

действии ветровых нагрузок на строительные конструкции, Эйфель построил в Париже аэродинамическую трубу. «Продувая» в ней сферы, он обнаружил парадокс, названный впоследствии его именем: вблизи «критического» числа Рейнольдса  $Re \approx 150000$  сила сопротивления сферы резко (в 4–5 раз) уменьшается с увеличением скорости. Этот факт противоречит нашему физическому опыту.

Представим аэродинамическую силу лобового сопротивления в виде

$$F = C_x(Re) \frac{\rho u_\infty^2}{2} \frac{\pi l^2}{4}.$$

Пропорциональность  $F \sim \rho u_\infty^2 l^2$ , где  $\rho$  — плотность,  $u_\infty$  — скорость невозмущенного набегающего потока, а  $l$  — характерный размер тела, легко получить из соображений размерностей (проверьте!). А коэффициенты  $1/2$ ,  $\pi/4$ ,  $C_x$  записаны для удобства. Безразмерный коэффициент сопротивления  $C_x$  можно определить из экспериментов. Он обычно убывает с ростом числа  $Re$ , т.е. с уменьшением сил вязкого трения.

Парадокс Эйлера обнаружен не только при обтекании сферы, но и при обтекании других тел. На рисунке 4 представлена полученная экспериментально зависимость  $C_x(Re)$

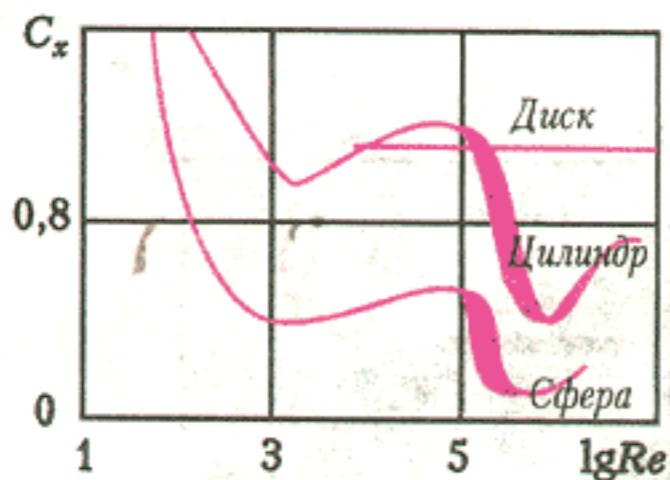


Рис. 4

для сферы, кругового цилиндра и диска, при этом тела имеют один и тот же диаметр  $l$ . На участке резкого изменения  $C_x$  для сферы и цилиндра наблюдается разброс экспериментальных данных, показанный на рисунке «дорожкой». Коэффициент сопротивления диска практически постоянен — для тел с острыми кромками парадокс Эйлера не справедлив. Объяснение парадокса заключается в том, что вблизи критического значения числа Рейнольдса происходит переход от плавного, стационарного течения, называемого ламинарным, к нестационарному,

хаотическому движению, называемому турбулентным. Малое изменение  $Re$  приводит к большой перестройке течения.

Такая ситуация, когда малое изменение какого-либо параметра приводит к коренному изменению течения, типична для гидродинамики. Именно она объясняет многочисленные парадоксы расходимости опытных данных — проведенные при, казалось бы, одних и тех же условиях измерения оказываются совершенно различными. Поэтому при моделировании обтекания тел в аэрогидродинамических трубах следует учитывать влияние стенок трубы, поддерживающих модель устройств, неоднородностей в набегающем потоке, физико-химических свойств поверхности модели (шероховатость, смазываемость, теплопроводность). Сделать это чрезвычайно трудно, если не сказать — невозможно.

### Парадокс Дюбуа

Одним из основателей экспериментальной гидродинамики был французский военный инженер П. Дюбуа (1734–1809). В предисловии к своему классическому трехтомному труду «Принципы гидравлики» он писал: «Мы рассматриваем сопротивление воды и воздуха совершенно новым способом, не пользуясь вовсе прежней теорией, которая оказалась столько раз противоречащей опыту, и стараясь отыскать в опытах, до нас не имевшихся, новые точки зрения на предмет».

Исследования Дюбуа показали, что сила сопротивления, действующая со стороны потока на *покоящееся* в трубе тело, в определенном диапазоне чисел  $Re$  меньше, чем сила сопротивления, действующая на *движущееся* с той же скоростью тело в покоящейся воде. В соответствии с принципом относительности, результат не должен зависеть от того, движется ли тело в покоящейся жидкости или жидкость обтекает покоящееся тело. Как же объяснить парадокс Дюбуа?

Конечно, влиянием тех факторов, о которых уже упоминалось. Поток в опытном бассейне или в аэродинамической трубе более неравномерен, чем в «спокойном» море или атмосфере, поэтому переход к турбулентному режиму здесь наступает раньше, т.е. при докритических значе-

ниях  $Re$ , след за телом сужается, сопротивление падает. Парадокс Дюбуа не утратил своей актуальности и в наше время. Различие между результатами трубного эксперимента и натурального, проводимого в условиях реального полета, остается для гидродинамиков проблемой номер один.

Путь к истине слишком сложен — об этом предупреждают нас философы. Может быть, с излишней долей пессимизма, но вот что говорил свыше трех столетий назад выдающийся французский физик и философ Б. Паскаль (1623–1662): «Истина — слишком тонкая материя, а наши инструменты слишком тупы, чтобы ими можно было прикоснуться к истине, не повредив ее. Достигнув истины, они сминают ее и отклоняются в сторону, скорее ложную, нежели истинную».

Если вы видели когда-нибудь вертолет на стоянке, то должны были заметить, как низко, почти на метр, свисают его лопасти. Лишь в полете они распрямляются. Точно так же крыло самолета под действием аэродинамических сил изменяет в полете свою форму. Изменяет незначительно, а результаты скрупулезных (и дорогих!) экспериментальных исследований оказываются совсем неверными. Таким образом, для объяснения несоответствия между результатами трубного и натурального экспериментов приходится учитывать, кроме всего прочего, упругие свойства конструкций, подверженных действию гидродинамических сил.

### Парадокс Эйлера—Даламбера

Подошло время сказать о парадоксах третьего типа. Кроме парадоксов типа «теория—теория» и «опыт—опыт», существуют еще парадоксы типа «теория—опыт» (или «опыт—теория»). Для них характерно резкое противоречие между теоретическими результатами и тем, что мы называем опытом, интуицией или просто «здравым смыслом».

Самый известный из парадоксов типа «теория—опыт» — это парадокс Эйлера—Даламбера. В 1742 году петербургский академик Л. Эйлер рассчитал сопротивление цилиндра, движущегося в жидкости, лишенной трения, и получил удивительный ре-