ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ

В ЛАБОРАТОРНОМ И ЧИСЛЕННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ:

Ю.Д. Чашечкин

Тезисы доклада на семинаре

"Вычислительные методы и математическое моделирование" ИПМ РАН

Основу теоретической механики жидкостей составляют уравнения сохранения ряда физических величин, однако для практических целей используются приближенные и конститутивные уравнения (теории турбулентности, приближения пограничного слоя, уравнения газовой динамики) [1], степень взаимного соответствия которых остается неопределенной. Неприводимость моделей не позволяет сравнивать их результаты и создавать объединенные базы данных.

В последние годы развитие оптических инструментов наземного и космического базирования позволило наблюдать тонкую структуру течений различного масштаба: от световых лет в межзвездной среде, до тысяч километров атмосферах звезд и метров в атмосфере и гидросфере Земли. В лабораторных условиях регистрируется тонкая структура вихревых и волновых течениях с масштабами от сантиметров до микрон [2]. В качестве иллюстраций приводятся картины распределения жидких и твердотельных маркеров в составных вихрях [3 - 5] и тонкой суспензии в стоячих волнах [6]. Практически важным является вопрос, какие модели позволяют рассчитывать все компоненты течений.

В данной работе математическое моделирование течений неоднородных жидкостей проводится на основе фундаментальной системы, включающей уравнения неразрывности, баланса импульса и энергии, диффузии компонент и замыкающее уравнение состояния с учетом условия совместности. Как показали проведенные вычисления, симметрии такой системы, в отличие от многих модельных систем, соответствуют основным принципам физики [7]. Численные расчеты проводятся на базе полной системы. Аналитические построения выполнены в линейном приближении.

Впервые дана полная математическая классификация крупномасштабных волновых и сопутствующих тонкоструктурных компонент инфинитезимальных периодических течений, установлена вырожденность классической системы уравнений неразрывности и переноса импульса в приближении однородной жидкости [8].

Детально изучено формирование тонкой структуры течений, индуцированных диффузией на топографии, а также в полях периодических или присоединенных внутренних волн в непрерывно стратифицированной жидкости. Малость скоростей течений позволяет применять различные аналитические и численные методы. Расчеты позволили проследить формирование и крупных, и тонких компонент двумерных течений, индуцированных диффузией в неподвижной среде на наклонной полосе и клине, установить особенности геометрий полей различных физических величин, таких как компоненты скорости, возмущений плотности, давления, скорости течений, завихренности, скоростей бароклинной генерации завихренности и диссипации. Детальные расчеты согласуются с данными теневой визуализации течений в лаборатории и собственными наблюдениями горных ветров [9].

Асимптотическими методами исследована картина внутренних волн и сопутствующих тонкоструктурных компонент, возбуждаемых в непрерывно стратифицированных средах компактными 2D и 3D источниками, совершающими линейные и крутильные колебания [10] с учетом фазового состояния среды [11]. В экспериментах с непрерывно стратифицированной жидкостью прослежена трансформация структуры пучка периодических внутренних волн при увеличении амплитуды колебаний источника, формирование разрывов градиента плотности и компактных вихрей вдали от источника в областях конвергенции тонкоструктурных компонент волновых полей. Изучен процесс образования висящих разрывов в поле присоединенных внутренних волн и их трансформации в висящие вихри и последовательности вихревых систем – аналоги некоторых типов облачных систем (лентикулярисов) в горной местности (приведены данные собственных наблюдений). Экспериментально показано сильное влияние высокоградиентных структур на динамику переноса маркирующих примесей.

Совокупность фундаментальных уравнений, дополненных физически обоснованными граничными условиями, составляет, с учетом условий совместности и тождественности преобразований, основу дифференциальной механики жидкостей и позволяет одновременно рассчитывать макро- и тонкоструктурные компоненты течений. Практическую часть дифференциальной механики жидкостей составляют адекватные экспериментальные методы, позволяющие находить значения всех физических величин, входящих в фундаментальную систему, и оценивать погрешности их определения непосредственно в ходе опытов. К числу наблюдаемых величин относятся вектор импульса, все термодинамические параметры среды (плотность, давление, температура, концентрация компонент) и устойчиво регистрируемые параметры процессов, такие как скорости звука и света (показатель преломления), дисперсия волн и другие. Методики проведения опытов и выполнения численных расчетов должна предусматривать регистрацию полной картины течений с выделением крупномасштабных и разрешением наиболее тонких компонент течений.

Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М. : Наука, ГРФМЛ. 2000. – 733 c.

2. Чашечкин Ю.Д., Бардаков Р.Н., Шабалин В.В. Регулярная тонкая структура течений в высыхающей капле суспензии наночастиц кварца // Доклады АН. 2011. Т. 436. № 3. С. 338-338.

3. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Трофимова М.В., Чашечкин Ю.Д. Структурная устойчивость процесса переноса вещества из компактного пятна в составном вихре // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 5. С. 578-590.

4. Степанова Е.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Перенос масла в составном вихре // Механика жидкости и газа. 2011. № 2. С. 52-64.

5. Будников А.А., Жарков П.В., Чашечкин Ю.Д. Экспериментальное моделирование процесса переноса плавающих объектов в “мусорных островах” // Вестник МГУ. Серия 3. Физика и астрономия. 2012 № 4. С. 83 – 88.

6. Чашечкин Ю.Д., Калиниченко В.А. Образы топографии в структуре суспензии в стоячих волнах // Доклады РАН. 2012. Т.446. № 3. С. 283-287.

7. Байдулов В.Г., Чашечкин Ю.Д. Сравнительный анализ симметрий моделей механики неоднородных жидкостей // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444. № 1. С. 38–41.

8. Чашечкин Ю.Д. Иерархия моделей классической механики неоднородных жидкостей // Морской гидрофизический журнал. 2010. № 5. С. 3-10.

9. Чашечкин Ю.Д., Загуменный Я.В. Структура течения, индуцированного диффузией на наклонной пластине // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444. № 2. С. 165-171.

10. Васильев А.Ю., Чашечкин Ю. Д. Трехмерные периодические течения, образующиеся при колебаниях части наклонной плоскости в неоднородной жидкости // ПММ. 2012. Том 76. Вып. 3. С. 418-428.

11. Кистович А.В. и Чашечкин Ю.Д. Тонкая структура конического пучка периодических внутренних волн в стратифицированном океане и атмосфере // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. №.1. С. 117-125.