

и газа, 6 изд., М., 1987; Таунсенд А. А., Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом, пер. с англ., М., 1959; Абрамович Г. Н., Теория турбулентных струй, М., 1960; Моинив А. С., Яглом А. М., Статистическая гидромеханика, 2 изд., ч. 1, СПб., 1992. А. С. Моинив.

**ТУРБУЛЕНТНОСТЬ** (от лат. *turbulentus* — беспорядочный) — сложное, неупорядоченное во времени и пространстве поведение *диссипативной среды* (или поля). детали к-рого не могут быть воспроизведены на больших интервалах времени при сколь угодно точном задании начальных и граничных условий. Такая невоспроизводимость есть следствие собственной сложной динамики среды, определяемой неустойчивостью индивидуальных движений, и не связана с неполнотой описания, флуктуациями или действием внеш. шумов. В режиме стационарной установившейся Т. (говоря о Т., обычно понимают именно такой режим) диссипация энергии компенсируется её поступлением из внеш. источников.

Понятие Т. возникло в 19 в. в связи с изучением течений жидкостей и газов. Впоследствии было осознано, что переход от регулярного (ламинарного) движения к хаотическому, определяемый нелинейными процессами, характерен и для др. сред и полей (акустич. полей в твёрдых телах и газах, эл.-магн. полей в плазме и т. п.). Ныне это понятие вошло практически во все области физики и используется по отношению как к вихревым, так и безвихревым (в т. ч. волновым) полям.

Различают слабую, сильную, развитую и нек-рые др. типы Т. Трактовка этих терминов в разл. областях физики несколько различна.

Слабая Т. 1) Т. волновых полей, когда из-за сильной дисперсии волновые пакеты перекрываются на малое время и взаимодействие между волнами оказывается достаточно слабым — справедливо приближение (гипотеза) случайных фаз волн. Пример слабой Т. (в таком понимании) — волнение на поверхности моря без образования барашков. 2) Движение среды (или поля), соответствующее *хаосу динамической системы*, описывающей Т. (или число независимых возбуждённых мод колебаний), при бл.  $\leq 10$ . В простейшем случае — это низкоразмерный временной хаос (примером является *Лоренца система*). В более общем случае — низкоразмерный пространственно-временной хаос (пример — динамика дефектов в *жидких кристаллах*).

Сильная Т. 1) Т. сильнонелинейных волн, в случае, когда не работает приближение случайных фаз и слабой связи гармонических волн. Напр., Т. *ударных волн* в средах со слабой дисперсией (сильная акустич. Т.) либо Т. *солитонов* (в частности, в плазме). 2) Гидродинамич. Т., к-рой соответствует многомерный пространственно-временной хаос. Движения среды не упорядочены во времени и в пространстве, характерно наличие потока энергии от одних пространств. масштабов (масштаб поступления) к другим (масштаб диссипации). Размерность фазового пространства соответствующей динамич. системы (или число независимых возбуждённых мод) при бл.  $\geq 100$ .

Развитая Т. 1) Обычно синоним сильной Т. 2) Иногда развитой наз. установившуюся Т., в отличие от неустановившейся (переходной) Т.

**Переход к турбулентности.** Система переходит от упорядоченного пространственно-временного поведения к турбулентному при увеличении степени её неравновесности, к-рую можно характеризовать т. н. управляющим параметром (или параметрами) — *Рейнольдса числом* или его аналогами. Значения управляющего параметра, при к-рых один тип движения системы теряет устойчивость и на смену ему приходит другой, наз. критическими. Переход к Т. может происходить как скачкообразно (регулярное движение сразу сменяется турбулентным), так и в результате цепочки последовательных усложнений движения. При этом возможны ситуации, когда временное поведение поля темп.-ры, скорости, давления или др. характеристик среды становится хаотическим при сохранении регулярной пространств. структуры. Хотя такой режим

обычно Т. не называют, он обладает одним из основных её свойств — невоспроизводимостью движения при сколь угодно точном задании начальных и граничных условий.

Наиб. подробно исследованы переходы в течениях, ограниченных твёрдыми стенками, благодаря к-рым внешние неконтролируемые воздействия могут быть сведены к минимуму. Примером является течение жидкости, возникающее между двумя вращающимися с разными скоростями соосными цилиндрами (т. н. течение Тейлора — Куэтта). На рис. 1 представлены зависимости осн. частот  $\omega$  пульсаций радиальной скорости от числа Рейнольдса  $Re$ , а на рис. 2 — фотографии вихрей, наблюдавшихся при переходе к хаотическому режиму в течении Тейлора — Куэтта при  $r_1/r_2 = 0,877$  [ $Re = \Omega r_1 (r_2 - r_1) / \nu$ ;  $\Omega$  — угл. скорость вращения внутр. цилиндра, внешний — неподвижен;  $r_1, r_2$  — радиусы внутр. и внеш. цилиндров;  $\nu$  — коэф. кинематич. вязкости]. При увеличении числа Рейнольдса наблюдалась следующая последовательность режимов (диапазоны чисел Рейнольдса обозначены соответствующими номерами на рис. 1). 1. Азимутальное (т. е. с линиями

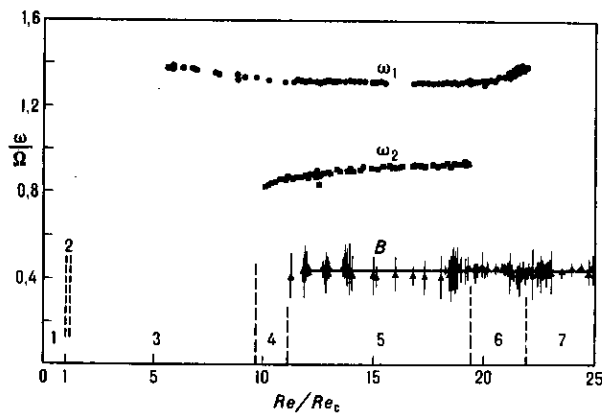


Рис. 1. Основные режимы течения Тейлора — Куэтта при переходе к турбулентности ( $Re_c \approx 119$ ). Представлены основные частотные компоненты (гармоники не показаны), наблюдаемые в спектре радиальной составляющей скорости. Треугольники и вертикальные отрезки определяют центральные частоты  $B$  и ширину сплошного спектра соответственно (P. R. Fenstermacher, H. L. Swinney, J. P. Gollub, 1979).

тока, образующими окружности с центрами на оси цилиндров) стационарное течение. 2. Стационарное течение в виде тороидальных вихрей — т. н. вихрей Тейлора (рис. 2, а). 3. Вихри Тейлора с волнообразными возмущениями на них, распространяющимися в азимутальном направлении, — азимутальные волны (рис. 2, б). Пульсации скорости, измеренные в одной точке, — периодические с основной частотой  $\omega_1$  и её гармониками. 4. Модулированные волны на вихрях Тейлора (рис. 2, в). В спектре пульсаций появляется вторая независимая частота  $\omega_2$  — квазипериодич. режим. 5. Хаотическое движение на фоне квазипериодического. В спектре возникает широкополосная компонента  $B$  с центр. частотой  $\sim \omega_1/3$ . 6. Исчезает дискретная компонента  $\omega_2$ . 7. Из спектра исчезает вторая дискретная компонента. Движение становится полностью хаотическим. Существенно, что при этом пространств. структура течения остаётся регулярной, достаточно простой и представляет собой суперпозицию всего лишь неск. мод (рис. 2, з). Их число не изменяется при переходах от одного режима к другому (в частности, и к хаотическому). Для таких переходов — от простой временной динамики к сложной — справедливы результаты теории конечномерных систем, что подтверждается совпадением результатов теории и эксперимента, а сами переходы эквивалентны известным *бифуркациям* в системах с сосредоточенными параметрами.

Подобным образом происходит переход к Т. в подогреваемом снизу тонком горизонтальном слое (т. н. кон-