

вдали от него. Результатом этого является круговое движение жидкости, ...которое возрастает до тех пор, пока под влиянием трения не станет стационарным. Чаинки сносятся в центр круговым движением, чем и доказывают его существование».

Позволю себе пояснить слова великого физика. Эйнштейн утверждает, что вращение жидкости в неподвижной чашке возбуждает циркуляцию, поднимающую жидкость вдоль оси вращения и опускающую вдоль стенок, — так называемую меридианальную циркуляцию. Поэтому вблизи дна жидкость движется от стенок к середине и собирает там осевшие на дно чаинки.

Нетрудно понять причину возникновения меридианальной циркуляции. Когда мы раскручиваем ложечкой чай, центробежная сила инерции пытается отодвинуть жидкость от оси вращения к краю чашки. Избыток несжимаемой жидкости поднимается вдоль краев сосуда, и ее свободная поверхность принимает вогнутую форму. От этого давление вдоль горизонтальных слоев жидкости перестает быть постоянным: оно возрастает с удалением от оси вращения, поскольку в этом направлении возрастает высота столба жидкости над слоем. Возникшая разность давлений как раз и является той причиной, которая обеспечивает жидкости движение по кругу.

Нетрудно найти форму свободной поверхности вращающейся жидкости. Свяжем центростремительное ускорение линейного элемента жидкости мас-

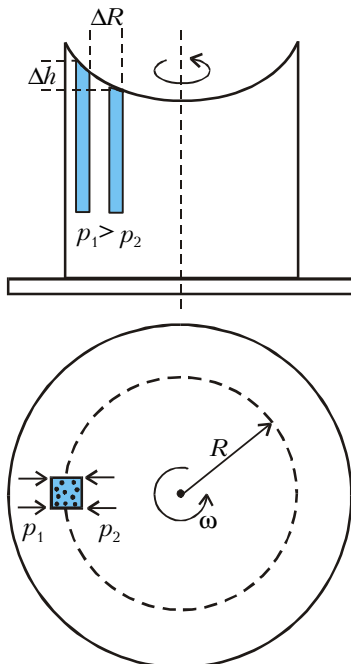


Рис.1. Рост давления с удалением от центра вращения играет роль центростремительной силы

сой  $m$  с разностью действующих на него давлений (рис.1):

$$m\omega^2 R = p_1 - p_2.$$

Но давление связано с высотой столба жидкости:

$$p = \rho gh,$$

где  $\rho$  — плотность жидкости, а  $g$  — ускорение свободного падения, поэтому для несжимаемой жидкости ( $\rho = \text{const}$ ) разность давлений выразится через разность высот столбов:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho g \Delta h.$$

Массу линейного элемента жидкости запишем как  $m = \rho \Delta R$ . Тогда из уравнения движения следует

$$\rho \Delta R \omega^2 R = \rho g \Delta h.$$

Отсюда получаем производную для формы поверхности жидкости:

$$\frac{\Delta h}{\Delta R} = \frac{\omega^2 R}{g},$$

а затем и уравнение самой поверхности:

$$h = \frac{(\omega R)^2}{2g}.$$

Как видим, у жидкости, вращающейся «целиком» (как твердое тело) с постоянной во всех точках угловой скоростью ( $\omega = \text{const}$ ), свободная поверхность имеет форму параболоида ( $h \sim R^2$ ). Кстати, именно это свойство использовал знаменитый американский оптик Роберт Вуд, чтобы сделать параболическое зеркало своего экспериментального телескопа из вращающейся чашки с ртутью. Но, обратите внимание, с помощью мотора Вуд равномерно вращал саму чашку, а не помешивал в ней ртуть ложечкой.

Мы можем сделать то же самое, поставив чашку чая в центр вращающегося диска проигрывателя. При этом мы увидим, что в установившемся режиме (т.е. спустя некоторое время после начала опыта) никаких потоков жидкости в чашке не наблюдается: система приходит в стационарное состояние.

Опыт Вуда получил в наши дни неожиданное продолжение: гигантские зеркала диаметром 8,2 метра для новых телескопов Европейской южной обсерватории в Чили изготовили недавно, выливая расплавленное стекло во вращающуюся посудину, — остывая и затвердевая, стекло приобрело нужную для фокусирующего зеркала форму вогнутого параболоида. Осталось лишь чуть-чуть отполировать его и покрыть тонким зеркальным слоем. Весьма удачно, что форма свободной поверхности

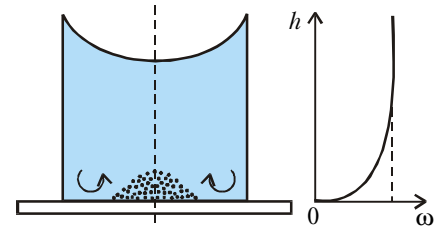


Рис.2. Угловая скорость вращения жидкости у самого дна уменьшается из-за трения. Баланс сил нарушается — возникает вертикальная циркуляция жидкости

вращающейся жидкости точно соответствует требованиям оптики.

Но мы немного отвлеклись. Что же происходит, когда жидкость раскручена в неподвижной чашке? Возникают так называемые краевые эффекты, вызванные трением жидкости о стенки и дно чашки. Нас сейчас особенно интересует дно, на котором лежат чаинки. Вблизи дна жидкость тормозится; распределение ее угловой скорости становится таким, как показано на рисунке 2 справа. Поэтому горизонтальная разность давлений (радиальный градиент давления) превышает там центробежную силу инерции и перемещает жидкость вдоль дна от краев к середине чашки. Вместе с жидкостью переезжают к середине и чаинки. Встретившись у оси вращения, потоки жидкости устремляются вверх (поскольку вниз пути нет), и возникает циркуляция. Жидкость поднимается, а тяжелые чаинки образуют в центре доннышка курганчик.

В этом и заключается решение задачи Эйнштейна. Но какое отношение она имеет к загадочным кругам на льду?

### Разгадка ледяных кругов

Вспомните — под кругом на дне реки была глубокая яма. Течение реки неравномерно: чем ближе к середине потока, тем интенсивнее (краевой эффект берегов). Поэтому с одной стороны ямы вода движется чуть быстрее, чем с другой, и в яме возникает круговое движение воды. (Хорошо помню, как в детстве мы боялись водоворотов, когда купались на маленьком притоке реки Миасс. Лет 100 назад, во время Уральской золотой лихорадки вся речушка была изрыта ямами, и над ними до сих пор существуют водяные воронки, затягивающие пловцов.) Но вот вопрос, возникнет ли при этом вертикальная циркуляция: ведь поверхность воды прижата льдом и не может принять вогнутую форму.

Я думаю, что циркуляция подо льдом возникает. Дело в том, что слои воды различаются по плотности: внизу — более плотные, наверху — менее. Вращение придает вогнутую форму не во-