

О ТУРБУЛЕНТНОСТИ

... задайте любому ученому вопрос, какова главная нерешенная проблема гидродинамики, и немедленным ответом будет — турбулентность.

Ф. Сэффмен [1, с.78]

В 1961 г. в Марселе проходил коллоквиум по турбулентности в связи с открытием Института статистических методов турбулентности. Карман в своем выступлении сказал, что когда он, наконец, предстанет перед Создателем, первое, о чем он попросит, будет раскрытие тайн турбулентности.

Г. Моффат [1, с.63]

Какое же физическое явление скрывается за термином "турбулентность", несколько столетий дразнящее воображение и любопытство исследователей и не поддающееся теоретическому описанию?

Дело в том, что поведение реальных жидкостей в массе случаев резко отличается от спокойных слоистых (*ламинарных*) течений вязкой жидкости. Характерной особенностью реальных потоков является накладываемое на среднее течение беспорядочных, хаотических движений жидкости (*пульсаций скорости*) в поперечных и даже попятных направлениях. Можно говорить о бурном темпераменте такого течения [2]. Темперамент ламинарного течения спокойный, как в известной песне Г.С. Сковороды [3]:

А вербочки шумят низко,
Волокут мене до сна.
Тут течет поточек близко;
Видно воду аж до дна.

В турбулентном потоке воду аж до дна не увидишь. К нему подходит вполне метафора, отнесенная М.Ю. Лермонтовым к известной кавказской реке: "И Терек, прыгая как львица с косматой

© Р. Н. Мирошин, 2008

Вступительная лекция к курсу "Теория турбулентности", читавшемуся автором на математико-механическом факультете Ленинградского государственного университета в 1966 – 1992 гг.

Рисунки на с. 218, с. 220 и с. 225 заимствованы из [2].

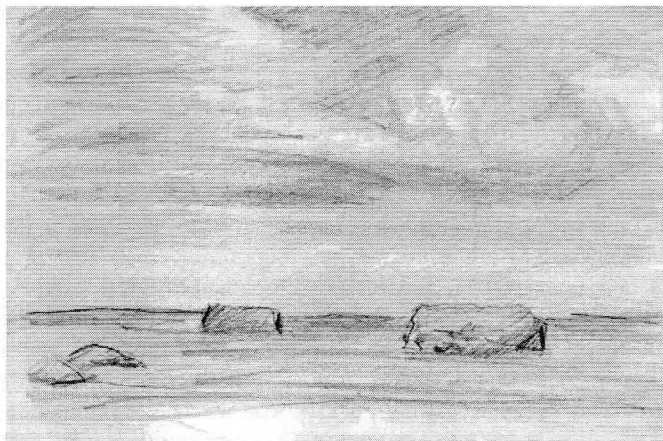
гровкой на хребте, ревел ...". Кто наблюдал бурные мутные горные реки, вполне согласятся с Лермонтовым: бешено несется масса воды, причем частицы воды у поверхности в следующий миг исчезают в ее толще, и эта вода тащит с собой всякий мусор — стволы деревьев, камни, ил и пр. К турбулентным потокам относятся тайфуны: порывы ветра налетают со всех сторон, и сорванная ветром с дома крыша иной раз оказывается отброшенной в сторону, а не по направлению тайфуна. Жителям прибрежных районов это очень хорошо знакомо. Налетающий на парусник шквал рвет паруса по всем направлениям, так что и моряки с давних времен знакомы с турбулентностью. Знакомы ли с ней летчики? О, да! Цитируем часть газетной заметки [4]: 18 июля 1989 г. в Шереметьево-2 приземлился ИЛ-62 без носового обтекателя. Оказывается, при наборе высоты самолет попал в кучевые облака. "Самолет болтало так, что высокий стюарт на очередной воздушной яме осел прямо на пол салона. Ребята сильно перепугались, но в динамиках раздался твердый голос: "Ничего страшного, мы попали в турбулентный поток". Это успокоило всех ... А самолет — "все-навсего" — остался без носового обтекателя". Восхищает в этой истории то, что как только явление назвали, народ успокоился и догадался об избегнутой опасности только при приземлении, увидев встречающие лайнер пожарные машины.

Понятное дело, мало на свете физических явлений, которые люди не использовали бы в своих интересах. То же и турбулентность, причем утилизируются весьма тонкие свойства потоков, объяснение которым получено лишь совсем недавно. Вот несколько примеров.

На средне-русской равнине издавна крестьяне заготавливают на зиму сено, оставляя его в стогах — полуэллипсоидальной формы большой полуосью вверх, диаметром в основании 2-2,5 метра. Вопрос: чем объясняется такая форма? Ответ: уменьшением сопротивления ветру за счет кризиса сопротивления плохо обтекаемых тел (*парадокс Эйфеля*, см. ниже). Аналогичный принцип положен и в конструкцию "иглу" — жилищ эскимосов из прессованного снега в форме части эллипсоида вращения. Этим жилищам не страшны свирепые полярные вьюги. В первых послевоенных полярных станциях в Арктике палатки тоже делались эллипсоидальной формы (они изображены, например, на картине Михаила Канеева в музее Арктики и Антарктики). Однако большие, многотонные массы



сена укладываются в хорошо обтекаемые длинные скирды, ориентированные по преобладающему направлению ветра местной розы ветров. В 1960 г. я наблюдал в Карпатах сплав леса по бешеным



горным рекам¹. Они текут вровень с берегами, а бугры волн даже

¹ В настоящее время этого уже не увидишь. Когда в 80-е годы я обратил-

возвышаются над ними. Лес сплочен в длинные, из ряда секций плоты, занимающие всю ширину реки. Плоты управляются стоящими на носу передней секции гуцулами-плотогонами с помощью длинных вёсел — правил. Ясно, что управлять плотом можно, если только он движется быстрее течения. Вопрос: насколько быстрее? Ответ: до полутора раз скорость плота может превышать скорость течения (*парадокс Прандтля*, см. ниже).

Ещё вопрос: можно ли узнать по форме лодок, под какой температурой течения они рассчитаны? Ответ положительный. Оказывается, в ламинарных водах при небольших скоростях быстрее плоскодонка, сидящая неглубоко в воде; для озёр и спокойных равнинных рек вроде "тихого" Дона характерны суда относительно малого удлинения, а для быстрых рек — челноки удлинённого типа. Это вызвано тем, что хорошо обтекаемые тела в турбулентном потоке опережают течение (до 1,5 раз), а плохо обтекаемые — плывут почти со скоростью течения (тот же парадокс Прандтля, плот — хорошо обтекаемое тело).

Каждый без труда может продолжить этот ряд примеров использования турбулентных потоков. Хотя бы взять наш быт. Помешивая чай в стакане, мы используем более быстрое отделение тепла в турбулентном течении (чай быстрее остывает) и быстрее растворение сахара (благодаря тому, что растворение происходит интенсивнее за счет быстрой смены насыщенных сахаром частиц воды ненасыщенными). То же явление используем, когда помешиваем руками воду в шайке, наполняемой из кранов горячей и холодной воды в бане. Или стараемся разогнать ладонью дым от сигареты, каковым действием быстро уменьшаем концентрацию дыма у своего носа. Ещё на банную тему — вопрос: какой душ быстрее регулируется (т. е. быстрее из смешения горячей и холодной воды становится тёплым, переносимым вашей кожей) — быстрый или медленный? Ответ: разумеется, быстрый, турбулентный, а медленный регулируется очень долго.

В промышленности турбулентность необходимо учитывать в химических реакторах (при турбулентном перемешивании выход продукта увеличивается в разы), при проектировании трубопроводного

ся в Мукачево, чтобы Ленинградскому университету изготовили деревянные части аэродинамической трубы, то получил отказ из-за отсутствия древесины. Мастера — столяры и плотники — зарабатывали на жизнь вахтовым методом в других районах СССР.

транспорта, каналов, судов, летательных аппаратов, даже в металлургии — увеличение скорости проката выводит на турбулентный режим поток воздуха над металлическим листом, что приводит к нежелательному эффекту — быстрому охлаждению прокатываемого листа.

Научное изучение турбулентности началось сравнительно недавно, хотя с самим явлением, как мы убедились человечество знакомо давно. Отсчет научной истории следует вести с момента, когда промышленности потребовалось настоящее решение вопроса о течениях жидкостей в трубах, т. е. с середины девятнадцатого века. В 1839 г. Г. Гаген обнаружил, что при ламинарном течении перепад давления, заставляющий жидкость течь в трубе, пропорционален первой степени скорости, а при турбулентном — почти квадрату скорости (закон Шези)². Понятно, что при увеличении скорости потока отсюда проистекает неприятная необходимость в увеличении (в квадрате!) мощности соответствующих насосов, что резко удорожает производство. Прошло, однако, более сорока лет, пока появилось ясное представление, что же происходит с жидкостью в трубе при увеличении скорости. Именно, в 1883 г. поставил свой классический опыт³ О. Рейнольдс. В его опыте варьировались стеклянные трубки разной длины и диаметра и разные жидкости. Жидкость вытекала из бака по трубке, в центр которой вводилась окрашенная струйка. Пока течение ламинарное, резко очерченная струйка течет по центру параллельно стенкам трубки; когда же течение турбулизируется, эта струйка расплывается и почти равномерно окрашивает всю жидкость в трубке — т. е. на главное движение накладывается поперечное, чем и достигается перемешивание.



² Французский ученый Шези нашел этот закон в 1775 г. Современный вывод см. в [5, с.122].

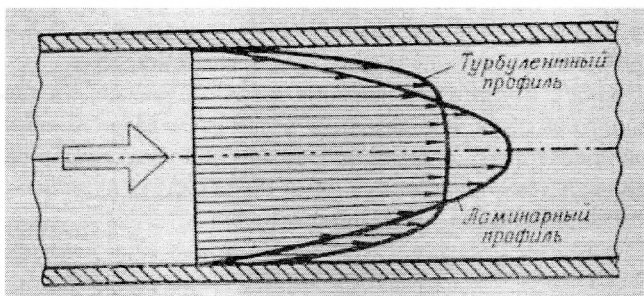
³ "Имея дело с водой, обратиться прежде к опыту, а потом к разуму," — Леонардо да Винчи (цит. по [6, с. 94].)

В аудиторных условиях можно воспроизвести опыт Рейнольдса со струйкой сигаретного дыма. Лучше всего использовать сигареты "Шипка". Видим, что частицы дыма, получая ускорение от более теплого воздуха, поднимаются вверх сначала по прямой (ламинарной траектории), а затем по хаотической траектории, сильно перемешиваясь (см. приводимый нами ниже силуэт курящего В.В. Маяковского работы Е.С. Кругликовой).



В результате перемешивания жидкости в трубе происходит обмен соседних струек импульсом в поперечном направлении, в сторону стенок. В итоге распределение по поперечному сечению трубы средних скоростей получается более равномерным, чем при ламинарном течении (как говорится, профиль скоростей течения *уплощается*). Этим объясняется явление *запирания трубы* при увеличении скорости потока, обнаруженное Гагеном. Именно, так как трение жидкости о стенку равно $\mu \frac{du}{dy}$, где u отсчитывается перпендикулярно стенке, а μ — вязкость жидкости, то вследствие большего градиента $\frac{du}{dy}$ у уплощенного профиля мы и получаем большее трение, а тем самым и больший ламинарного перепад давления на концах трубы, нужный для поддержания течения.

Рейнольдс, наблюдая турбулентный режим, обнаружил, что его самым характерным признаком является наличие неравномерных высокочастотных пульсаций скорости и давления в каждой точке течения. Скорость в фиксированной точке постоянна только в среднем и притом для достаточно больших интервалов времени. Однако пульсирует скорость не отдельных молекул, а целых сгустков, комков жидкости. Пульсации скорости во времени в турбулентном режиме составляют небольшой процент от средней скорости, но именно они оказывают определяющее влияние на всё течение. В этом-то



и состоит трудность, препятствующая созданию теории турбулентности: малые причины порождают колоссальные следствия.

Основной заслугой Рейнольдса было его открытие закона подобия для течений в трубах — открытие числа Рейнольдса. По Рейнольдсу переход ламинарного течения в турбулентное происходит всегда при приблизительно одинаковом значении безразмерного числа

$$Re = \frac{WD}{\nu}, \quad (1)$$

где D — диаметр трубы, $W = Q/F$ — осреднённая по сечению скорость течения, Q — объёмный расход жидкости, F — площадь поперечного сечения трубы, $\nu = \mu/\rho$ — кинематический коэффициент вязкости, ρ — массовая плотность жидкости. Число Re , при котором ламинарное течение переходит в турбулентное, называется *критическим числом Рейнольдса*. В своих опытах Рейнольдс нашёл, что оно равно⁴ [2]

$$Re_0 = 2300. \quad (2)$$

⁴ По предложению Грёбера, безразмерным комплексам — параметрам подобия — с 1921 г. стали присваивать имена ученых, открывших эти параметры, а в качестве обозначений брать две первых буквы фамилии первооткрывателя [7]. В научной литературе США иногда этого соглашения не придерживаются и оставляют в обозначении только первую букву фамилии. В отечественных публикациях исключением является только использование буквы M вместо Ma для числа Маха. Это утвердилось с конца сороковых годов в связи с обнаружением, что приоритет за введение числа Маха нужно оставить русскому подданному Маиевскому, открывшему это число лет на тридцать ранее Маха. Как курьёз следует воспринимать обозначение Ho , введённое К.И. Стреховичем для обозначения своего числа гомотетичности [8]. Впоследствии двумя первыми буквами фамилии генерального конструктора стали отмечать типы отечественных самолётов: Ту, Як, Пе, Ла и т. д.

Попытаемся понять интуитивно смысл этого критерия перехода. Тот факт, что возникновение турбулентности прямо пропорционально скорости, очевидно для нас из наблюдений за реками и ветрами. Влияние вязкости мы почувствуем, если сравним усилия, которые тратим на размешивание чая и на размешивание мёда (и тем более расплавленного битума) до одной и той же скорости, — чем вязче жидкость, тем труднее перейти к турбулентности, т. е. зависимость от μ обратно пропорциональная. Роль плотности легко установить, сравнив усилия для турбулизации в воде и воздухе (прямо пропорциональная зависимость). Сложнее обстоит дело с характерным размером, за который в трубе берется её диаметр D . Дело в том, что в настоящее время характерный размер в научной литературе вводится произвольно в зависимости от желаний исследователя и его заученных в школах привычек, т. е. через D входит в критерий Рейнольдса субъективный фактор. Положение здесь напоминает ситуацию до введения стандартов в промышленности, когда каждый инженер определял размер болтов и гаек, не обращая внимания на коллег. Без стандартов на D критические числа Рейнольдса так же имеют большой разброс.

Вернемся к течению в трубе и зададимся вопросом, какова должна быть максимальная скорость жидкости в трубе диаметром полметра (т. е. $D = 0,5$ м), чтобы течение в ней можно было бы считать ламинарным? Это очень важный вопрос не только для промышленности, но и для экспериментальной аэродинамики, ведь, как известно, эксперименты с влиянием потока на летательные аппараты, здания и сооружения и пр. проводятся на моделях в аэродинамических трубах. Начнем с воды при 15°C . Для неё $\nu = 0,1145 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. По Рейнольдсу критическое число равно 2300. Тогда по формуле (1) мы имеем для максимальной скорости

$$W = \frac{Re_0 \nu}{D} = \frac{2300 \cdot 0,1145}{0,5 \cdot 10^5} \approx 0,0053 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (3)$$

т. е. скорость ламинарного потока в такой трубе не может превышать 5 миллиметров в секунду. Возьмём теперь в качестве рабочего тела в трубе того же диаметра воздух. Для него $\nu = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Расчет по формуле (3) показывает, что скорость ламинарного потока не может превышать $0,067 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, т. е. меньше 7 сантиметров в секунду.

Из этого примера вытекает следующая мораль: построить собственнo ламинарную аэродинамическую трубу для практических

нужд (т. е. размеров порядка метров и со скоростями не менее метров в секунду)— невозможно. Вопрос решается иначе: под ламинарными трубами понимаются трубы малотурбулентные, в которых минимизируют средний квадрат (дисперсию) пульсаций скорости. Именно, из-за турбулентности в трубе в каждой точке потока скорость имеет вид $\vec{v} = \vec{U} + \vec{u}$, где $\vec{U}$ — средняя скорость в трубе, а $\vec{u}$ — турбулентная пульсация (случайная величина). В ламинарных трубах минимизируется безразмерный параметр

$$\epsilon = \frac{\sqrt{M\{|\vec{u}|^2\}}}{|\vec{U}|} 100\%, \quad (4)$$

называемый *степенью турбулентности* данной трубы. Здесь символом $M\{A\}$ мы обозначили математическое ожидание случайной величины A . В обычных аэродинамических трубах $\epsilon \sim 0,4 \div 0,6\%$, а в малотурбулентных $\epsilon \sim 0,02 \div 0,03\%$. Правда, эта минимизация достигается увеличением расходов на изготовление трубы раз в десять, так что такие трубы в мире насчитываются единицами.

Зная о существовании критического числа Рейнольдса, мы уже можем ориентироваться в большом круге задач, связанных с турбулентностью. Например, спросим себя, при каких режимах летают насекомые и птицы? Начнем с насекомых. Чтобы использовать критическое значение (2), полученное Рейнольдсом для труб, будем опираться на следующий экспериментально установленный факт. При экспериментах в аэродинамической трубе площадь максимального поперечного сечения исследуемой модели не должна превышать в поперечнике 5% от площади поперечного сечения трубы, чтобы исключить влияние границ потока. Поэтому в качестве характерного размера D мы будем брать диаметр соответствующей трубы, рассчитанной по поперечнику насекомого или птицы.

Вычислим максимальную скорость обыкновенной мухи (*Phormia regina*). Хрупкость крылышек мухи не позволяет ей летать в турбулентных потоках. Это мы знаем из житейского опыта, ведь экологически чистый принцип борьбы с мухами в помещении — завесить окна, оставить дверь открытой и, размахивая полотенцами, создать турбулентный поток в сторону двери. Муха этого не любит и улетает на свет от греха подальше.

При расчете максимальной скорости мухи (а она определяется максимально доступным для мухи числом Рейнольдса, т. е. критическим) используем формулу (3) и значение Re_0 (2). Максимальный

диаметр мухи $D_0 = 0,5$ см, так что 5% поперечника необходимой трубы равны $\pi D_0^2/4 = 0,25\pi/4$ см², а сама труба имеет площадь поперечного сечения $\pi D^2/4 = (\pi D_0^2/4)/0,05$, т. е. $D \approx 0,0224$ м. По формуле (3)

$$v_{\max} = \frac{Re_0\nu}{D} = \frac{2300 \cdot 1,45 \cdot 10^{-5}}{0,0224} \approx 1,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (5)$$

Согласно [9], экспериментально определенная скорость мухи в природе 2 м/с, в лабораторных условиях 0,6 м/с. Теоретически найденное значение (5) вполне с этими данными согласуется (в природе степень турбулентности 0,02%, поэтому и скорость выше, так как выше критическое число Рейнольдса). Размеры насекомых мало отличаются друг от друга, и потому можем заключить, что они летают при ламинарных режимах, и для изучения их полета надо строить ламинарные трубы и использовать ламинарные гидродинамические модели.

То же можем сказать и о птицах. Их размеры определяются тем, что они летают в ламинарных потоках. Чемпионы по скорости среди птиц — ласточки и стрижи — маленьких размеров. Огромные хищники — орлы и коршуны — летают медленно, а максимальной скорости достигают в пике за наземной добычей, когда собираются в комок.

Таким образом, летательные аппараты, основанные на принципах полета насекомых и птиц, неизбежно должны быть сравнимых с этими животными размерами.

Иное мы наблюдаем у морских животных — дельфинов и крупных рыб. В Англии в Кенсингтонском музее демонстрируется кусок деревянной обшивки корабля с картонной прокладкой, на которую набита медная обшивка, и всё это насквозь пробито рострумом меч-рыбы (он составляет треть длины рыбы). Академик А.Н. Крылов вычислил, что при таком ударе меч-рыба плыла со скоростью около ста километров в час [2]. На самом деле это её ещё средняя скорость, а максимальная — 130 км в час. В нижеследующей таблице мы приводим данные о максимальной скорости v (в км в час), поперечнике D_0 (в метрах), длине L (в метрах) и мощности N буксировочного устройства (в лошадиных силах), при которой достигается данная скорость при буксировке замороженного животного в канале.

животное	v	D_0	L	N
дельфин, акула	65	0,5	2	100
тунец	90	0,5	3	100
меч-рыба	130	0,5	3	200

Как видим, меч-рыба — абсолютный чемпион. Она — предельно скоростной ⁵ гидробионт. Для сравнения приведём данные торпеды Мк48мод1 (США): $v = 102$ км/час, $D_0 = 0,533$ м, $L = 5,8 \div 6,2$ м. У дельфина мышцы (силовая установка) занимают 33% массы тела, у рыб — $30 \div 67\%$ [10]. Кроме того, у дельфина мощность в $7 \div 10$ раз меньше, чем при буксировке, — в этом загадка плавания дельфина.

Найдем порядок максимальных чисел Рейнольдса, которых достигают в плавании упомянутые животные. Пересчитывать на трубу, как в примере с мухой, не будем, поскольку и в расчете числа Re с характерным размером D_0 (т. е. по поперечнику животного) мы получаем закритические значения. Для определённости возьмём пресную воду при $15^\circ C$ (на порядках величин это мало сказывается).

Для меч-рыбы по формуле (1) имеем

$$Re_{\max} = \frac{0,5 \cdot 130000}{3600 \cdot 0,1145 \cdot 10^{-5}} \approx 16 \cdot 10^6,$$

а для дельфина $Re_{\max} = 8 \cdot 10^6$, для тунца $Re_{\max} = 11 \cdot 10^6$, т. е. изучать этих животных с помощью ламинарных моделей бессмысленно — они явно используют турбулентный режим. Более того, меч-рыба и акула живут только в движении. У акулы даже нет плавательного пузыря: если она остановится, то тут же утонет⁶. А меч-рыба в неволе вообще не может жить. Для плавания в турбулентных водах у этих животных есть ряд приспособлений, часть из которых ещё не исследована, а о некоторых скажем ниже.

Перейдём к влиянию турбулентности на гидродинамическое сопротивление обтекаемых тел. Эйфель⁷ в 1912 г.⁸ заметил следу-

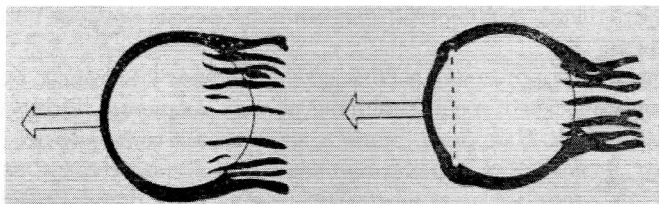
⁵ Скоростными называются такие рыбы, у которых максимальная скорость больше 10 длин тела в секунду; у меч-рыбы $v = 35$ м/с.

⁶ так что не исключена физических оснований шутка К.И. Чуковского в "Бармалее": Испугалась акула и от страха утонула.

⁷ Да-да, тот самый, который сконструировал башню, ставшую символом Парижа.

⁸ Ему тогда было восемьдесят лет!

ющее. В заливе буксир тянул бревно поперёк движения. С возрастанием скорости динамометр сначала показывал увеличение силы сопротивления, а потом вдруг эта сила уменьшилась раза в четыре. Когда скорость сбавляли, сопротивление возрастало до прежней величины. Аналогичная картина впоследствии наблюдалась при обтекании шара и других плохообтекаемых тел в аэродинамической трубе. Такое падение сопротивления получило название *кризиса сопротивления*, а неожиданность этой ситуации поименована *парадоксом Эйфеля*.



Объяснение парадоксу нашёл Прандтль. Он надел на обтекаемый в аэродинамической трубе шар проволоочное кольцо чуть ранее по потоку от его максимального поперечного сечения. Кризис сопротивления получился при меньшей скорости, чем без кольца. Почему? Дело в том, что картина течения вокруг любого тела определяется при больших числах Рейнольдса моделью идеальной жидкости (т. е. жидкости без трения) за исключением узкой зоны у поверхности тела (так называемого *пограничного слоя*, концепцию о котором ввёл в науку также Прандтль). Ламинарный пограничный слой практически не заметен — он нарастает на сантиметр на протяжении сотен метров. При увеличении скорости этот слой на шаре турбулизируется в соответствии с критерием Рейнольдса, но его неизбежный отрыв происходит ниже по потоку, чем ламинарного слоя, из-за того, что в силу турбулентного перемешивания струек жидкости турбулентный пограничный слой при отрыве должен преодолеть противоток к стенкам от внешнего потока. Отрыв происходит в области (она называется *диффузорной*), где поток расширяется, т. е. где скорость меньше и в соответствии с законом Бернулли давление больше. Если бы отрыва погранслоя не было, то обтекание шара происходило как бы в идеальной жидкости, и в силу симметрии картины течения силы давления в носовой и кормовой

частях шара уравнивались бы, так что общее сопротивление отсутствовало бы (*парадокс Даламбера*). Поэтому, чем меньше зона отрыва, т. е. чем дальше точка отрыва пограничного слоя от носика (точки торможения потока), тем ближе картина обтекания к обтеканию идеальной жидкостью и тем меньше сопротивление. Надевание кольца приводит к более ранней турбулизации пограничного слоя.

Кризисом сопротивления объясняется эллипсообразная форма стогов сена и "иглу" эскимосов, шарообразная форма пуль⁹ в ранних гладкоствольных пистолетах и ядер старинных пушек, дробин. Даже голова молот-рыбы напоминает бревно, которое наблюдал Эйфель.

Кризисом сопротивления обладают все тела, у которых вклад гидродинамического трения меньше вклада давления. Это плохо обтекаемые тела. Напротив, те тела, на которых силы трения преобладают, называются хорошо обтекаемыми. В таких телах ламинарный пограничный слой не отрывается на всём протяжении тела, за исключением области кормы. Вклад ламинарного пограничного слоя в силу трения значительно меньше вклада турбулентного, что поясняет следующая табличка, в которой приведено отношение сопротивлений от турбулентного и ламинарного пограничного слоя на пластинке, параллельной потоку, в зависимости от числа Рейнольдса:

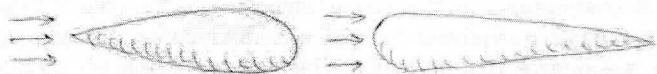
Re	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9
C_t/C_l	1,71	3,36	7,15	16,03	37,04,

Таким образом, сопротивление трения турбулентного пограничного слоя может увеличиваться в десятки раз¹⁰ в сравнении с ламинарным. Поэтому, чем меньше участок тела с турбулентным трением, тем меньше сопротивление хорошо обтекаемого тела. К таким телам относятся пластинка (или плот) вдоль потока, фюзеляжи и крылья, корпуса ракет и дирижаблей, лодки на быстрых реках, большие скирды сена, ориентированные вдоль преобладающего ветра. У них трение составляет 70–80% от общего сопротивления. На рисунке изображены два тела: хорошо и плохо обтекаемое, — читателю предлагается определить, исходя из сказанного, какое

⁹ С времён средневековья в польском и украинском языках шар и пуля называются одинаково: куля.

¹⁰ из-за того, что dv/dy больше в турбулентном пограничном слое — см. выше.

есть какое.



Этими соображениями руководствуются конструкторы летательных аппаратов и судов, придавая крыльям и корпусам такую форму, чтобы переход к турбулентному погранслою происходил как можно ниже по потоку, т. е. *ламинаризируют* обтекаемое тело. Ламинаризация даёт очень сильный эффект. Например, в воспоминаниях Сталинского наркома авиации А.И. Шахурина [11] сказано, что один экземпляр самолета Ла-7 изготовили с крыльями по ламинаризованному профилю и получили скачок скорости (только за счет геометрии!) в 20 км в час (725 км/час вместо 705).

Меч-рыба и тунец, наоборот, турбулизируют свой пограничный слой, т. е. плавают с турбулентным погранслоем. Аналогично кольцу Прандтля турбулизатором является шероховатый начальный участок на теле тунца и насечки (как на напильнике) на роstrуме меч-рыбы.

Теперь мы можем понять *парадокс Прандтля*. Баржа (или плот), погружённые в турбулентный поток, вытесняют некоторый объём воды. Если бы баржи не было, турбулентная жидкость в её объёме двигалась бы с очень большим сопротивлением вследствие турбулентного перемешивания с окружающей водой. Твёрдая поверхность это исключает — есть только турбулентный погранслой на поверхности, дающий меньшее трение, чем в объёме. Поэтому баржа опережает течение. Такое рассуждение годится лишь для хорошо обтекаемого тела, что подтверждается тем, что вертикальное бревно (топляк) плывёт со скоростью течения. Поэтому и лодки на быстрых реках имеют вид хорошо обтекаемых тел, а экстремалы низвергаются с Ниагарского водопада в (плохо обтекаемой) бочке — в хорошо обтекаемом судне (типа спортивного боба) костей бы не собрали (бочка плывёт со скоростью падения воды, боб — в полтора раза быстрее).

Другой важный в теории турбулентности параметр — степень турбулентности ϵ потока. Ещё Рейнольдс заметил, что критическое число Re_0 можно значительно увеличить, если подавать в трубу воду более спокойную, с меньшей начальной степенью турбулентности. В сочетании с отсутствием шероховатости стенок (третий важный параметр турбулентности) и сглаживанием входа в трубу удалось увеличить Re_0 до 80000. Очень чувствительно к ϵ сопротивление шара: с увеличением ϵ число Re , при котором происходит кризис сопротивления, уменьшается, т. е. падение сопротивления достигается при меньшей скорости. Этим объясняется *парадокс Дюбуа*: вертикальную палку в спокойной воде (где $\epsilon \approx 0$) мы тащим с большим усилием, чем удерживаем на месте в бегущей воде (где $\epsilon \sim 0$). Каждый знает на собственном опыте, что не может бежать с той же скоростью в озере ($\epsilon = 0$), с какой струится вода ($\epsilon > 0$), в которой он способен устоять.

Таким образом, мы познакомились с основными парадоксами (Эйфеля, Прандтля, Дюбуа), отличающими турбулентное течение от ламинарного, и двумя параметрами подобия (Re и ϵ), которые характеризуют роль наблюдателя, реологические и динамические свойства жидкости и начальные условия (ϵ). Что касается параметров, описывающих граничные условия, они пока недостаточно изучены и объединяются общим термином *шероховатость поверхности*. Капли дождя, налипание насекомых и пыли на крыльях самолётов, обрастание ракушками днищ кораблей — всё это разные типы паразитной шероховатости, ухудшающие аэродинамику, увеличивая сопротивление. Но шероховатость может играть и положительную роль — как, например, у скоростных морских животных. Интересный исторический факт такого использования шероховатости: при освобождении Муссолини гитлеровскому диверсантау Скорцени понадобилось посадить планеры с группами диверсантов на горе на площадку около 50 м длиной перед гостиницей, где под охраной карабинеров содержался арестованный дуче. Для увеличения силы торможения низ планеров был обёрнут колючей проволокой [12].

Как мы теперь знаем, при малых числах Рейнольдса жидкость течёт ламинарно, а при увеличении Re проявляет своеобразие и при неизменных начальных и граничных условиях ведёт себя совершенно непредсказуемо, хаотически, — она турбулизуется. Теория такого явления должна дать ответы на следующие четыре вопроса.

1. Почему ламинарное течение не может существовать реально при всех числах Рейнольдса?

Ответом на этот вопрос занимается теория гидродинамической устойчивости, построение которой в основных чертах завершено.

2. Каков сценарий перехода к турбулентному режиму?

3. Откуда берётся стохастичность, непредсказуемость характеристик турбулентного режима?

Ответы на второй и третий вопросы учёный мир надеется получить с помощью так называемой *нелинейной динамики* со своими *странными аттракторами* [13]. Хотя эта ветвь математики развивается сейчас очень интенсивно, но успехи в описании конкретных течений пока довольно скромны.

4. Как количественно описывать турбулентные режимы?

На этот вопрос отвечают два вида теорий — полуэмпирические [14], рассматривающие турбулентную жидкость как жидкость со своей особой реологией (число неизвестных функций остаётся прежним, только они берутся средними по времени или пространству), и статистические [15], в которых данное конкретное течение считается реализацией одного из ансамбля течений с заданным по ансамблю распределением вероятностей (т. е. к собственно гидродинамическим параметрам добавляются ещё стохастические — корреляционные функции, конечномерные плотности распределения и т. д.). Математический аппарат первого вида теорий традиционный для гидродинамики, а второго вида — теория случайных функций и полей. Оба типа теорий имеют одну и ту же нерешённую проблему — проблему замыкания (число неизвестных должно совпадать с числом уравнений).

В курсе освещается современное состояние ответов на все эти вопросы.

Указатель литературы

1. Современная гидродинамика (Сб. статей). М.: Мир, 1984.
2. Кузов Кузо. Мир без форм. М.: Мир, 1976. 248 с.
3. Сковорода Г.С. Літ. твори. Київ: 1972.
4. Горчаков В. Три аварии в небе // газета "Комс. правда", 20 июля 1989 г., с. 4.
5. Спицын И.П., Соколова В.А. Общая и речная гидравлика. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 359 с.
6. Кузнецов Н.Г. Накануне. М.: ВИ, 1969. 376 с.

7. *Gröber H.* Die Grudgesetze der Wärmeleitung und Wärmenderganges. Berlin, 1921.
8. *Страхович К.И.* Термогазодинамика и теория теплообмена (конспект лекций). Ч. 2. Л.: ЛПИ, 1964. 167 с.
9. *Свидерский В.Л.* Полёт насекомого. М.: Наука, 1980. 136 с.
10. *Кокшайский Н.В.* Очерк биологической аэро- и гидродинамики. М.: Наука, 1974. 255 с.
11. *Шахурин А.И.* Крылья победы (изд. 3-е). М.: ИПЛ, 1990. 302 с.
12. Дуче берегли как Гитлера (отрывок из показаний начальника личной охраны Гитлера группенфюрера СС и генерала-лейтенанта полиции Ганса Раттенхубера) // газета "Красная звезда", 10 декабря 1992 г., с. 4.
13. *Мирошин Р.Н.* Случайные процессы и поля. СПб.: НИИХ СПбГУ, 2003. 284 с.
14. *Новожилев В.В., Павловский В.А.* Установившиеся турбулентные течения несжимаемой жидкости. СПб., 1998. 484 с.
15. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Ч.1, 2. М.: Наука, 1967.