения гидродинамики. Для их замыкания используются две полуэмпирические модели турбулентности [4, 5], основанные на уравнениях переноса компонент тензора рейнольдсовых напряжений, а также на упрощенных алгебраических аппроксимациях этих величин. Скорость диссипации и касательная компонента тензора рейнольдсовых напряжений определяются из решения соответствующих уравнений переноса. Для компонент вектора турбулентных потоков и дисперсии флуктуаций поля плотности используются алгебраические локально-равновесные представления. В качестве начальных данных для характеристик турбулентности используются распределения, соответствующие автомодельному решению задачи в случае однородной жидкости; локальное возмущение поля плотности задается в виде ограниченной области с устойчивой стратификацией,

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 10-01-00435, 09-05-01149), СО РАН (интеграционный проект №23, совместный интеграционный проект СО РАН, ДВО РАН, УРО РАН №103), а также гранта Президента РФ НШ-6068.2010.9.

отличной от стратификации окружающей среды; компоненты скорости полагаются равными нулю. Плотность невозмущенной жидкости задается в виде непрерывного аналога двухслойной жидкости.

Конечно-разностный алгоритм основан на введении переменных «функция тока - завихренность» и преобразовании координат, обеспечивающем переход от неравномерной сгущающейся в окрестности особенностей течения конечно-разностной сетки к равномерной сетке на плоскости (ξ, η) . Численное интегрирование дифференциальных уравнений математических моделей основано на использовании метода расщепления по пространственным переменным [6]. Для решения уравнения Пуассона для функции тока привлекается итерационная схема стабилизирующей поправки. Уравнение переноса завихренности решается с применением схемы расщепления, причем конвективные члены уравнения аппроксимируются направленными против потока разностями. Численное интегрирование уравнения неразрывности (переноса величины дефекта плотности) и уравнений, описывающих трансформацию характеристик турбулентности, проводилось по схеме расщепления с аппроксимацией конвективных слагаемых центральными разностями.

2. Взаимодействие локальных возмущений поля плотности

Динамика одиночного возмущения. Выполнено численное моделирование ламинарного течения, возникающего при эволюции одиночного локального возмущения поля плотности в пикноклине. Хорошо известно, что на начальном этапе локальное возмущение распадается на два пакета внутренних волн (в верхней полуплоскости), перемещающихся вдоль горизонтальной оси вправо и влево от возмущения. При этом возникает и конвективное течение, которое в верхней полуплоскости характеризуется движением жидкости против часовой стрелки - справа от локального возмущения, по часовой стрелке - слева (в нижней полуплоскости течение антисимметрично).

Расчеты проводились в широком диапазоне параметров локальных возмущений - размера и степени перемешивания жидкости. В зависимости от принятых значений этих параметров пятна перемешанной жидкости генерируют уединенные внутренние волны, различающиеся по амплитуде и, как следствие, по скорости распространения. Проведенные численные эксперименты носят в первую очередь методический характер. Расчетные данные демонстрируют достаточно хорошее качество численного алгоритма, в частности, его способность сохранять форму уединенных внутренних волн солитонного типа при их распространении на расстояния, сопоставимые с 15-20 длинами волн.

Взаимодействие двух разных локальных возмущений. Процесс формирования, взаимодействия и дальнейшего распространения внутренних волн солитонного типа в случае, когда первоначальные размеры двух возмущений различаются весьма существенно (в 1.7 раза), имеет следующие характерные черты. Период формирования картины внутренних волн заканчивается выходом характеристик уединенных волн на стационарные значения. Крайний правый и крайний левый солитоны не участвуют во взаимодействии, удаляясь каждый в своем направлении. Другая пара солитонов движется навстречу друг другу. При соударении наблюдается слияние солитонов, сопровождающееся резким возрастанием амплитуды «объединенной» волны. Затем волны разъединяются и продолжают движение в исходном направлении, сохраняя с достаточно высокой степенью точности амплитуду и скорость. Примечательно, что после взаимодействия изменяется местоположение солитонов в сравнении с их возможным расположением в случае отсутствия взаимодействия, причем наиболее существенно изменяется положение солитона меньшей амплитуды. Ана-

лиз расчетных данных показывает, что «запаздывание» солитонов после взаимодействия вызвано уменьшением их скорости непосредственно на этапе взаимодействия. Выше уже отмечалось, что каждое локальное возмущение поля плотности порождает конвективное течение, которое в верхней полуплоскости характеризуется движением жидкости против часовой стрелки – справа от локального возмущения, по часовой стрелке – слева (в нижней полуплоскости течение антисимметрично). Таким образом, в центре зоны взаимодействия находятся конвективные вихри противоположной направленности, движущиеся навстречу друг другу. После взаимодействия конвективные вихри одинаковой направленности оказываются по одну сторону от зоны взаимодействия. Они продолжают перемещение в исходном направлении и, таким образом, в каждом квадранте плоскости (x, y) образуются области с однонаправленным вихревым движением.

Взаимодействие двух одинаковых локальных возмущений. В случае взаимодействия двух одинаковых локальных возмущений решение задачи антисимметрично относительно вертикальной оси симметрии, играющей роль твердой стенки, от которой отталкиваются набегающие солитоны. При этом наблюдается весьма своеобразная картина взаимодействия: в момент соударения солитоны внутренних волн объединяются, образуя ромбовидную структуру с выраженными высокоградиентными прослойками. Подобные структуры обнаружены, в частности, в лабораторных экспериментах [7, 8] с полностью перемешанными пятнами жидкости, а также при рассмотрении задачи взаимодействия в рамках теории «мелкой воды» [8]. Расчеты проводились в достаточно широком диапазоне параметра, задающего степень перемешивания возмущенной жидкости. Ромбовидная структура наблюдалась как при взаимодействии однородных по плотности (полностью перемешанных), так и в случае устойчиво стратифицированных (слабо перемешанных) локальных возмущений.

Полученные в ходе численных экспериментов данные об особенностях взаимодействия внутренних волн солитонного типа в пикноклине согласуются с общепринятыми представлениями и известными результатами моделирования взаимодействия солитонов в рамках уравнения Кортевега-де Вриза и его обобщений (см., например, [9]).

3. Взаимодействие пятна турбулентности и локального возмущения поля плотности

Динамика одиночного пятна турбулентности. Выполнено численное моделирование течения, генерируемого при эволюции одиночной локальной области турбулентных возмущений в пикноклине, ширина высокоградиентной прослойки которого мала в сравнении с начальным радиусом турбулизованной области. Исследованы особенности эволюции характеристик турбулентности и внутренних волн и их взаимодействия.

При больших t перемещение образовавшихся волновых пакетов в направлении роста $|x|$ сопровождается генерацией энергии турбулентности на периферии зоны смешения и формированием локальных максимумов энергии турбулентности в местах дислокации внутренних волн значительной амплитуды. Окончание взаимодействия турбулентности и внутренних волн наблюдается, когда энергия турбулентности вырождается более чем на три порядка, и волны находятся вне зоны турбулентного смешения.

Выполнен численный анализ вырождения нормальных компонент тензора рейнольдсовых напряжений в покоящейся среде и при наличии волнового фона в виде набегающей уединенной волны. Получено, что дифференциальная модель рейнольдсовых напряжений

дает более детальное описание анизотропного поведения характеристик турбулентности при больших значениях времени, чем ее алгебраический аналог. В рамках рассмотренных математических моделей установлено, что особенности вырождения интенсивностей турбулентных флуктуаций компонент скорости слабо зависят от вида стратификации среды. При наличии волнового фона (для достаточно широкого диапазона параметров фонового возмущения) анизотропия нормальных компонент тензора рейнольдсовых напряжений не усиливается, и при больших значениях времени наблюдается тенденция к изотропии указанных характеристик.

Динамика пятна турбулентности под воздействием фонового волнового пакета. Выполнено численное моделирование взаимодействия пятна турбулентности и волнового пакета, индуцируемого локальным возмущением поля плотности в пикноклине. С учетом симметрии (антисимметрии) течения расчет проводился в верхней полуплоскости с постановкой на оси x соответствующих граничных условий. В ходе численных экспериментов варьировались параметры локального возмущения поля плотности.

При взаимодействии турбулентного пятна и уединенных внутренних волн, генерируемых весьма малым локальным возмущением поля плотности, в горизонтальной полосе, прилегающей к оси движения фонового волнового возмущения, наблюдается снижение значений энергии турбулентности, которое может приводить к нарушению структуры турбулентного пятна.

Рассматривался вариант фонового волнового возмущения, характерные параметры (амплитуда и длина волны) которого сопоставимы с характеристиками внутренних волн, порождаемых областью турбулентных возмущений. При таком взаимодействии изменение структуры пятна турбулентности оказывается более существенным: наблюдается отеснение зоны турбулентности от горизонтальной оси симметрии пятна (оси абсцисс), сопровождающееся существенной деформацией пятна турбулентных возмущений под воздействием набегающих внутренних волн. Отметим, что степень этой деформации напрямую связана с характеристиками набегающей уединенной волны: при уменьшении амплитуды и длины фоновой волны трансформация внешней границы турбулизованной области становится менее выраженной.

Как и в случае ламинарного течения, при наличии турбулентности на начальном этапе взаимодействия картина течения характеризуется двумя парами конвективных вихрей противоположной направленности, удаляющихся вправо и влево от соответствующих локальных возмущений вдоль горизонтальной оси. Развитие этого течения со временем приводит к столкновению центральных конвективных вихрей. В финале взаимодействия конвективная картина характеризуется появлением в каждом квадранте областей однонаправленного вихревого движения. При этом координаты локальных максимумов модуля функции тока с достаточно высокой степенью точности совпадают с соответствующими координатами экстремумов в отсутствие взаимодействия.

В ходе численных экспериментов при варьировании начального размера ламинарной области перемешанной жидкости было обнаружено, что возможны ситуации, когда в результате прохождения через турбулентное пятно солитона значительной (в сравнении с характерными размерами области турбулентных возмущений) амплитуды и длины волны может наблюдаться не только существенная деформация области турбулентных возмущений, но и прекращение вырождения турбулентности. При этом происходит захват и перенос турбулентного пятна солитоном от локального возмущения поля плотности, в результате турбулентность при больших значениях времени играет роль пассивного скаляра. При фиксированной степени перемешивания жидкости внутри локального возмуще-

ния поля осредненной плотности увеличение начального размера локального возмущения приводит к более значительному приросту суммарной энергии внутренних волн на этапе взаимодействия и более раннему выходу суммарной энергии турбулентности на постоянное значение.

В заключение отметим, что на рассмотренном интервале значений времени величина суммарной энергии турбулентности в отсутствие взаимодействия уменьшается более чем на три порядка, и, таким образом, время взаимодействия ограничено временем «жизни» самого пятна турбулентности. Численные эксперименты показывают, что замедление вырождения турбулентности под воздействием набегающей уединенной волны наблюдается, когда начальная энергия локального возмущения поля плотности сопоставима с начальной суммарной энергией турбулентности.

Более подробное изложение представленных результатов исследований можно найти в [10, 11].

Список литературы

- [1] МОНИН, А.С, ОЗМИДОВ, Р.В. Океанская турбулентность. Ленинград: Гидрометеиздат. 1981. 320 с.
- [2] CHASHCHENKIN YU.D., CHERNYKH G.G., VOROPAIEVA O.F. The Propagation of a Passive Admixture from a Local Instantaneous Source in a Turbulent Mixing Zone // Int. J. Computational Fluid Dynamics. 2005. V. 19, No. 7. pp. 517–529.
- [3] BENJAMIN T.B. Internal waves of permanent form in fluids of great depth // J. Fluid Mech. 1967. V. 29, No. 3. P. 559–592.
- [4] GIBSON M. M., LAUNDER B. E. On the calculation of horizontal, turbulent, free shear flows under gravitational influence // Trans. ASME, Ser. C, J. Heat Transfer. 1976. V. 90. P. 81–87.
- [5] RODI W. Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 5305–5328.
- [6] ЯНЕНКО Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. 1967. 195с.
- [7] HONJI H., MATSUNAGA N., SUGIHARA Y., SAKAI K. Experimental observation of internal symmetric solitary waves in a two-layer fluid // Fluid Dynamics Res. 1995. V. 15. P. 89–102.
- [8] ГАВРИЛОВ Н.В., ЛЯПИДЕВСКИЙ В.Ю. Симметричные уединенные волны на границе раздела жидкостей // Докл. РАН. 2009. Т. 429, № 2. С. 187–190.
- [9] ПОПОВ С.П. Солитонные решения обобщенных дискретных уравнений Кортевега-де Вриза // ЖВММФ. 2008. Т. 48, № 9. С. 1698–1709.
- [10] ВОРОПАЕВА О. Ф., ЧЕРНЫХ Г. Г. Численное моделирование взаимодействия зоны турбулентного смешения и локального возмущения поля плотности в пикноклине // ПМТФ. 2010. Т. 51, № 2. С. 49–60.
- [11] ВОРОПАЕВА О. Ф., ЧЕРНЫХ Г. Г. Взаимодействие зоны турбулентного смешения с локальным возмущением поля плотности в пикноклине // J. Engineer. Thermophysics. (в печати)