

Н. Ф. ГОРШКОВ, А. М. ОБУХОВ

О ГЕНЕРАЦИИ ВИХРЕВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ЭЛЛИПТИЧЕСКОМ ВРАЩЕНИИ ЖИДКОСТИ

Описывается простейший механический способ генерации вихревых возмущений, который может быть использован при модельном изучении атмосферных процессов.

Гидродинамическая неустойчивость играет исключительно важную роль в динамике атмосферы, являясь основой механизма генерации крупномасштабных вихрей, показанных на синоптических картах [1].

Естественно изучать это явление на упрощенных моделях, имеющих сравнительно небольшое число степеней свободы, но учитывающих основные свойства исходной системы [2, 3]. Одним из простейших случаев, в которых удается исследовать не только условия появления неустойчивой ситуации, но и характер возникающих при этом возмущений, является «жидкое вращение» несжимаемой среды в эллиптическом цилиндре конечной длины [4]. Как показывает и расчет и лабораторный эксперимент, при малом значении параметра анизотропии $\varepsilon = \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2}$ (a и b — большая и малая полуоси поперечного сечения) неустойчивость возникает, когда высота цилиндра H близка к кратному значению среднего диаметра $D = \sqrt{2(a^2 + b^2)}$,

$$H = mD. \quad (1)$$

Ширина области неустойчивости по параметру H/D имеет порядок ε . Вязкость при этом предполагается достаточно малой (большие числа Рейнольдса). В зависимости от значения целого числа m могут возбуждаться возмущения одновихревого, двухвихревого или трехвихревого типа (такие возмущения уже наблюдались в эксперименте, теоретически возможны возмущения любой кратности m). Число вихрей легко определяется при визуальном наблюдении прозрачного цилиндра сбоку.

Для промежуточных значений высоты (если, например, $H/D \approx 1,5$ или 2,5) картина явления существенно устойчива и отвечает «эллиптическому вращению» жидкости, описываемому функцией тока:

$$\psi = \omega_0 \left(\frac{b^2 x^2 + a^2 y^2}{a^2 + b^2} \right), \quad \omega = 0. \quad (2)$$

W — скорость вдоль оси цилиндра, ω_0 — угловая скорость вращения жидких частиц.

На рис. 1 приведен пример картины течения, отвечающего возмущению трехвихревого типа. Эта фотография получена на вращающейся импульсной установке (рис. 2) на кафедре физики атмосферы физиче-

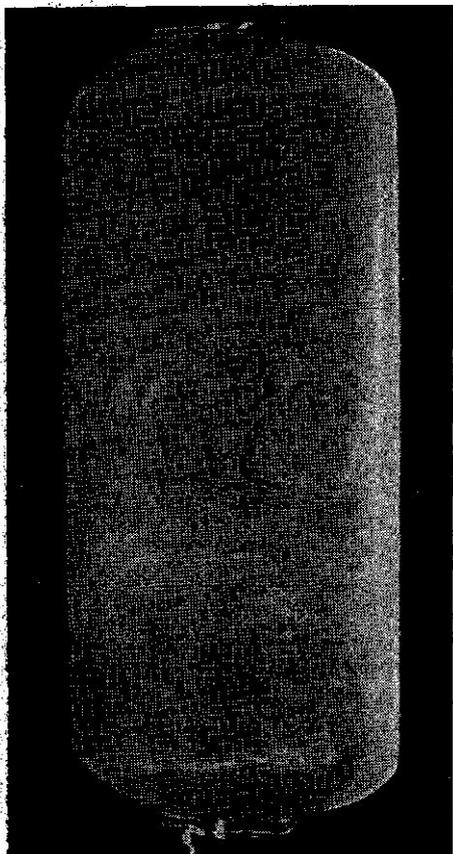


Рис. 1. Трехвихревое возмущение через 1 с после остановки цилиндра

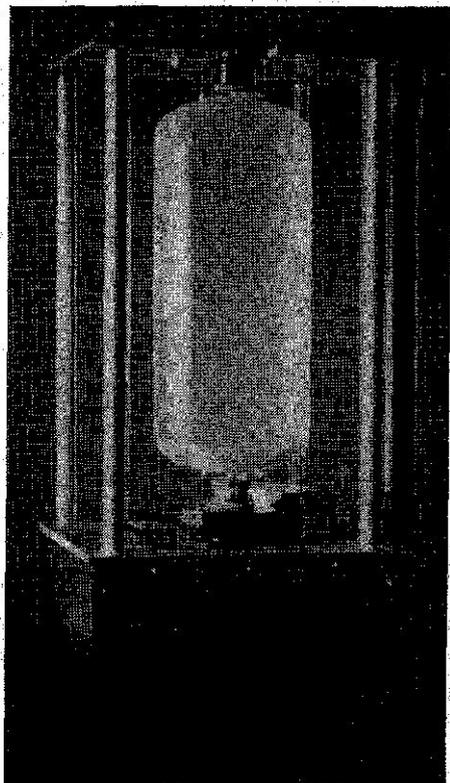


Рис. 2. Установка с вращающимся эллиптическим цилиндром для исследования гидродинамической неустойчивости

ского факультета МГУ. Высота цилиндра, изготовленного из тонкого оргстекла, составляла 27,4 см, а поперечное сечение (эллипс) имело диаметры 12 и 7,5 см. Торцы полости цилиндра имели сглаженную форму, чтобы избежать нежелательных эффектов в углах. Цилиндр заполнялся водой с взвешенными частицами (полистирол) для визуализации. Так же, как и в экспериментах Ю. В. Новикова [5], исходное состояние системы создавалось путем достаточно длительного предварительного вращения модели, так, чтобы жидкость и сосуд вращались как единое твердое тело с угловой скоростью ω_0 . Фактически скорость вращения составляла 2—3 оборота в секунду. После резкой остановки сосуда сейчас же возникает эллиптическое вращение жидкости, указанное выше, характеризуемое осевым компонентом завихренности $\Omega = -2\omega_0$, которое затем в силу неустойчивости порождает возмущение —

«поперечную» моду. Для этой моды вектор вихря почти перпендикулярен оси цилиндра.

На фотографии рис. 1 показана фаза максимального развития возмущения трехвихревого типа, зафиксированная примерно через 1 с после остановки цилиндра, т. е. времени, в течение которого основная мо-

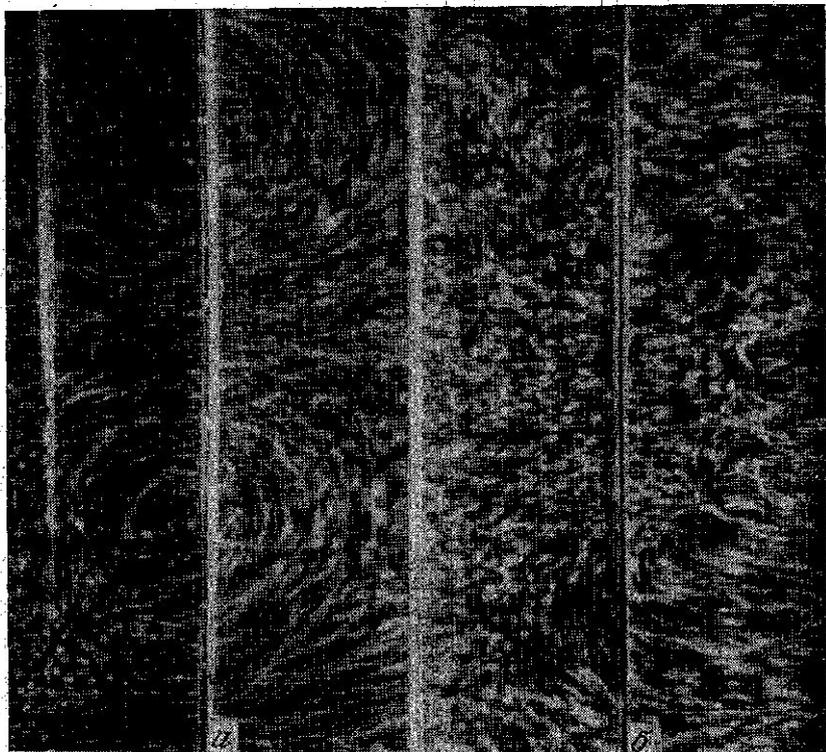


Рис. 3. Поле скоростей для двухвихревого возмущения при стационарном режиме: а — объектив фотоаппарата установлен на уровне середины эллиптического цилиндра (освещение справа сбоку эллиптического цилиндра, видны поперечные стержни, на которых укреплены лопадки); б — объектив фотоаппарата расположен сбоку на уровне нижнего конца цилиндра

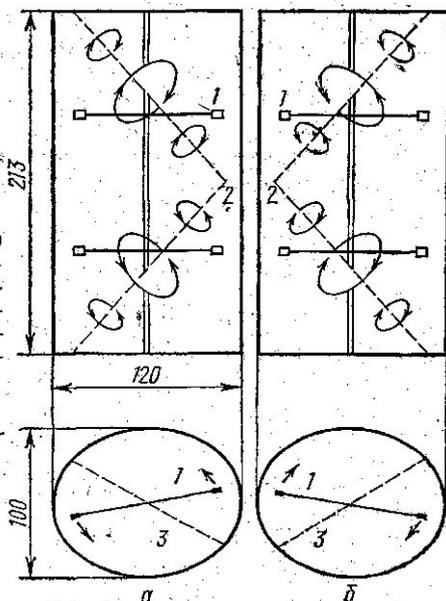
да успевает почти полностью передать свою энергию возмущению. После этого возмущение, лишившись источника питания, начинает быстро затухать и через 3—4 с остается только мелкомасштабный фон (турбулентность).

Естественно возникает мысль, что при непрерывном подводе энергии к основной (неустойчивой) моде можно обеспечить длительное существование возмущения. Для движения жидкости внутри трехосного эллипсоида такое явление впервые было смоделировано Ф. В. Должанским [6] в опытах со ртутью, причем в качестве «привода» использовалось вращающееся магнитное поле. Следует заметить, однако, что применение ртути исключает возможность визуального наблюдения процессов, происходящих внутри среды.

На указанном выше принципе авторами был построен «вихревой генератор», работающий на воде, причем в качестве механизма «накачки» использовалась легкая вращающаяся мешалка. Рабочей камерой

служил прозрачный эллиптический цилиндр высотой 21,3 см и диаметрами 12—10 см, способный возбуждать моду двухвихревого типа на основе эллиптического вращения жидкости вокруг основной оси. Мешалка состояла из 8 небольших лопаток, скрепленных с осью вращения, и приводилась в движение электромотором. После включения привода жидкость в течение долей секунды (скорость вращения лопаток 5—7 об/с) приобретает эллиптическое вращение (основная мода), однако

Рис. 4. Схема течения при генерации двухвихревого возмущения. Показаны 4 из 10 лопаток механической мешалки: *a* — вращение лопаток против часовой стрелки, *b* — вращение лопаток по часовой стрелке, 1 — лопатки, 2 — оси вихрей, 3 — проекция вертикальной плоскости, в которой расположены оси вихрей



примерно через 1 с возбуждается поперечная мода двухвихревого типа. При этом интенсивность основной моды резко снижается, а расход энергии увеличивается, что заметно по изменению режима работы мотора. В течение нескольких секунд система приходит в стационарное состояние, отвечающее суперпозиции двух течений — исходного эллиптического вращения, поддерживаемого внешним источником энергии, и возбужденного благодаря неустойчивости питающей моды «поперечного» компонента (двухвихревого типа).

Энергии обоих компонентов сравнимы, что видно на фотографии (рис. 3), полученной при освещении сосуда через щель в плоскости большого диаметра. Ось вихревого движения в верхней и нижней половине сосуда наклонена к главной оси на угол около $\theta=40^\circ$, $\text{tg } \theta \approx 1$.

Хорошо видны два центра — вихри, характерные для возбуждаемого возмущения, общая картина симметрична относительно плоскости, проходящей через середину главной оси (экватор). Плоскость, в которой располагаются оси верхнего и нижнего вихрей, повернута относительно главного диаметра поперечного сечения на угол $\sim 35^\circ$ против направления вращения мешалки. При изменении направления вращения мешалки (реверс) эта плоскость поворачивается и переходит в зеркальное по отношению к главному диаметру положение. Течение в плоскости, проходящей через оси вихрей (также и через главную ось системы), показано на рис. 3, б, при этом фотографирование проводилось в соответствующем ракурсе с подсветкой вдоль указанной плоскости.

Качественно картина перехода к возбужденному режиму после потери устойчивости исходного состояния выглядит следующим образом:

ось начального эллиптического вращения изламывается посередине в соответствующей «диагональной» плоскости, определяемой направлением вращения мешалки. Крайние точки скользят по крышкам цилиндра и попадают в угол сосуда, а точка излома скользит вдоль экватора и почти выходит на поверхность сосуда. Это может интерпретироваться как согласованное «опрокидывание» исходного течения в верхней и нижней половине сосуда. Такое опрокидывание уже наблюдалось при потере устойчивости в трехосном эллипсоиде в полном соответствии с теорией [5, 6]. На рис. 4 показана общая схема течения в цилиндре, построенная на основе анализа проведенного эксперимента по имеющимся фотографиям.

На первом этапе мы ограничились лишь качественным исследованием описанного выше явления генерации вихревых возмущений. В дальнейшем при планировании более детальных экспериментов аналогичного типа, связанных с измерением основных параметров (количественное моделирование), следует иметь в виду, что роль «привода» в естественной циркуляции в атмосфере выполняет бароклинность (архимедовы силы), обусловленная неравномерностью нагрева среды в гравитационном поле.

В подготовке и проведении эксперимента принимали участие студент физического факультета С. Н. Куличков и сотрудник Института физики атмосферы АН СССР А. М. Касаткин, за что авторы выражают им свою искреннюю благодарность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лоренц Э. К. Природа и теория общей циркуляции атмосферы. М., 1970.
2. Обухов А. М. «Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана», 1971, № 7, 695—704.
3. Должанский Ф. В., Кляцкин В. И., Обухов А. М., Чусов А. М. Нелинейные системы гидродинамического типа. Под ред. А. М. Обухова. М., 1974.
4. Гледзер Е. Б., Должанский Ф. В., Обухов А. М., Пономарев В. М. «Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана», 1975, 11, № 10, 981—992.
5. Гледзер Е. Б., Новиков Ю. В., Обухов А. М., Чусов М. А. «Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана», 1974, 10, № 2, 115—119.
6. Должанский Ф. В. «Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана», 1972, 8, № 6, 661—665.

Поступила в редакцию
26.3 1976 г.

Кафедра
физики атмосферы