

пара при малых давлениях Pr находится в пределах $1,0 \div 1,1$, при больших давлениях и вблизи точки насыщения число Pr увеличивается, приближаясь к 2.

Условия Рейнольдса и Пекле являются не только необходимыми, но и достаточными условиями подобия, т. е. если они выполняются, то в потоках вязкой несжимаемой жидкости будет иметь место динамическое и тепловое подобие. В этом случае будут одинаковы и условия теплоотдачи, т. е. будут одинаковы числа Нуссельта. Но если при обтекании геометрических подобных тел R или Pe , или оба эти числа разные, то будут, вообще говоря, разными и числа Nu . Таким образом, для геометрически подобных тел

$$Nu = f(R, Pe),$$

или

$$Nu = F(R, Pr).$$

Вид этой зависимости различен для разных тел.

§ 5. Полное и частичное подобие. Способы осуществления динамического подобия при испытании моделей

Из теории динамического подобия, изложенной в предыдущих параграфах, следует, что аэродинамические коэффициенты (давления и трения) у двух геометрически подобных тел будут одинаковы, если при движении этих тел в воздушной среде без теплоотдачи одновременно выполняются условия подобия Рейнольдса, Маиевского, Фруда, Струхала и равенство степеней турбулентности, т. е. если

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{VL}{\nu}\right)_I &= \left(\frac{VL}{\nu}\right)_{II}, & \left(\frac{V}{a}\right)_I &= \left(\frac{V}{a}\right)_{II}, \\ \left(\frac{V^2}{gL}\right)_I &= \left(\frac{V^2}{gL}\right)_{II}, & \left(\frac{VT}{L}\right)_I &= \left(\frac{VT}{L}\right)_{II}, & \left(\frac{\sqrt{V^2}}{V}\right)_I &= \left(\frac{\sqrt{V^2}}{V}\right)_{II}. \end{aligned} \right\} (3.20)$$

Теоретически мы имеем в первых трех уравнениях три неизвестные величины, определяющие условия эксперимента: скорость потока, характерный размер модели и одну из физических констант, характеризующих природу среды, т. е. ν или a . Таким образом, можно определить условия эксперимента так, чтобы были выполнены совместно условия подобия Рейнольдса, Фруда и Маиевского. Однако при действительном проведении эксперимента дело обстоит совсем иначе. Натуральные летательные аппараты имеют в настоящее время настолько большие размеры, что экспериментировать приходится, как правило, с моделями, уменьшенными по сравнению с натурой. Если величины, относящиеся к натуральному объекту, отмечать значком 1, а величины, относящиеся к модели, — значком 2, то можно считать, что, как правило, $L_2 < L_1$. Предположим, кроме того, что как экспе-

римент с моделью, так и полет натурального аппарата происходят в одной и той же среде — воздухе — и что, следовательно, с достаточной точностью можно положить $\nu_1 = \nu_2$, $a_1 = a_2$.

Вясним, какие условия накладывает при этом на скорость каждое из первых трех равенств (3.20). Для того чтобы выполнялось правило подобия Рейнольдса, скорости V_1 и V_2 должны удовлетворять условию $V_2 > V_1$, т. е. скорость в эксперименте должна превосходить скорость полета натурального аппарата. Для выполнения правила подобия Фруда необходимо соблюдение неравенства $V_2 < V_1$, и таким образом, скорость в эксперименте должна быть меньше, чем скорость полета натурального аппарата. Наконец, для выполнения правила подобия Маиевского должно быть $V_1 = V_2$, т. е. скорости в натуре и в эксперименте должны быть равны.

Мы видим отсюда, что нельзя выбрать скорость для эксперимента с уменьшенной моделью так, чтобы удовлетворить всем трем правилам подобия, так как они противоречат друг другу. Если бы мы рассмотрели общий случай, когда необходимо учитывать и силы упругости модели, и нестационарность потока, и явления теплопередачи, то тогда и подавно оказалось бы, что нельзя удовлетворить одновременно всем правилам подобия. Итак, *полное подобие, т. е. подобие по всем параметрам* (Рейнольдса, Фруда, Маиевского и др.), *при испытании уменьшенной модели, вообще говоря, невозможно.* Но нет и практической надобности иметь в эксперименте полное подобие с натурой. Дело в том, что не все факторы, для которых мы составили условия подобия, имеют в каждом эксперименте существенное значение. Если, например, эксперимент и полет натурального аппарата происходят при малой скорости (не превышающей 100 м/сек), то сжимаемостью среды можно пренебречь и, следовательно, можно не придерживаться правила Маиевского.

Поэтому на практике обычно стремятся осуществить лишь так называемое *частичное подобие, т. е. подобие по одному или нескольким параметрам, наиболее важным в данном эксперименте.* Таким образом, каждое из правил подобия имеет свою область преимущественного применения.

В аэродинамике малых скоростей основное значение имеет правило подобия Рейнольдса, так как сопротивление среды в этих условиях происходит главным образом от сил трения. Силами тяжести, т. е. влиянием параметра Фруда, при этом можно пренебречь.

Иначе обстоит дело при испытаниях моделей, частично погруженных в воду, например при испытании в гидроканале моделей корпусов кораблей, лодок гидросамолетов, глиссеров и т. д. Кроме явлений, которые имеют место при движении тела внутри жидкости (образование пограничного слоя, вихрей и т. д.), здесь возникают специфические явления, связанные с наличием свободной поверхности воды. Они заключаются в том, что при обтекании передней части тела вода поднимается выше уровня, который она имеет в спокойном

состоянии, за телом — опускается ниже этого уровня (рис. 3.3). Вследствие этого за кормой тела распространяются по поверхности воды волны, которые представляют собой периодические вертикальные движения частиц воды, происходящие под действием силы тяжести. Работа, затрачиваемая на образование волн, представляет собой работу так называемого волнового сопротивления. Так как для моделей судов, лодок, гидросамолетов и т. п. волновое сопротивление составляет весьма значительную долю (25—50%) полного сопротивления (возрастающую с увеличением скорости), то при испытании этих моделей приходится наряду с правилом подобия Рейнольдса



Рис. 3.3. Волны, образующиеся при движении модели по свободной поверхности жидкости.

придерживаться также правила подобия Фруда. Это создает на практике большие затруднения, ибо, как уже указывалось, правила Фруда и Рейнольдса при испытании уменьшенных моделей выдвигают противоречивые требования. Обычно поступают так: определяют по правилу Фруда скорость V_2 , с которой должна двигаться модель в гидроканале:

$$V_2 = V_1 \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$$

(размеры модели определяются размерами гидроканала), и испытывают модель при этой скорости. Из полного сопротивления, измеренного при протаскивании в гидроканале, вычитают затем сопротивление трению, которое можно подсчитать для числа Рейнольдса, при котором проведен эксперимент (способы расчета сопротивления трению будут изложены в дальнейшем). Таким образом, получается коэффициент волнового сопротивления, к которому добавляют затем коэффициент сопротивления трению, соответствующий натуральным числам Рейнольдса (он также определяется расчетом).

При испытании моделей в потоке, скорость которого близка к скорости распространения звука или больше ее, основным является правило подобия Маиевского. Сопротивление здесь определяется в значительной своей части сжимаемостью среды.

При изучении вибраций крыльев в потоке или вибраций воздушных винтов модели изготавливаются таким образом, чтобы выполнялось правило подобия Коши; при испытании устройств, охлаждающих двигатель, руководствуются правилом подобия Нуссельта и т. д. Но, кроме этих правил подобия, следует придерживаться также правила подобия Рейнольдса, которое является, таким образом, правилом подобия с наиболее широкой областью применения в аэродинамике.

Остановимся несколько подробнее на способах приближения числа Рейнольдса в эксперименте к числу Рейнольдса натурального объекта. Натуральные числа Рейнольдса в настоящее время весьма

велики. Возьмем для примера самолет, имеющий на высоте $h=10000$ м максимальную скорость полета, равную 900 км/час (≈ 250 м/сек). В качестве характерной длины при подсчете числа Рейнольдса для самолета обычно принимается некоторая средняя по размаху хорда крыла; пусть в данном случае она будет равна 5 м. Коэффициент кинематической вязкости воздуха для данной высоты равен $3,550 \cdot 10^{-5}$ м²/сек, обратная ему величина $1/\nu$ равна $28\,200$ сек/м². Число Рейнольдса для этого самолета, таким образом, равно

$$R = \frac{VL}{\nu} = 250 \cdot 5 \cdot 28\,200 = 35,25 \cdot 10^6.$$

Испытывая модель самолета при скорости, например, 40 м/сек и полагая $1/\nu = 68\,700$ (на уровне моря, при нормальных лабораторных условиях), будем иметь при масштабе модели $1/20$ число Рейнольдса

$$R = 40 \cdot 0,25 \cdot 68\,700 = 0,687 \cdot 10^6,$$

т. е. приблизительно в 50 раз меньше, нежели в натуре.

Из этого примера видно, что для приближения условий опыта к условиям обтекания натурального объекта необходимо весьма значительное увеличение чисел Рейнольдса опыта. Каковы способы этого увеличения? Из выражения для числа Рейнольдса следует, что этих способов может быть только три: увеличение скорости потока при испытании модели, увеличение линейных размеров модели и уменьшение коэффициента кинематической вязкости среды, в которой производится испытание. Хотя в настоящее время применяются все эти способы, однако не все они равноценны в смысле открываемых ими возможностей.

Первый из способов — увеличение скорости потока — может применяться лишь в весьма ограниченных пределах. Дело в том, что при увеличении скорости потока свыше 100 м/сек становится ощутимым влияние сжимаемости среды. Если скорость натурального летательного аппарата значительно меньше скорости распространения звука, а скорость при испытании модели близка к скорости распространения звука, то будет нарушено правило подобия Маиевского; поэтому пользоваться этим способом при скоростях свыше 100 м/сек можно лишь в том случае, если одновременно с этим соблюдается правило подобия Маиевского, т. е. если имеет место равенство скоростей модели и натурального летательного аппарата (предполагая, что $a_1 = a_2$).

Наиболее широко используется в настоящее время второй способ — увеличение линейных размеров модели, что, естественно, влечет за собой увеличение размеров испытательных установок (аэродинамических труб). В настоящее время во многих странах имеются аэродинамические трубы, в которых можно испытывать небольшие самолеты в натуральную величину; их иногда называют натурными

трубами. Однако увеличение размеров аэродинамических труб почти достигло своего предела, и дальнейший рост чисел Рейнольдса опыта, по-видимому, будет осуществляться лишь в комбинации с другими способами.

Перейдем теперь к третьему из указанных выше способов — увеличению чисел Рейнольдса опыта с помощью уменьшения коэффициента кинематической вязкости ν . Этого уменьшения можно достигнуть двумя путями: экспериментируя в иной жидкости, нежели та, в которой происходит движение натурального объекта, или изменяя условия эксперимента, если среда остается той же, что и для натурального объекта. Если взять, например, в качестве среды для эксперимента воду вместо воздуха, то при прочих равных условиях числа Рейнольдса возрастут в 12,7 раза, ибо

$$\frac{\nu_{\text{возд}}}{\nu_{\text{воды}}} = \frac{1,45 \cdot 10^{-5}}{0,1145 \cdot 10^{-5}} = 12,7.$$

Однако осуществить для воды такую же, как и для воздуха, скорость движения чрезвычайно трудно, так как при скоростях, больших предельной, возможно явление кавитации (т. е. образование разрывов, пустот). Кроме того, достижение для водяного потока таких же скоростей, как и для воздушного, требует затраты мощности во много раз большей, нежели для воздуха. По этим причинам замена в эксперименте воздуха водой или другой жидкостью не применяется. В этом нет и особой необходимости, так как можно в весьма широких пределах изменять коэффициент кинематической вязкости, используя для эксперимента ту же среду, в которой происходит движение натурального объекта, но изменяя условия эксперимента.

Для воды, например, можно достичь значительного уменьшения коэффициента кинематической вязкости (и, следовательно, увеличения чисел Рейнольдса) путем ее подогрева. Так как, например, при температуре $t = 80^\circ \text{C}$ коэффициент кинематической вязкости воды $\nu_{80^\circ} = 0,0036 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сек}$, то, нагревая воду, находящуюся в обычных условиях ($t = 15^\circ$), до этой температуры, мы будем иметь увеличение чисел Рейнольдса в 3,18 раза, ибо

$$\frac{\nu_{15^\circ}}{\nu_{80^\circ}} = \frac{0,1145 \cdot 10^{-5}}{0,0036 \cdot 10^{-5}} = 3,18.$$

При экспериментах в воздухе используют другое обстоятельство. Как уже указывалось выше, для газов коэффициент вязкости μ почти не зависит от давления (по крайней мере, при небольших давлениях), тогда как плотность ρ может изменяться в весьма широких пределах при изменении давления. Таким образом, $\nu = \mu/\rho$ также изменяется в зависимости от изменения давления; в частности, для того чтобы уменьшить ν , следует экспериментировать в условиях повышенной плотности, т. е. со сжатым воздухом. В аэродинамических трубах, работающих на сжатом воздухе (или трубах переменной

плотности, как их иначе называют), могут быть не только достигнуты, но и превзойдены натуральные числа Рейнольдса. Поэтому, несмотря на ряд трудностей, которые связаны с экспериментированием в сжатом воздухе, трубы переменной плотности находят себе все более широкое применение. Путем испытания моделей в этих трубах уже получен ряд ценных сведений об изменении аэродинамических коэффициентов при изменении числа Рейнольдса, которые используются при проектировании самолетов.

Трубы переменной плотности обладают еще одним весьма важным свойством. В них может быть достигнуто *подобие модели и природы одновременно по числам R и M*. В самом деле, при одинаковой температуре в потоках, обтекающих модель и натуральный объект, имеет место равенство

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_2}{\rho_2},$$

откуда следует

$$a_1 = a_2.$$

По правилу Маиевского получаем, что в этом случае должно быть

$$V_1 = V_2.$$

Таким образом, скорость потока в трубе определяется правилом Маиевского. Правило подобия Рейнольдса теперь можно переписать в таком виде:

$$\frac{\rho_1 L_1}{\mu_1} = \frac{\rho_2 L_2}{\mu_2}.$$

Так как можно считать, что $\mu_1 = \mu_2$, то из последнего равенства вытекает

$$\rho_1 L_1 = \rho_2 L_2,$$

или, переходя от плотностей к давлениям, получаем:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{L_2}{L_1}.$$

Таким образом, для соблюдения в трубе переменной плотности правила подобия Рейнольдса одновременно с правилом подобия Маиевского, необходимо, чтобы давление было во столько раз больше атмосферного, во сколько размеры натурального объекта больше сходственных размеров модели. Если, например, модель выполнена в $\frac{1}{15}$ натуральной величины, то давление при эксперименте должно быть равно 15 атм.

Однако во многих случаях приходится не выполнять при испытании модели условия подобия Рейнольдса, так как его выполнение связано с очень большой затратой мощности. Речь идет об испытании моделей при больших дозвуковых и при сверхзвуковых скоростях.

Здесь основным правилом подобия является правило подобия Маиевского. Для испытания моделей при больших дозвуковых и сверхзвуковых скоростях строят специальные скоростные трубы, в которых обычно испытываются небольшие по размерам модели, и следовательно, правило подобия Рейнольдса не выполняется, но зато достигается скорость такая же, какая предполагается у натурального объекта.

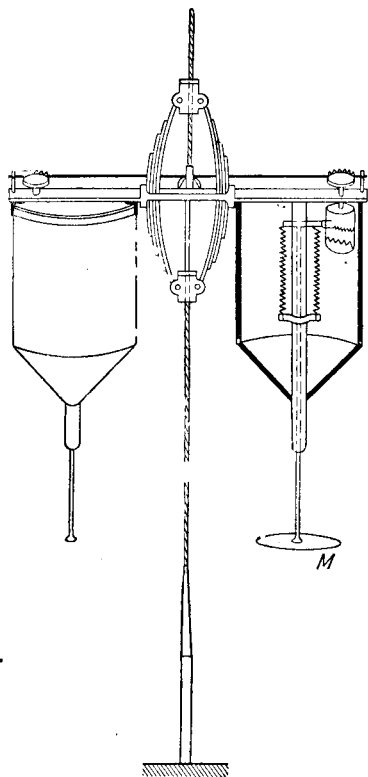


Рис. 3.4. Прибор Эйфеля для измерения сопротивления тела при падении.

многочисленными предшественниками, что испытываемая модель падает не свободно, а скользит по вертикально натянутой проволоке. В нижней части проволоки имеется утолщение, и это в соединении с пружинами рессорного типа, которыми снабжен прибор, позволяет

§ 6. Развитие способов испытания моделей. Аэродинамические трубы малых скоростей¹⁾

Для испытания модели летательного аппарата естественно привести ее в движение в воздушной среде и при этом проводить необходимые наблюдения и измерения. Первоначально так именно и поступали.

Первые по времени эксперименты по определению силы сопротивления производились путем наблюдения над падением тел в воздухе с достаточно большой высоты (Галилей, 1638). Сопротивление определялось при этом по результатам измерения высоты и времени падения. Этот способ был развит Эйфелем (1905). Эйфель сконструировал самозаписывающий прибор, схематично изображенный на рис. 3.4, с помощью которого он измерил сопротивление тела при падении. В способе Эйфеля имеется то преимущество по сравнению с его

¹⁾ Более подробно читатель может познакомиться с техникой аэродинамического эксперимента по книгам:

Горлин С. М. и Слезингер И. И., Аэрогидромеханические измерения, «Наука», 1964.

Пэнкхёрст Р. и Холдер Д., Техника эксперимента в аэродинамических трубах, ИЛ, 1955.

Современное состояние аэродинамики больших скоростей, т. II, под общей редакцией Л. Хоурта, ИЛ, 1956.