

ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ РЕЗЕРВУАРЕ

С.В. Кондратьев

В статье приведены результаты экспериментального исследования течений, возникающих в сферическом объеме жидкости, вращающемся вокруг наклонной оси. Ранее проведенные эксперименты показали, что в резервуаре формируются рассогласованные с ним стационарные течения. В представляемой работе изучалось влияние на эти течения малых возмущающих факторов: неровностей на внутренней стенке сосуда и небольшого воздушного пузыря в объеме жидкости. Течения жидкости визуализировались впрыском небольших порций красящего вещества. Параметры течений регистрировались с помощью портативной видеокамеры, установленной на сосуда и вращающейся вместе с ним. Полученные результаты могут быть полезными при разработке геодинамических моделей, связанных с вращением Земли.

Введение

Механическое движение вещества играет важнейшую роль в формировании недр планет, их эволюции и взаимодействии. Это движение определяется, в первую очередь, гравитационным взаимодействием масс и вращательным движением. На поведение внутренних геосфер, например, 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. На структуру течений в жидком ядре, кроме того, существенное влияние могут оказывать неровности на поверхностях, его ограничивающих, а также другие возмущающие факторы. Заранее предсказать, в общем случае, структуру и особенности течений, возникающих во вращающемся объеме жидкости, вряд ли возможно. Для построения кинематических моделей движения масс в недрах Земли, необходимых в различных разделах геофизики, нужны аналогии из эксперимента.

Как показали проведенные исследования, условия, при которых происходит структурирование среды, могут реализоваться в лабораторных экспериментах с вращением сосуда с жидкостью вокруг наклонной оси. В этом случае на частицу жидкости действует объемная сила, являющаяся суперпозицией силы тяжести и центробежной силы. Величина и направление действия результирующей силы зависят от положения частицы в сосуде. Это и приводит к рассогласованию движений жидкости и резервуара и образованию динамических структур. Лабораторный эксперимент позволяет также определить основные характеристики этих структур и влияние на них возмущающих факторов. Результаты экспериментов, которым посвящена настоящая статья, могут быть полезны при анализе движений во внутренних геосферах.

Методика экспериментов

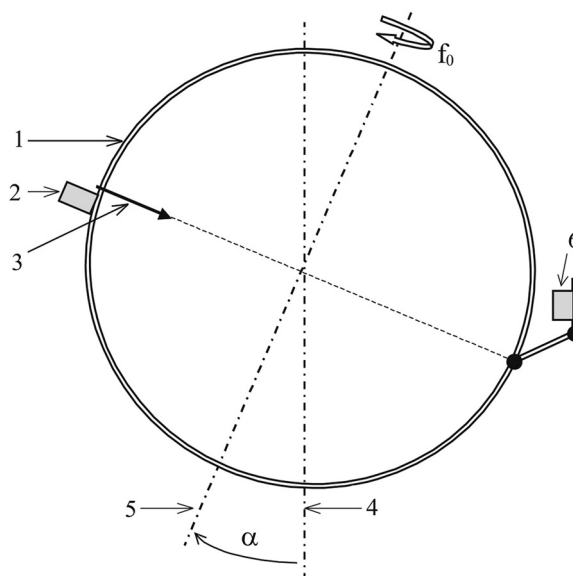
Исследования проводились на созданной в ИДГ РАН экспериментальной установке для изучения течений, возникающих во вращающемся объеме жидкости. Установка позволяет вращать сосуд с жидкостью вокруг вертикальной или наклонной оси с заданной угловой скоростью в течение длительного времени. Имеется возможность задавать вынужденную прецессию оси вращения сосуда с выбранной угловой скоростью и в выбранном направлении. Установка оборудована системой электронной стабилизации скорости вращения сосуда, системами контроля угловых скоростей сосуда и прецессии, а также другими устройствами и приспособлениями. При работе установки производится компьютерный контроль ряда основных и вспомогательных параметров. Более детальное описание установки приведено в работах [Авсюк, Родионов, Кондратьев, 2003; Кондратьев, Родионов, Авсюк, 2004; Кондратьев, Родионов, Авсюк, 2005; Кондратьев, 2008].

В описываемых экспериментах использовался прозрачный сферический сосуд с внутренним диаметром 200 мм, заполненный дистиллированной водой. На сосуде крепились вращающиеся вместе с ним портативная видеокамера и специально разработанный инжектор. Сигнал от видеокамеры выводился на неподвижные монитор и регистратор. Инжектор позволял впрыскивать в сосуд через сменные иглы разной длины дозированными порциями (~ 30 мм³) окрашенную жидкость (чернила). Иглы располагались по радиусу в экваториальной плоскости и были

направлены на центр сосуда. Наружный диаметр игл составлял 0,5 мм, внутренний – 0,35 мм. Длина игл менялась от 5 до 85 мм. Соответственно, относительный радиус точки впрыска $r_{\text{впр.}}/R_0$ варьировался в пределах от 0,95 до 0,15 ($R_0 = 100$ мм – внутренний радиус сосуда). Длительность впрыска равнялась, приблизительно, 0,1 секунды. Такая методика позволила с большой точностью выявлять рассогласованные с сосудом движения жидкости и прорисовывать их структуру. В работе изучалось влияние на эти течения малых возмущающих факторов: неровностей на внутренней стенке сосуда и небольшого воздушного пузыря в объеме жидкости.

Неровности создавались дисками из плотной резины. Диаметр каждого диска составлял 9,5 мм. В одной серии экспериментов толщина дисков h была 1,8 мм, в другой – 3,5 мм (относительные толщины h/R_0 составляли 0,018 и 0,035, соответственно). Диски наклеивались на внутреннюю поверхность сосуда в полосе $\pm 45^\circ$ по широте, их общее количество составило 396 штук. При внутреннем радиусе сферического сосуда $R_0 = 100$ мм отношение общей площади дисков к площади занятой ими полосы 0,31, а к общей площади внутренней поверхности – 0,22. Расположение дисков не создавало выделенных направлений. Объем пузыря dV менялся в пределах от 0 до 30 см^3 ($0 \leq dV/V_0 \leq 0,007$, $V_0 \approx 4,2$ литра – объем сосуда). Угол отклонения оси вращения сосуда от вертикали α составлял 20° , скорость вращения сосуда $f_0 = 1$ об./с. Схема экспериментов приведена на рис. 1.

Рис. 1. Схема эксперимента.
1 – сосуд с жидкостью, 2 – инжектор, 3 – игла инжектора, 4 – вертикаль, 5 – ось вращения, 6 – видеокамера.



Результаты экспериментов

Ранее проведенные эксперименты [Кондратьев, Родионов, Авсюк, 2006; Кондратьев, Родионов, 2007; Кондратьев, 2008; Кондратьев, 2009] показали, что при неподвижном сосуде ($f_0 = 0$) из иглы выбрасывается конус окрашенной жидкости. Длина конуса примерно 40 мм, угол раствора – около 20 градусов. Постепенно расширяясь и турбулизируясь, он достигает противоположной стенки сосуда и отражается от неё. Скорость продвижения конуса по сосуду составляет, приблизи-

тельно, 1 см/с. Через 15–20 минут за счет диффузии окраска жидкости в сосуде выравнивается.

Если сосуд вращается, то картина меняется. После впрыска краска затормаживается на некотором расстоянии от иглы, превращаясь в неоднородное пятно. В неко-



Рис. 2. Цилиндрические структуры во вращающемся сосуде.

торых случаях удастся разглядеть, что пятно состоит из системы тонких вихревых трубок, чьи оси коллинеарны с осью сосуда. Пятно постепенно прорастает вверх и вниз и во вращении, как правило, отстает от сосуда, образуя со временем окрашенную цилиндрическую поверхность. Часть краски, проникающей несколько глубже (ближе к оси сосуда), отстает от сосуда с большей скоростью. В результате образуется система коаксиальных квазицилиндрических поверхностей. Пример приведен на рис. 2 (фотографии сделаны внешней, неподвижной камерой).

Эти образования имеют сложную структуру и разную скорость вращения; в то же время они обладают вы-

сокой динамической устойчивостью – их можно наблюдать в течение длительного времени – до 20 минут, то есть больше тысячи оборотов резервуара.

В описываемых экспериментах для каждого сочетания параметров h и dV исследовалось распределение по радиусу сосуда угловых скоростей жидкости. Впрыск краски производился через 15 минут после включения мотора, вращающего сосуд. За это время заведомо устанавливался стационарный режим течений жидкости. При анализе видеозаписей определялись диаметры прорисовываемых в каждом случае цилиндрических слоев и их угловые скорости. Угловая скорость слоя f определялась по времени τ отставания от сосуда на 1 оборот:

$$\tau(f_0 - f) = 1.$$

Таким образом были получены распределения по радиусу относительного отставания слоев от сосуда

$$df/f_0 = (f_0 - f)/f_0 = 1/\tau f_0$$

и числа Рейнольдса

$$Re = \Omega r^2/\nu = 2\pi R_0^2 f_0(df/f_0)(r/R_0)^2/\nu,$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости. Пример распределений приведен на рис. 3.

Проведенные эксперименты показали, что на структуру и кинематику течений во вращающемся сосуде очень сильно влияет малый возмущающий фактор – воздушный пузырь в жидкости. Так, например, на $r/R_0 = 0,3$ при введении в объем жидкости воздушного пузыря объемом $dV = 0,5 \text{ см}^3$ ($dV/V_0 \approx 10^{-4}$) величина df/f_0 возрастает почти на три порядка – с 0,0004 (при $dV = 0$) до 0,3. Соответствующая зависимость $df/f_0(dV)$ приведена на рис. 4.

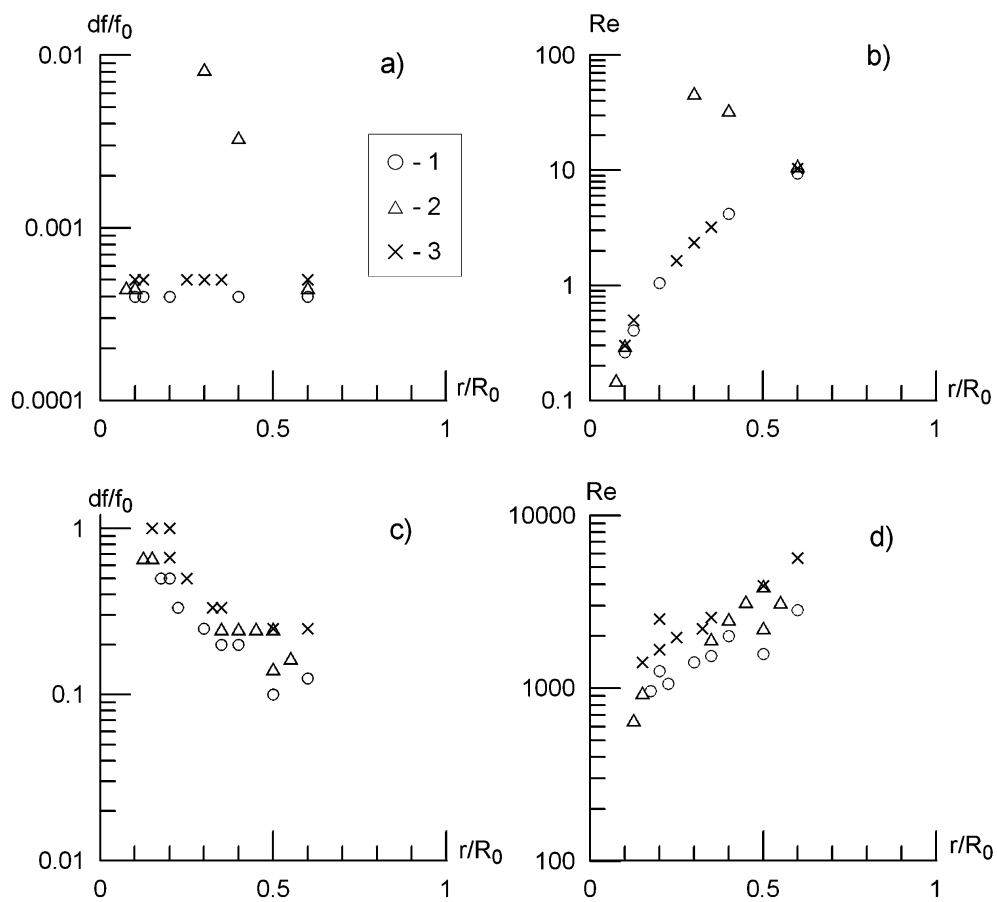


Рис. 3. Распределения по радиусу сосуда величин df/f_0 и Re .

а) и б) – $dV = 0$, в) и д) – $dV = 30 \text{ см}^3$.

1 – $h/R_0 = 0$; 2 – $h/R_0 = 0,018$; 3 – $h/R_0 = 0,035$.

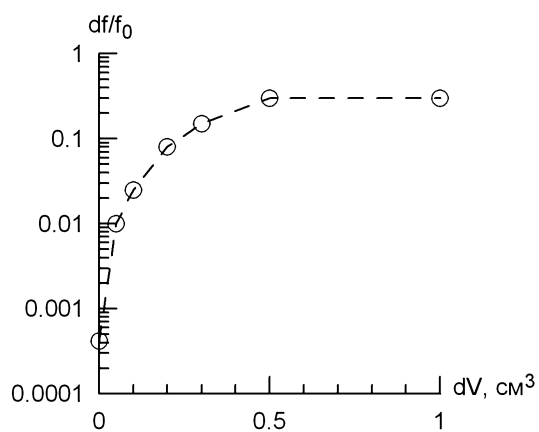


Рис. 4. Влияние параметра dV на величину df/f_0 ($r/R_0 = 0,3$; $h = 0$).

Дальнейшее увеличение dV (до 30 см^3) при $r/R_0 = 0,3$ на величине dff/f_0 сказывается слабо. В целом, по объему сосуда, с ростом dV величина dff/f_0 также растет. Число Рейнольдса увеличивается на 4 порядка. При $dV \geq 10 \text{ см}^3$ отмечается изменение структуры течений в жидкости, начинается ее интенсивное перемешивание. Число Рейнольдса в данном случае растет с ростом r/R_0 . Это может быть связано с тем, что происходит переориентация оси вращения цилиндрических структур от оси вращения сосуда в сторону свободной поверхности, создаваемой воздушным пузырем. Следует обратить внимание также и на то, что, начиная с $dV \approx 1 \text{ см}^3$, при $r/R_0 \leq 0,2$ $dff/f_0 \sim 1$, то есть приосевая область жидкости практически неподвижна в лабораторной системе координат.

Анализ результатов экспериментов показал, что даже сравнительно небольшие неровности в виде дисков указанных размеров на внутренней поверхности вращающегося резервуара в случае $dV \neq 0$ заметно влияют на структуру течений жидкости в нем. При $0 < dV \leq 3 \text{ см}^3$ величина dff/f_0 при неровных стенках меньше, чем при ровных. С ростом размера неровностей растет, очевидно, толщина пограничного слоя, примыкающего к стенке сосуда. А это, в среднем, уменьшает отставание жидкости от резервуара. При $dV \geq 10 \text{ см}^3$ – наоборот: с ростом h растет и dff/f_0 . В этом случае, видимо, при переориентации оси цилиндрических структур происходит более интенсивное перемешивание жидкости и рост величины dff/f_0 .

Следует отметить, что в большинстве исследованных случаев $f_0 > f$, то есть цилиндрические структуры в своем вращении отстают от сосуда. Однако в некоторых случаях окрашивание выявляет одновременное существование двух структур – с $f < f_0$ и с $f > f_0$. На рис. 5 приведена распечатка видеокadra, полученного в одном из опытов через 214 секунд после впрыска красящего вещества.



Рис. 5. Структуры во вращающемся сосуде с жидкостью.

1 – игла инжектора, 2 – пятно краски, 3 – течение, отстающее от сосуда, 4 – течение, обгоняющее сосуд, 5 – направление выброса краски (экваториальный радиус).

На рисунке видно пятно краски, течение, отставшее от сосуда почти на 1 оборот и течение, несколько обогнавшее сосуд. Пунктирные стрелки на рисунке – направления течений относительно сосуда. Отметим, что на этом этапе видимое движение происходит в областях объема жидкости, прилегающих к экваториальной плоскости сосуда. Это явление, видимо, впервые наблюдаемое в эксперименте, требует специального исследования.

Выводы

Анализ проведенных экспериментов дает основание сделать следующие выводы:

1. Во вращающемся сферическом объеме жидкости существуют высокостабильные динамические образования в форме цилиндрических поверхностей с угловой скоростью, отличающейся от угловой скорости сосуда.
2. На структурные и кинематические характеристики наблюдаемых образований очень сильно влияет малый возмущающий фактор – воздушный пузырь в жидкости.
3. Сравнительно небольшие неровности на внутренней поверхности вращающегося резервуара с жидкостью оказывают существенное влияние на структуру течений в нем.
4. Рассогласованность движений жидкости и сосуда достигает своего максимума вблизи оси вращения.

Проведенные эксперименты показали, что во вращающемся резервуаре с жидкостью под действием только объемных сил – сил инерции и гравитации – могут формироваться течения с различными характеристиками. Полученные результаты будут полезны при построении кинематических моделей движения вещества в недрах Земли, нужных в различных разделах геофизики.

Работа выполняется при поддержке РФФИ (проект № 09–05–00411а).

Литература

Авсюк Ю.Н., Родионов В.Н., Кондратьев С.В. Экспериментальное исследование движения жидкости во вращающемся сосуде. // ДАН. 2003. Т. 390. № 6. С. 822–824.

Кондратьев С.В., Родионов В.Н., Авсюк Ю.Н. Экспериментальное исследование движения твердого ядра во вращающемся сосуде, заполненном жидкостью. // ДАН. 2004. Т. 399. № 4. С. 537–539.

Кондратьев С.В., Родионов В.Н., Авсюк Ю.Н. Экспериментальное исследование течений жидкости во вращающемся прецессирующем сосуде. // ДАН. 2005. Т. 405. № 5. С. 670–672.

Кондратьев С.В. Экспериментальные исследования структур, возникающих во вращающемся объеме жидкости. // Геофизика межгеосферных взаимодействий: программа № 5 фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН. М.: ГЕОС. 2008. С. 142–150.

Кондратьев С.В., Родионов В.Н., Авсюк Ю.Н. Структуры во вращающемся объеме жидкости (инжекция). // Динамические процессы во взаимодействующих геосферах: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2006. С. 161–165.

Кондратьев С.В., Родионов В.Н. Структурирование течений жидкости во вращающемся резервуаре. // Физические поля и динамика взаимодействующих геосфер: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2007. С. 341–345.

Кондратьев С.В. Влияние неровностей стенок вращающегося резервуара на течения жидкости в нем // Проблемы взаимодействующих геосфер: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2009. С.53–59.