

В режиме конденсации одно решение, соответствующее меньшей глубине, всегда неустойчиво. Другое решение может быть как устойчивым, так и неустойчивым. Найдены два сценария развития неустойчивости поверхности раздела. Первый сценарий характеризуется переходом к неустойчивости при всех волновых числах и качественно аналогичен переходу при испарении. При реализации второго сценария происходит сближение и слияние двух решений и в сверхкритической области решение стационарной задачи перестает существовать. В этом случае при слиянии решений потеря устойчивости происходит при нулевом волновом числе. Последний сценарий реализуется также в нейтральной среде с нулевым капиллярным давлением.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 16-11-10195.

## **Медленные, быстрые и сверхбыстрые компоненты процессов формирования и эволюции пространственно упорядоченных структур течений жидкостей**

**Ю. Д. Чашечкин**

*ИПМех РАН*

[chakin@ipmnet.ru](mailto:chakin@ipmnet.ru)

Пространственно-упорядоченные структуры в картинах распределения вещества и других физических свойств сплошных сред, включающих жидкости, газы и плазму, наблюдаются во всем доступном для регистрации диапазоне масштабов – от микроскопических до галактических. Структуры непрерывно эволюционируют, меняются их геометрические характеристики, в них появляются новые компоненты и исчезает часть старых. Одна часть структурных элементов (волны) существует продолжительное время, позволяющая провести классификацию форм, другая быстро развивается и исчезает. Типичные примеры структурированных сред – стратифицированные атмосфера и со струйными течениями, вихрями (облаками), волнами различной природы и гидросфера Земли.

Развиваемый универсальный подход к описанию неравновесных систем проводится в модели «сплошной среды», которая характеризуется неоднородным и непрерывным распределениями всех физических величин: термодинамических (потенциалов и их производных – плотности, давления, энтропии, температуры, концентрации), кинетических (коэффициентов переноса), динамических (плотности – здесь мера инерции и гравитационного притяжения, импульса, полной и внутренней энергии). Атомно-молекулярное строение вещества в модели учитывается при параметризации процессов на макро- и микромасштабах. На больших масштабах характерные времена изменчивости процессов определяются механическими и диффузионными параметрами течений. В структурных элементах малых масштабов (порядка размеров атомно-молекулярных кластеров – см или атомных слоев толщиной см) темп обменов определяется атомно-молекулярными взаимодействиями, которые обеспечивают сверхбыстрое преобразование доступной потенциальной энергии (в слоях с градиентами концентрации – доступной химической энергии, на контактных границах – поверхностной потенциальной энергии) в тепловую и механическую энергию движения.

Основу теоретического анализа и принципов построения методик опытов составляют уравнения состояния (выражения для термодинамических потенциалов, эмпирические формулы связи между плотностью, давлением, температурой, концентрацией составляющих веществ, характеризующие изучаемые среды), а также дифференциальные уравнения переноса вещества (неразрывности), импульса (Навье – Стокса, энергии или температуры (Фурье), концентрации (Фика), которые описывают динамику и структуру течений в выбранном диапазоне параметров. Уравнения дополняются физически обоснованными начальными и граничными условиями на контактных поверхностях. Анализ проводится с учетом условия совместности, определяющего ранг нелинейной системы уравнений, порядок ее линеаризованной формы, степень характеристического (дисперсионного) уравнения. Система уравнений с начальными и граничными условиями характеризуется набором собственных временных и пространственных масштабов, отношения которых образуют безразмерные комбинации, включающие как традиционные (числа Рейнольдса, Фруда, Пекле в задачах обтекания препятствий или Рэлея, Прандтля, Нуссельта в задачах конвекции), так и новые, не вошедшие

в традиционные описания. Медленные процессы в слабодиссипативных средах, к которым относятся многие жидкости и газы, анализируются методами теории сингулярных возмущений, позволяющими одновременно изучать и крупные, слабо затухающие компоненты, размеры которых задаются геометрией и динамикой задачи, и тонкие компоненты, характеризующие границы структурных элементов. Малые масштабы определяются значениями кинетических коэффициентов и характерной частотой или скоростью процесса. Поскольку характерные скорости или частоты могут достигать больших значений, тонкие масштабы могут быть весьма малыми и приближаться к кластерным (атомарным) размерам. Влияние таких локализованных интенсивных возмущений (к которым, в частности, принадлежат, линейные предшественники ударных или детонационных волн) на перенос энергии и вещества нуждается в тщательном изучении с учетом и макро-, и микрокомпонент течений.

В рамках единого подхода теоретически (аналитически и численно) и экспериментально изучены процессы установления и эволюции таких течений, как "индуцированные диффузией на топографии" – возникающих на покоящихся препятствиях различной формы, погруженных в неподвижную стратифицированную жидкость; генерации, распространения, отражения и нелинейного взаимодействия пучков внутренних волн; обтекания препятствий в диапазоне переходных и нестационарных режимов; свободной многокомпонентной конвекции над источниками тепла различной размерности (точка, линия, плоскость). Впервые экспериментально изучен процесс формирования структур в первоначально однородной суспензии при развитии собственных колебаний (мод) в прямоугольном сосуде с гладкими и деформированными стенками, в составном вихре, а также при падении капель в принимающую жидкость. В течениях во всех случаях происходит филаментизация (расщепление на волокна) компактных объемов растворимых примесей. Аналитические, численные и экспериментальные результаты независимо выполненных работ согласуются количественно и качественно.

Обсуждаются возможности стандартизации описания течений жидкостей, экстраполяции полученных данных на условия атмосферы, гидросферы и некоторые объекты техносферы, включая аэродинамические трубы и экспериментальные установки для изучения управляемых термоядерных реакций.

## Литература

1. Chashechkin Yu. D. Differential fluid mechanics – harmonization of analytical, numerical and laboratory models of flows. // Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures. Springer Series “Computational Methods in Applied Sciences” V. 40. 2016. P. 61-91. DOI: 10.1007/978-3-319-23564-6-5.
2. Димитриева Н.Ф., Чашечкин Ю.Д. Структура индуцированных диффузией течений на клине с искривленными гранями // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 3. С. 77-86. DOI: 10.22449/0233-7584-2016-3-77-86.
3. 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. DOI: 10.1134/S1028335814010017.
4. Ильиных А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Гидродинамика погружающейся капли: линейчатые структуры на поверхности венца // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2017. № 2. С. 152–165. DOI: 10.1134/S0015462817020144.
5. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Акустика и гидродинамика удара капли о водную поверхность // Акустический журнал. 2017. Т. 63. №. 1. С. 38–49. DOI: 10.1134/S1063771016060038.
6. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Структура первичного звукового сигнала при столкновении свободно падающей капли с поверхностью воды // ЖЭТФ. 2016. Т. 149. № 4. С. 864–875. DOI: 10.1134/S1063776116020175.
7. Загуменный Я.В., Чашечкин Ю.Д. Нестационарная вихревая картина обтекания пластины с нулевым углом атаки (двумерная задача) // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2016. № 3. С. 48–65. DOI: 10.7868/S056852811603018X.