

вом пространстве даже весьма простых течений. Наиб. известный пример — конвекция в подогреваемой торондальной полости, расположенной в вертикальной плоскости. Образом хаотич. колебаний вращат. движения жидкости внутри такой полости служит странный аттрактор — аттрактор Лоренца. По совр. представлениям, в фазовом пространстве для ур-ний Навье — Стокса при определ. условиях должен существовать странный аттрактор, движение по к-рому соответствует режиму установившейся Т.

Наиб. успехи в использовании динамич. подхода достигнуты при исследовании перехода от ламинарного к хаотическому во времени течению жидкости. Наиб. распространённые сценарии перехода к хаосу в простых ситуациях (течение Тейлора — Куэтта между вращающимися цилиндрами, термоконвекция) — это: разрушение квазипериодич. движений; перемежаемость; бесконечная последовательность удвоений периода. В экспериментах наблюдаются и более сложные сценарии, однако обнаружение именно этих канонич. сценариев в реальных течениях обособовало справедливость представлений о динамич. характере процессов в области перехода к Т. Эти же сценарии обнаружены и в численных экспериментах с полными [точнее, моделируемыми] на компьютере с достаточно большим числом ($\geq 10^6$) ячеек сетки] ур-ниями Навье — Стокса при числе Рейнольдса $Re \sim 10^3 \div 10^4$.

Применимость теории динамич. хаоса к описанию возникновения Т. обосновывается не только характером бифуркаций течения, предшествующих возникновению беспорядка, но и тем, что непосредственно по наблюдаемому данным удаётся восстановить странный аттрактор за точкой перехода. Идеи обработки хаотич. сигналов с целью диагностики их происхождения и воспроизведения аттрактора соответствующей динамич. системы были высказаны Такенсом (1981) и впервые реализованы в экспериментах с течением Тейлора — Куэтта и с термоконвекцией в замкнутой полости [Дж. Голлаб, Х. Свинни (J. Gollub, H. Swinney), 1983]. Эти эксперименты подтвердили, что хаосу вблизи точки перехода действительно соответствует странный аттрактор малой размерности. Существенно, что для определения размерности течения необязательно восстанавливать аттрактор. В 1983 Р. Гроссбергер (R. Grassberger) и И. Прокачиа (I. Procaccia) предложили процедуру измерения размерности непосредственно по наблюдаемому сигналу.

В рамках динамич. подхода удаётся объяснить и происхождение пространственно-неупорядоченного движения. При этом исходным является тот очевидный для теории динамич. систем факт, что движение индивидуальных жидких элементов, удовлетворяющее ур-нию $dx/dt = u(x, t)$, где $u(x, t)$ — поле скорости, удовлетворяющее ур-нию Навье — Стокса, может быть хаотическим, даже если скорость $u(x, t)$ регулярна. Такое неупорядоченное движение обычно называют лагранжевой Т. При подходящих условиях в системе, к-рая демонстрирует лагранжеву Т., может развиваться и Т. поля скорости. В частности, полевые ур-ния (не только гидродинамические) в ряде случаев могут быть преобразованы (без приближений) в многочастичную задачу для нек-рого класса решений. Роль частиц здесь играют особенности самого поля или сформированные им локализованные структуры, напр. вихри. Хаотич. движение таких частиц и есть, собственно, пространственно-временной беспорядок.

В периоды своего возникновения и развития разл. подходы — статистический, структурный и динамический — представлялись их сторонниками единственно приемлемыми для описания феномена Т. Поэтому они развивались параллельно и практически независимо. Результаты, полученные в каждом из них, зачастую относились к разл. задачам и отвечали на вопросы, возникающие в качественн. разл. эксперим. ситуациях. Эти подходы складываются в единую теорию Т., и уже кажется удивительным, что их автономия просуществовала столь долго.

Проявления турбулентности. Т. относится к наиб. распространённым в природе и в техн. устройствах явлениям. Масштабы Т. простираются от космического до порядка

длины световой волны. Турбулентными, в частности, являются: течение воды в реках, морях, океанах и в кровеносных сосудах; межзвёздные газовые туманности; струи реактивных двигателей и газовых горелок; общая циркуляция атмосферы планет, недр звёзд; конвективные потоки в жилых помещениях. Т. также возникает при движении гребных винтов, турбин, летательных аппаратов и биол. объектов; при протекании как медленных, так и быстрых (горение, взрыв) хим. реакций; в космич. и лаб. плазме. Будучи порождённой нек-рыми процессами и движениями, Т., в свою очередь, оказывает существенное влияние на их протекание и состояние среды в целом благодаря её свойству интенсифицировать перенос кол-ва движения и вещества. В частности, Т. атмосферы играет осн. роль в процессах переноса тепла и влаги с поверхности суши и океана, определяя тем самым её состояние и изменения погоды. Существенна её роль и для др. процессов, непосредственно не связанных с Т. Так, напр., возникающие в ней случайные поля темп-ры, плотности, давления, влажности и т. п. влияют на распространение эл.-магн. и акустич. волн. Это приводит к ряду интересных эффектов, играющих, с точки зрения деятельности человека, как отрицат. роль (в частности, для оптич. астрономии и радиоастрономии), так и положительную (напр., способствуя более надёжной радиосвязи, уменьшая область тени благодаря диффузному рассеянию коротких эл.-магн. волн).

Интенсивная Т. не только рассеивает волны, но и сама является их источником: электромагнитных — в плазме, внутренних — в океане, акустических — в сжимаемой среде. Излучённые поля содержат информацию о Т. и могут быть использованы для её диагностики. Процессы генерации волн турбулентными движениями среды представляют и практич. важность; напр., уровень акустич. излучения реактивных двигателей летательных аппаратов настолько высок, что учитывается при их коммерч. оценке.

В гидродинамике наиб. важным, с практич. точки зрения, является влияние Т. на сопротивление движущихся тел, к-рое под её влиянием может как увеличиваться, так и уменьшаться. Для хорошо обтекаемых (удлинённых вдоль набегающего потока) тел осн. вклад даёт сопротивление трения, к-рое является равнодействующей касательных напряжений и поэтому после перехода к турбулентному режиму возрастает из-за большего переноса кол-ва движения Т. Для плохо обтекаемых тел (типа поперечно обтекаемого цилиндра) большую роль играет сопротивление давления, являющееся равнодействующей давления на поверхность и обычно уменьшающееся после турбулизации течения. Это наряду с исследованиями свойств развитой Т. и методов расчётов турбулентных течений порождает и другую практически важную задачу — управление переходом к Т.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Гидродинамика, 4 изд., М., 1988; Монин А. С., Яглом А. М., Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности, ч. 1—2, М., 1965—67; Цытович В. Н., Теория турбулентной плазмы, М., 1971; Турбулентность. Принципы и применения, под ред. У. Фроста, Т. Моулдена, пер. с англ., т. 1, М., 1980; Вихри и волны, пер. с англ., М., 1984; Рабинович М. И., Суцук М. М., Регулярная и хаотическая динамика структур в течениях жидкости, «УФН», 1990, т. 160, с. 3; Sreenivasan K. R., Fractals and multifractals in fluid turbulence, «Ann. Rev. Fluid Mech.», 1991, v. 23, p. 539.

М. И. Рабинович, М. М. Суцук.

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ПЛАЗМЫ — хаотическое, детально невозпроизводимое пространственно-временное изменение параметров плазмы, неустойчивой относительно возбуждения сразу многих её степеней свободы (колебаний, волн и вихрей разл. типов) до уровня, заметно выше теплового. В отличие от обычных, тоже нерегулярных, флуктуаций вблизи устойчивого термодинамич. равновесия для Т. п. характерно именно наличие в плазме неустойчивости, т. е. избыточной свободной энергии, вводимой в неустойчивые моды (степени свободы) внеш. источниками, граничными или начальными условиями. За счёт нелинейных взаимодействий эта энергия перераспределяется между всеми модами и возмущениями разл. пространств. масштабов и диссипирует в тепло за счёт вязкости, резистивности