

ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДОГО ЯДРА ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ОБЪЕМЕ ЖИДКОСТИ

С.В. Кондратьев

Сейсмология и астрометрия располагают информацией о подвижности твердого ядра Земли в окружающем его жидком внешнем ядре. Структура течений, возникающих во вращающемся объеме, зависит от многих факторов и, в общем случае, заранее непредсказуема. Фактические же их особенности можно выявить только экспериментально. В представляемой работе приведены результаты лабораторных экспериментальных исследований течений, возникающих в объеме жидкости во вращающемся сферическом сосуде. Ось вращения сосуда наклонена. Внутри сосуда размещалось взвешенное твердое ядро. Исследовалось поведение ядра в зависимости от его плотности, угловой скорости вращения сосуда и скорости прецессии оси вращения. Движения ядра регистрировались с помощью портативной видеокамеры, установленной на прозрачном сосуде и вращающейся вместе с ним. Особенности течений жидкости выявлялись при впрыскивании во вращающуюся сосуд красящего вещества. Полученные результаты могут быть полезны при разработке ряда геодинамических моделей.

Введение

В настоящее время сейсмология и астрометрия располагают информацией о подвижности твердого ядра Земли в окружающем его жидком внешнем ядре [Авсюк, Адушкин, Овчинников, и др., 2001]. На поведение внутреннего ядра оказывают существенное влияние гравитационные поля собственно земного шара и Луны, а также силы инерции, связанные с вращением Земли вокруг своей оси и вокруг центра масс системы Земля – Луна. Изменения в движении твердого ядра могут изменить характер движения в окружающей жидкой оболочке. При этом, фактические особенности возникающих течений можно установить только экспериментально. Лабораторные эксперименты, которым посвящена настоящая статья, будут способствовать уменьшению неопределенностей в выборе характеристик течений в жидком ядре и в оценке устойчивости положения твердого ядра.

Методика экспериментов

Исследования проводились на созданной в ИДГ РАН экспериментальной установке для изучения течений, возникающих во вращающемся объеме жидкости. Установка позволяет вращать сосуд с жидкостью вокруг вертикальной или наклонной оси с заданной угловой скоростью в течение длительного времени. Имеется возможность задавать прецессию оси вращения сосуда с выбранной угловой скоростью и в выбранном направлении. На резервуаре крепится вращающаяся вместе с ним портативная видеокамера, сигнал от которой выводится на неподвижные монитор и регистратор. Такая методика позволяет с большой точностью выявлять рассогласованные с сосудом движения в жидкости.

В экспериментах в качестве резервуара использовался изготовленный из оргстекла сферический сосуд с внутренним диаметром 200 мм и толщиной стенок 4 мм. Жидкость – дистиллированная вода или водные растворы глицерина.

Нижний конец оси вращения сосуда закреплялся на карданном шарнире, верхний – на «флажке» (детали, обеспечивающие отклонение оси сосуда от вертикали на заданный угол α). Карданный шарнир давал возможность сосуду вращаться вокруг наклонной оси с требуемой угловой скоростью f_0 . Вынужденная прецессия с угловой скоростью $f_{пр.}$ обеспечивалась при вращении «флажки» вокруг вертикальной оси. 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. Схема экспериментов приведена на рис. 1.

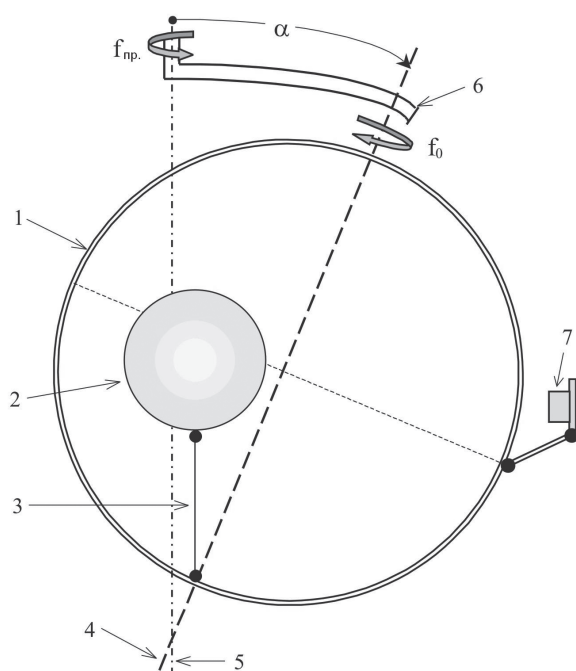


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – сосуд, 2 – ядро, 3 – поводок, 4 – ось вращения сосуда, 5 – вертикаль (ось прецессии), 6 – «флажок», 7 – видеокамера.

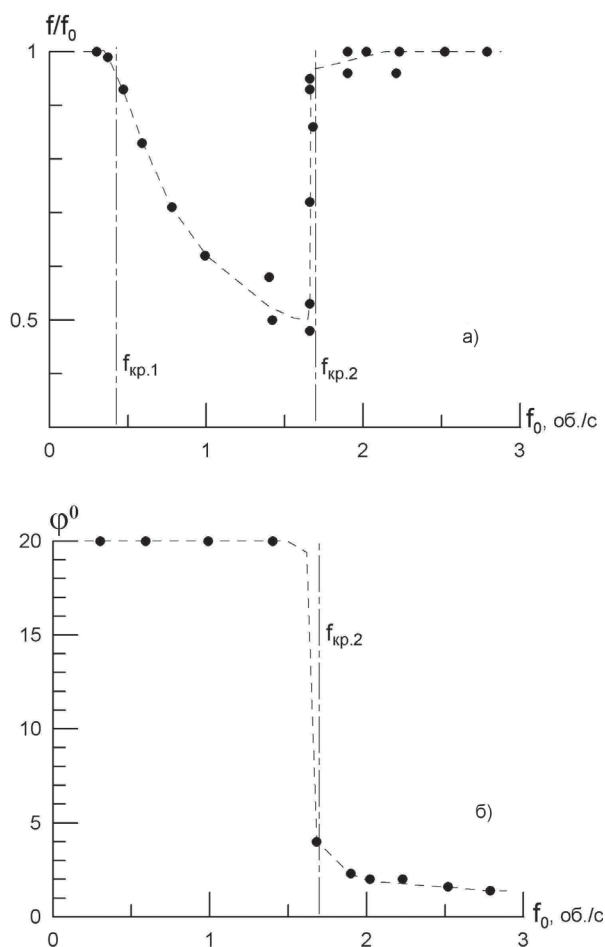
На ядро, при неподвижном сосуде, действуют сила тяжести и архимедова сила, поводок и ось ядра располагаются вертикально (в плоскости рис. 1). При вращении к этим силам присоединяются центробежная сила (направленная к оси вращения, так как $\rho/\rho_0 < 1$) и гидродинамическая сила, связанная с обтеканием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

Результаты экспериментов

1. Влияние скорости вращения сосуда и плотности ядра.

Эксперименты проводились в следующем порядке. Ось заполненного жидкостью сосуда с ядром плотностью ρ отклонялась от вертикали на угол $\alpha = 20^\circ$, после чего включался электропривод. Через каждые 15 минут скорость вращения сосуда f_0 ступенчато увеличивалась. Проведены серии экспериментов при различных значениях ρ – в диапазоне от 0,63 до 0,98 г/см³. Угловая скорость f_0 менялась в пределах от 0,13 до 3,75 об/с. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода ($\rho_0 = 1$ г/см³).

Рис. 2. Зависимость отношения угловых скоростей вращения ядра и сосуда (а) и угла между осями сосуда и ядра (б) от угловой скорости вращения сосуда.
 $\rho = 0,9$ г/см³, $\alpha = 20^\circ$.



Видеозаписи показали, что через некоторое время после включения электропривода 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 $f_{кр.1}$ (зависящего от плотности ядра ρ), скорость вращения ядра вокруг своей оси $f \cong f_0$. Далее, с ростом f_0 , в широком диапазоне, f меняется слабо, а относительная скорость f/f_0 быстро падает. При этом угол между осями сосуда и ядра $\varphi \approx \alpha$. Однако, как показал эксперимент, существует такая критическая скорость вращения сосуда $f_{кр.2}$, также зависящая от плотности ядра, при достижении которой происходит кардинальная перестройка режима течения жидкости. Угловая скорость ядра резко возрастает. При этом ядро, меняя за короткое время свое положение, устанавливается в центре сосуда – происходит его центровка. Зависимости $f/f_0(f_0)$ и $\varphi(f_0)$ приведены на рис. 2, а на рис. 3 – зависимости $f_{кр.1}(\rho/\rho_0)$ и $f_{кр.2}(\rho/\rho_0)$ [Кондратьев, Родионов, 2003; Кондратьев, Родионов, Авсюк, 2004].

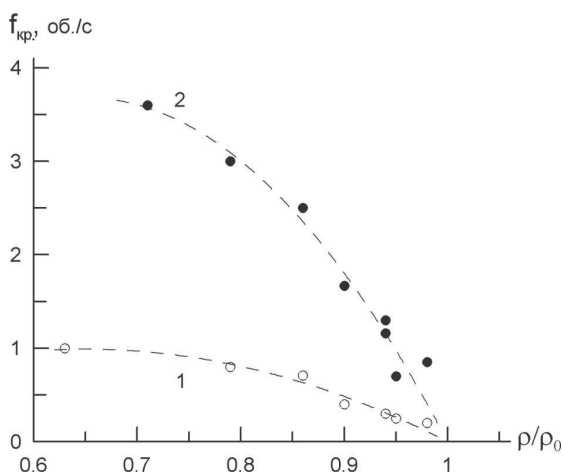


Рис. 3. Зависимость критических скоростей вращения сосуда от относительной плотности ядра.
1 – $f_{кр.1}$, 2 – $f_{кр.2}$. $\alpha = 20^\circ$

2. Влияние вязкости жидкости.

Для изучения зависимости полученных эффектов от вязкости жидкости была проведена специальная серия экспериментов [Кондратьев, Родионов, 2007]. В ходе экспериментов f_0 менялась в пределах от 0,5 до 2 об/с, $\alpha = 20^\circ$. В качестве жидкости использовались водные растворы глицерина различной концентрации с динамической вязкостью от 1 до 100 мПа·с. Отношение плотностей ядра и жидкости $\rho_{я}/\rho_{ж}$ поддерживалось равным 0,9. Эксперименты показали, что увеличение вязкости жидкости в указанном диапазоне снижает величину критической скорости вращения резервуара, при которой происходит кардинальная перестройка течений в нем ($f_{кр.2}$), почти в 3,5 раза. При этом ядро лучше «центрируется», то есть угол между осью вращения и поводком ядра уменьшается в 2 раза. Снижается также и амплитуда эффекта $\Delta f/f_{кр}$ – тоже в 3,5 раза. В то же время увеличивается величина изменения f_0 , необходимого для полной перестройки течений.

3. Влияние прецессии сосуда.

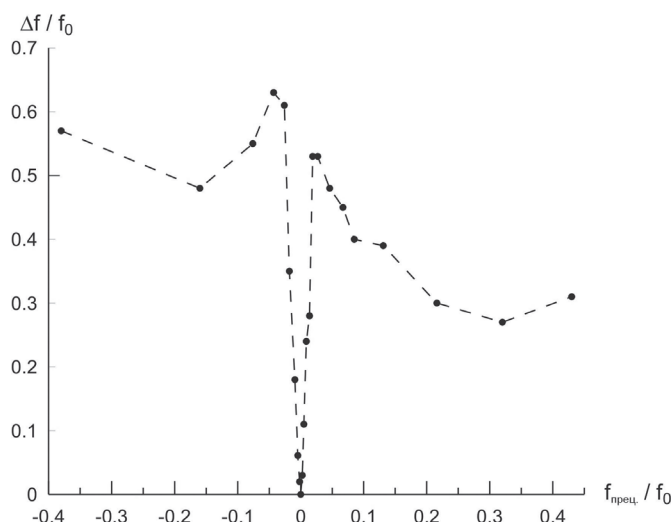
В следующей серии экспериментов исследовалось влияние прецессии. При $\alpha = 20^\circ$, $f_0 = 2,18$ об./с, $\rho = 0,9$ г/см³ примерно через 3 минуты после включения мо-

тора происходит центровка ядра – оно устанавливается в центре резервуара, а скорость его вращения вокруг собственной оси $f_{\text{я}}$ достигает значения f_0 , то есть устанавливается «твердотельный» режим вращения. Через 15 минут после начала вращения сосуда включался электропривод, обеспечивающий его прецессию. Далее, каждые 15 минут, при неизменных α , f_0 и ρ , скорость прецессии $f_{\text{пр}}$ скачком менялась.

Видеозаписи зарегистрировали, что при $f_{\text{пр}} \neq 0$ ядро начинает вращаться вокруг своей оси с меньшей угловой скоростью, чем сосуд и появляется заметная прецессия ядра относительно сосуда. При этом ось прецессии ядра совпадает с осью сосуда. Угловые скорости ядра $f_{\text{я}}$ и его прецессии относительно сосуда $f_{\text{пр}}$, а также угол прецессии ϕ (то есть угол между осями ядра и сосуда), существенно зависят от скорости прецессии сосуда $f_{\text{пр}}$. Анализ видеозаписей позволил получить зависимости $\Delta f_{\text{я}}(f_{\text{пр}})$. Эти зависимости приведены на рис. 4.

Рис. 4. Зависимость относительной угловой скорости ядра от относительной угловой скорости прецессии сосуда.

$\rho = 0,9 \text{ г/см}^3$, $\alpha = 20^\circ$, $f_0 = 2,18 \text{ об./с.}$



Область отрицательных значений оси абсцисс на рисунке соответствует разным направлениям вращений f_0 и $f_{\text{пр}}$. Представляется особо интересной и важной существенная немонотонность зависимости $\Delta f_{\text{я}}(f_{\text{пр}})$ при $f_{\text{пр}} \approx 0$. Такая же немонотонность присутствует и на зависимости угла прецессии ядра относительно оси сосуда от величины вынужденной прецессии $f_{\text{пр}}$.

Для более детального определения структурных характеристик течений, возникающих во вращающемся сферическом объеме жидкости, были проведены следующие эксперименты [Кондратьев, Родионов, Авсюк, 2006; Кондратьев, Родионов, 2007; Кондратьев, 2008]. На внешней стороне резервуара устанавливался вращающийся вместе с ним специально разработанный инжектор. Окрашенная жидкость (чернила) впрыскивалась в сосуд дозированными порциями ($20\text{--}40 \text{ мм}^3$) через сменные иглы разной длины. Иглы располагались по радиусу в экваториальной плоскости и были направлены на центр сосуда. Такая методика дала возможность, не влияя на течения жидкости в сосуде, прорисовать их структуру.

При вращающемся сосуде краска, после выброса из иглы, затормаживается на некотором расстоянии от неё, превращаясь в плоское пятно. Это пятно постепенно обрисовывает тонкую цилиндрическую поверхность, как правило, отстающую во вращении от сосуда. Эти образования имеют сложную структуру; в то же вре-

мя они обладают высокой динамической устойчивостью – их можно наблюдать в течение длительного времени (тысячи оборотов резервуара). Выявленные образования характеризуют структуру вращающейся жидкости. Их кинематические параметры зависят от расстояния от оси вращения r , скорости вращения сосуда f_0 и угла наклона его оси α . Оси этих цилиндрических поверхностей совпадают с осью вращения сосуда. Но это только при $f_{\text{пр.}} = 0$. При $f_{\text{пр.}} \neq 0$ оси цилиндрических поверхностей разворачиваются от оси сосуда в сторону оси прецессии. Симметрия течений в сосуде (относительно оси вращения) нарушается. Этим и можно объяснить существенную немонотонность зависимостей на рис. 4 при $f_{\text{пр.}} \approx 0$.

Выводы

Представленные выше эксперименты позволяют сделать следующие основные выводы.

В резервуаре с жидкостью под действием только переменных объемных сил могут возникать рассогласованные с ним стационарные течения.

В сферическом резервуаре с жидкостью, вращающемся вокруг наклонной оси и содержащем взвешенное твердое ядро, перестройку течений может вызвать даже малый возмущающий фактор (небольшое изменение скорости вращения резервуара или плотности ядра, прецессия оси вращения и др.). Перестройка течений, в ряде случаев, сопровождается значительным смещением ядра и изменением скорости его вращения. Полученные результаты могут быть полезны при построении кинематических моделей движения вещества в недрах Земли, нужных в различных разделах геофизики.

Литература

- Авсюк Ю.Н., В.В. Адушкин, В.М. Овчинников. Комплексное исследование подвижности внутреннего ядра Земли // Физика Земли. 2001. № 8. С. 64–75.
- Кондратьев С.В., В.Н. Родионов. Движение твердого ядра во вращающемся сосуде с жидкостью // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли, книга 1: сб. науч. тр. ИДГ РАН. М.: 2003. С. 263–267.
- Кондратьев С.В., В.Н. Родионов, Ю.Н. Авсюк. Экспериментальное исследование движения твердого ядра во вращающемся сосуде, заполненном жидкостью // ДАН. 2004. Т. 399. № 4. С. 537–539.
- Кондратьев С.В., В.Н. Родионов. Влияние вязкости жидкости во вращающемся сосуде на движение твердого ядра. С.В. // Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер: сб. науч. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2007. С. 337–341.
- Кондратьев С.В., В.Н. Родионов, Ю.Н. Авсюк. Структуры во вращающемся объеме жидкости (инжекция) // Динамические процессы во взаимодействующих геосферах: сб. науч. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2006. С. 161–165.
- Кондратьев С.В., В.Н. Родионов. Структурирование течений жидкости во вращающемся резервуаре // Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер: сб. науч. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2007. С. 341–345.
- Кондратьев С.В. Экспериментальные исследования структур, возникающих во вращающемся объеме жидкости // Геофизика межгеосферных взаимодействий: сб. науч. тр. РАН. М.: 2008. ГЕОС. С. 142–150.