

УДК 550.31

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ЯДРА ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ СОСУДЕ, ЗАПОЛНЕННОМ ЖИДКОСТЬЮ

© 2004 г. С. В. Кондратьев, В. Н. Родионов, член-корреспондент РАН Ю. Н. Авсюк

Поступило 10.06.2004 г.

Магнитное поле Земли генерируется движениями в жидкой части земного ядра. Эти движения могут быть связаны с тепловой или гравитационной конвекцией, а также с прецессией осевого вращения Земли. В настоящее время сейсмология и астрометрия располагают информацией о подвижности твердого ядра в окружающем его жидком внешнем ядре [1]. Модельные эксперименты, которым посвящена настоящая работа, могут способствовать уменьшению неопределенностей в выборе характеристик течений в жидком ядре и в оценке устойчивости положения твердого ядра.

Экспериментальные исследования проводились на созданной в ИДГ РАН оригинальной установке для изучения квазистационарных течений во вращающемся объеме жидкости. Установка, оборудованная рядом систем и приспособлений, позволяет вращать сосуд с жидкостью вокруг вертикальной или наклонной оси с заданной угловой скоростью в течение длительного времени. Более подробное описание установки, а также некоторые полученные на ней результаты приведены в [2–4].

В экспериментах использовали изготовленный из оргстекла сферический сосуд с внутренним диаметром 200 мм и толщиной стенок 4 мм. Ко дну сосуда по его оси с помощью специального поводка крепилось жесткое ядро сферической формы диаметром 70 мм с гладкой поверхностью. Конструкция ядра позволяла менять его среднюю плотность ρ без изменения размеров и нарушения осевой симметрии распределения масс. Поводок обеспечивал возможность независимого вращения ядра и свободной ориентации его оси. Длина поводка позволяла центру ядра совпадать с центром сосуда.

Эксперименты проводили в следующем порядке. Ось заполненного жидкостью сосуда с ядром с плотностью ρ отклоняли от вертикали на угол $\alpha = 20^\circ$, после чего включали электропривод. Через каждые 15 мин скорость вращения сосуда f_0

ступенчато увеличивалась (стационарное значение f_0 устанавливается за 5–10 с). Проведены серии экспериментов при различных значениях ρ в диапазоне от 0.63 до 0.98 г/см³. В ходе экспериментов f_0 менялась в пределах от 0.13 до 3.75 об/с. В качестве жидкости использовали дистиллированную воду ($\rho_0 = 1$ г/см³). Схема экспериментов приведена на рис. 1.

На ядро при неподвижном сосуде действуют сила тяжести и архимедова сила, поводок и ось ядра располагаются вертикально (в плоскости рис. 1). При вращении к этим силам присоединяются центробежная сила (направленная к оси вращения, так как $\frac{\rho}{\rho_0} < 1$) и гидродинамическая сила, связанная с обтеканием ядра жидкостью. Их взаимодействие и определяет поведение ядра, регистрируемое в экспериментах с помощью видеосъемки.

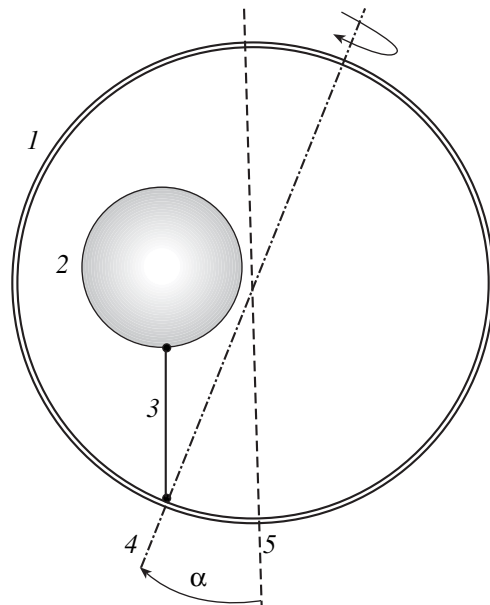


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – сосуд, 2 – ядро, 3 – поводок, 4 – ось вращения сосуда, 5 – вертикаль.

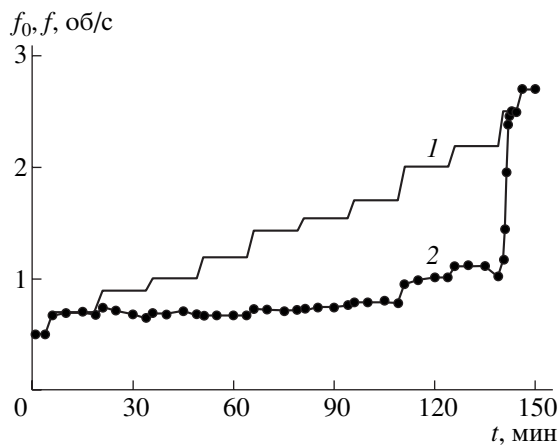


Рис. 2. Зависимость скоростей вращения сосуда (1) и ядра (2) от времени. $\frac{\rho}{\rho_0} = 0.86$, $\alpha = 20^\circ$.

Видеозаписи показали, что через некоторое время после включения электропривода (30–50 с) устанавливается квазистационарный режим течения жидкости. При этом ядро отклоняется от вертикали в направлении вращения (за плоскость рис. 1). Амплитуда отклонения монотонно увеличивается с ростом f_0 . При небольших величинах f_0 , не превосходящих некоторого критического значения f_0^* (зависящего от плотности ядра ρ), скорость вращения ядра вокруг своей оси $f \approx f_0$. Далее, с ростом f_0 в широком диапазоне f меняется слабо, а относительная скорость $\frac{f}{f_0}$ быстро падает. Типичные зависимости приведены на рис. 2 и 3.

Однако, как показал эксперимент, имеется такая критическая скорость вращения сосуда f_0^{**} , существенно зависящая от плотности ядра ρ , при достижении которой происходит кардинальная перестройка режима течения жидкости. За короткое время ядро, меняя свое положение, устанавливается в центре сосуда. При этом угловая скорость ядра резко возрастает, значение $\frac{f}{f_0}$ скачком меняется от 0.4–0.5 до 0.9–1. Экспериментальные значения критических скоростей f_0^* и f_0^{**} приведены на рис. 4.

Отметим, что при уменьшении угла отклонения оси сосуда от вертикали α величина критической скорости f_0^{**} также уменьшается. Снижается и величина скачка $\frac{f}{f_0}$ при достижении f_0^{**} .

Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие выводы:

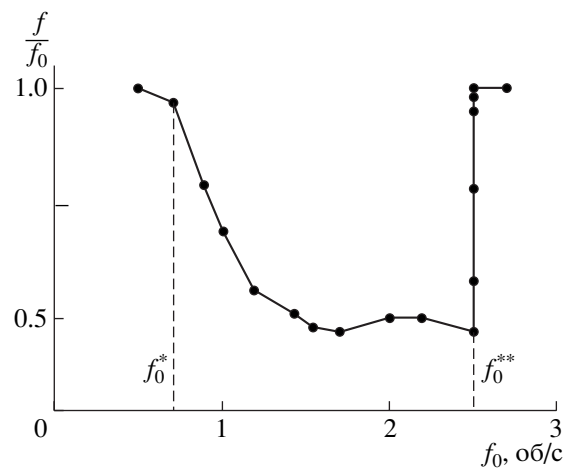


Рис. 3. Относительная скорость вращения ядра. $\frac{\rho}{\rho_0} = 0.86$, $\alpha = 20^\circ$.

твердое ядро, взвешенное в сферическом резервуаре с жидкостью, вращающемся вокруг наклонной оси, может иметь угловую скорость, отличную от угловой скорости резервуара;

рассогласование движений резервуара и взвешенного в нем ядра не может быть реализовано без приложения внешнего силового воздействия (в данном случае без изменения угловой скорости резервуара);

слабое изменение скорости вращения сосуда при зафиксированных других определяющих параметрах (угле наклона оси вращения сосуда, плотности ядра, вязкости жидкости, размерах и форме сосуда и ядра) может привести к скачкообразной перестрой-

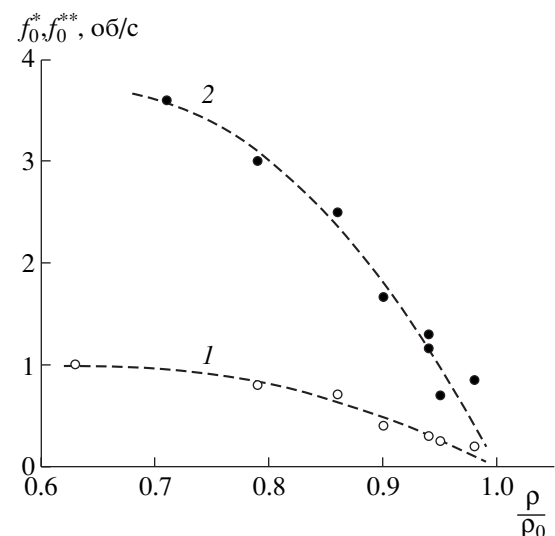


Рис. 4. Влияние плотности ядра на величины критических скоростей. 1 – f_0^* , 2 – f_0^{**} ; $\alpha = 20^\circ$.

ке течения жидкости, сопровождаемой значительным смещением ядра и изменением скорости его вращения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 03–05–64230а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авсюк Ю.Н., Адушкин В.В., Овчинников В.М. // Физика Земли. 2001. № 8. С. 64–75.
2. Авсюк Ю.Н., Кондратьев С.В., Родионов В.Н. В сб.: Динамические процессы в геосферах под действием внешних и внутренних потоков энергии и вещества. М., 1998. С. 109–114.
3. Кондратьев С.В. В сб.: Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках Земли (геофизика сильных возмущений). М., 2002. С. 188–193.
4. Авсюк Ю.Н., Родионов В.Н., Кондратьев С.В. // ДАН. 2003. Т. 390. № 6. С. 822–824.