ТОНКАЯ СТРУКТУРА – НЕОТЪЕМЛЕМОЕ СВОЙСТВО МИРОВОГО ОКЕАНА, ГИДРОСФЕРЫ, АТМОСФЕРЫ И ДРУГИХ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

Чашечкин Ю.Д.

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 117997, Москва,
проспект Вернадского, д.101/1,
тел/ факс: +7 (495) 4340192/+7 (499) 7399531, e-mail: chakin@ipmnet.ru*

The basis of the approach is the definition of a fluid as a deformable medium, the physical properties and motion of which are determined by the principles of mechanics and thermodynamics. Fluid flows are the coordinated transport of momentum, energy and matter, accompanied by the transformation of fields of physical quantities. Flows are described by a system of the fundamental equations, analyzed taking into account the compatibility conditions, the initial and boundary conditions. Examples are given.

Одним из запоминающихся моментов научной жизни океанографов 70-х годов прошлого века, времени создания новых инструментов, длительных рейсов, давших интересные экспериментальные результаты, формирования ярких идей, были научные дискуссии, посвященные обсуждению отдельных тем («Внутренние волны и турбулентность: что появилось ранее – курица или яйцо») и книг, среди которых заметное место занимали замечательные произведения К.Н. Федорова [1–3]. Некоторые из поднятых в них вопросов остаются неразрешенными до настоящего времени. Цель данного доклада – представить новую, масштабно инвариантную классификацию компонентов течений жидкостей на основе системы фундаментальных уравнений механики и термодинамики, а также требования к составу научной аппаратуры и организации океанологических исследований, обеспечивающие объективный контроль точности измерений.

Основа описания – определение жидкости как деформируемой среды, физические свойства и движение которой определяются принципами механики, и термодинамики. Основу описания среды составляют термодинамические потенциалы, производные которых определяют традиционные физические величины – плотность, давление, энтропию, температуру, концентрации растворенных веществ

или взвешенных частиц и диссипативные параметры их молекулярного переноса – коэффициенты кинематической и динамической вязкости, температуропроводности и диффузии [4].

Течения жидкости определяются как согласованный перенос импульса, энергии и вещества, сопровождающийся трансформацией полей физических величин. Течения описываются системой фундаментальных уравнений для открытых систем, включающих действие внешних факторов – «источников» – аналогов законов сохранения базовых величин замкнутых систем [5–7] с физически обоснованными начальными и граничными условиями.

При анализе эволюции картины течений учитывается одновременное действие большого числа процессов, существенно различающихся по своей локализации и временной структуре: самых медленных, обусловленных молекулярным переносом, более быстрых, связанных с механическим перемещением водных масс (течениями), волновыми явлениями с характерной групповой скоростью, а также самых быстрых, связанных с прямым действием атомно-молекулярных взаимодействий (например, при уничтожении доступной потенциальной поверхностной или химической энергии). В силу многоуровненности процессов течения не переходят в установившиеся и постоянно эволюционируют.

Система уравнений анализируется с учетом условия совместности, определяющего ранг нелинейной системы, порядок ее линеаризованной версии и степень характеристического (дисперсионного) уравнения [8].

В основу классификации структурных компонентов течений положены полные решения линеаризованной системы фундаментальных уравнений, которая анализируется методами теории сингулярных возмущений. Полные решения системы включает группу регулярных решений, которые характеризуют волны различных типов. В волнах параметры локальной временной изменчивости полей физических величин (частота или период) связаны с мгновенными характеристиками пространственной структуры полей (длиной волны, волновым вектором) функциональным (дисперсионным) соотношением. Волновые поля характеризуются собственными скоростями переноса энергии и фазы, что служит основой их идентификации по данным измерений.

Богатая группа сингулярных решений определяет лигаменты – тонкоструктурные компоненты, поперечные масштабы которых определяется значениями кинетических коэффициентов и частотой волны (или скоростью течения). Лигаменты являются линейными предшественниками ударных волн, тонких компонентов полей и границ областей характерных видов структур (волн, вихрей, «турбулентных пятен») [9].

Лигаменты – наиболее распространенные компоненты течений, они присутствуют во всем доступном для наблюдения диапазоне временных масштабов – от самых медленных в течениях, индуцированных диффузией на топографии или ползущими телами [10], в полях периодических и присоединенных внутренних волн [11, 12], в следах позади быстро движущихся тел [13] (приводятся примеры визуализации различных течений).

Учет всего набора разнородных тонкоструктурных компонентов позволяет разрабатывать эффективные схемы численного расчета генерации и распространения волн различных типов, хорошо согласующихся с данными независимо выполненными экспериментами, в частности распространения внутренних волн в среде с произвольной стратификацией, и их отражения от критического уровня, на котором совпадают частоты волны и плавучести [14, 15].

Необходимое условие согласованности аналитического, численного и лабораторного моделирования динамики и структуры течений и волн различных типов [16] позволяет сформулировать обоснованные требования к технике и методике морских измерений, которая должна позволять не только определять значения физических величин, но и оценивать погрешность полученных данных непосредственно в ходе проведения измерений.

Один из перспективных методов контроля точности основывается на принципе избыточности, который реализуется при обеспечении одновременных измерений удельной электропроводности, температуры, давления, скорости звука, коэффициента оптического преломления для расчета плотности и других величин, входящих в различные уравнения состояния [17].

Совершенствование техники лабораторного моделирования позволяет проводить динамическую калибровку океанских приборов на моделях реальных процессов в непрерывно и дискретно стратифицированной среде, объективно оценивать погрешности определений основных физических величин и параметров процессов (в частности, амплитуд внутренних волн). Полученные объективные данные служат надежной основой описания состояния природных систем – атмосферы, гидросферы, Мирового океана и прогноза их эволюции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской академии наук (Программа фундаментальных исследований Президиума РАН I.2.49 «Взаимодействие физических, химических и биологических процессов в Мировом океане» проект АААА-А17-117121120015-8 «Математическое и лабораторное моделирование механизмов переноса и структуризации примесей в океане»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров К.Н. Тонкая термохалинная структура вод океана. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 184 с.
2. Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М. Морская вода. М.: Наука. 1979. 327 с.
3. Федоров К.Н., Гинзбург А.И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 304 с.
4. Wright D.G., Feistel R., Reissmann J.H., Miyagawa K., Jackett D.R., Wagner W., Overhoff U.C., Guder C., Feistel A., and Marion G.M. Numerical implementation and oceanographic application of the thermodynamic potentials of liquid water, water vapour, ice, seawater and humid air – Part 2: The library routines // *Ocean Sci.* 2010. Vol. 6. P. 695–718. www.ocean-sci.net/6/695/2010/ doi:10.5194/os-6-695-2010.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Теоретическая физика: Т. VI. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 736 с.
6. Müller P. The equations of oceanic motions. Cambridge: CUP. 2006. 302 p.
7. Vallis G.K. Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics. Cambridge: CUP. 2006. 745 p.
8. Chashechkin Yu.D. Differential fluid mechanics – harmonization of analytical, numerical and laboratory models of flows. P. 61–91. // *Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures. Springer Series Computational Methods in Applied Sciences* Vol. 40. 2016. 328 p. DOI: 10.1007/978-3-319-23564-6-5
9. Chashechkin Yu.D. Singularly perturbed components of flows – linear precursors of shock waves // *Math. Model. Nat. Phenom.* 2018. Vol. 13. No. 2. P. 1–29. <https://doi.org/10.1051/mmnp/2018020>.
10. Димитриева Н.Ф., Чашечкин Ю.Д. Тонкая структура стратифицированного течения около неподвижного и медленно движущегося клина // *Океанология.* 2018. Т. 58. № 3. С. 358–368. DOI: 10.7868/S0030157418030024
11. Бардаков Р.Н., Васильев А.Ю., Чашечкин Ю.Д. Расчет и измерения конических пучков трехмерных периодических внутренних волн, возбуждаемых вертикально осциллирующим поршнем // *Механика жидкости и газа.* 2007. № 4. С. 117–133. DOI: 10.1134/S0015462807040114
12. Чашечкин Ю.Д. Структура и динамика природных течений: теоретическое и лабораторное моделирование // *Актуальные проблемы механики. 50 лет Институту проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН.* М.: Наука, 2015. С. 63–78.
13. Чашечкин Ю.Д., Загуменный Я.В., Димитриева Н.Ф. Динамика установления и тонкая структура картины обтекания препятствий в лабораторном и вычислительном эксперименте // *Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции (26–27 сентября 2016 г., г. Москва).* М.: Изд-во МГУ, 2016. 1128 с. С. 152–163.
14. Кистович Ю.В., Чашечкин Ю.Д. Линейная теория распространения пучков внутренних волн в произвольно стратифицированной жидкости // *Прикладная механика и техническая физика.* 1998. Т. 39. № 5. С. 88–98. doi:10.1007/BF02468043.

15. Paoletti M. S., Swinney H. L. Propagating and evanescent internal waves in a deep ocean model // *J. Fluid Mechanics*. 2012. Vol. 706. P. 571–583. doi: 10.1017/jfm.2012.284.
16. Chashechkin Yu.D., Zagumennyi I.V., Dimitrieva N.F. Unsteady Vortex Dynamics Past a Uniformly Moving Tilted Plate // *Topical Problems of Fluid Mechanics 2018*, Prague, February 21–23, 2018. Proceedings. P. 47–56. Edited by Šimurda D., Bodnár T.: 2017. 350 p. DOI: <https://doi.org/10.14311/TPFM.2018.007>.
17. Бардаков Р.Н., Кистович А.В., Чашечкин Ю.Д. Расчет скорости звука в стратифицированной морской среде на основе системы фундаментальных уравнений // *Океанология*. 2010. Т. 50. № 3. С. 325–333. doi: 10.1134/S000143701003001X.