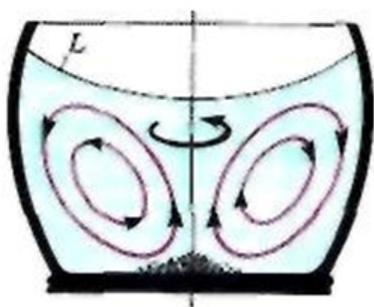


*Из кувшина вылить можно только то,  
что было в нем.  
Ш. Руставели*

Эксперименты с вращающейся жидкостью демонстрируют сложные пространственные движения, порой – очевидные, но необъяснимые, порой – невероятные, но поучительные. Большинство из них можно провести в школьной физической лаборатории или в домашних условиях. Буря в стакане воды. Почему чаинки собираются в центре стакана после того, как их раскрутили ложкой? Этот вопрос занимал даже Альберта Эйнштейна, которому и приписывают авторство опыта с чаинками. Не исключено, что здесь сработал «эффект громкого имени» и авторство в объяснении ранее известного явления действительно было приписано выдающемуся ученому, но теперь мы не можем с уверенностью сказать, что же было на самом деле. В любом случае объяснение Эйнштейна, опубликованное в 1926 году на страницах журнала «Naturwissenschaften», заслуживает того, чтобы привести его здесь: «Я начну с небольшого эксперимента, который каждый может легко повторить. Представим себе чашку с плоским дном, полную чая. Пусть на дне ее имеется несколько чаинок, которые остаются там, так как оказываются тяжелее вытесняемой ими жидкости. Если с помощью ложки привести во вращение жидкость в чашке, то чаинки быстро соберутся в центре дна сосуда. Объяснение этого явления заключается в следующем... Слои жидкости, находящиеся по соседству со стенками чашки, задерживаются благодаря трению, так что угловая скорость вращения... будет вблизи дна меньше, чем вдали от него. Результатом этого явится круговое движение жидкости, которое возрастает до тех пор, пока под влиянием трения не станет стационарным. Чаинки сносятся в центр круговым движением, что и доказывает его существование».

В своем письме к Эйнштейну один из основоположников квантовой механики Э.Шредингер, называя это объяснение «очаровательным», не удержался от весьма нестандартного комплимента основателю теории относительности: «Случайно, несколько дней тому назад, моя жена расспрашивала меня о «феномене чашки чая», но я не сумел дать разумное объяснение. Она говорит, что теперь никогда не сможет перемешивать чай, не вспоминая Вас.



Но вернемся непосредственно к опыту с чаинками. Хотя точного расчета движения чаинок не имеется, качественные соображения просты. «Мокрые» чаинки, плотность которых больше плотности воды, находятся на дне стакана и поэтому при своем движении испытывают силу трения о стекло. Вращаются они не в центре сосуда, а вблизи него, образуя как бы «пояс астероидов». Ширина «пояса» зависит от степени неоднородности чаинок: чаинки разных размеров и масс вращаются по окружностям разных радиусов. Лишь на заключительной стадии торможения они собираются в центре. Этому способствуют восходящие вблизи оси сосуда токи, показанные на рисунке 1 красными линиями и образующиеся вследствие того, что при уменьшении скорости вращения свободная поверхность  $L$ , имевшая форму параболоида вращения, стремится стать снова плоской. Чаинки увлекаются придонным потоком, направленным к оси сосуда.

«Опыт» с чайнками мы проводим каждый день, но не обращаем на их поведение особого внимания. Давайте проведем этот столь хорошо знакомый нам опыт еще раз и, попытаемся выяснить, как ведут себя в процессе движения и на его заключительной стадии не только те чайнки, которые находятся на дне стакана, но и те, которые плавают внутри объема и на поверхности воды («сухие» чайнки). Вместо чайнок можно взять другие частицы, желательны калиброванные. Воду можно раскрутить ложкой, оставляя стакан неподвижным. Возможен и другой способ «закручивания» жидкости – можно раскрутить стакан просто в ладонях (при достаточной ловкости) или поставив его на середину вращающегося диска проигрывателя.

Итак, возможны следующие варианты проведения опыта с чайнками: фиксировать их положение во время вращения или после него, раскручивать чай или стакан и, наконец, наблюдать за придонными, поверхностными или плавающими внутри объема частицами. Всего  $2 \times 2 \times 3 = 12$  комбинаций. Впрочем, существует много других вариантов этого на вид простого, а по своей природе чрезвычайно сложного опыта.

**Вихри Тейлора.** Не менее интересно наблюдать за поведением жидкости, находящейся между двумя коаксиальными цилиндрами. Течение жидкости, вызванное вращением одного или обоих цилиндров, представляет собой сложное гидродинамическое явление. При малой скорости вращения (малой закрутке) течение в любой горизонтальной плоскости одинаково, т. е. не зависит от вертикальной координаты. С увеличением закрутки возникают так называемые ламинарные (упорядоченные) вихри Тейлора. Фотография вихрей Тейлора при течении машинного масла в зазоре между неподвижным стеклянным и вращающимся металлическим цилиндрами приведена на рисунке 2 слева. Для визуализации течения в масло добавлен алюминиевый порошок. Схема течения дана на рисунке 3, направление движения частиц показано стрелками.

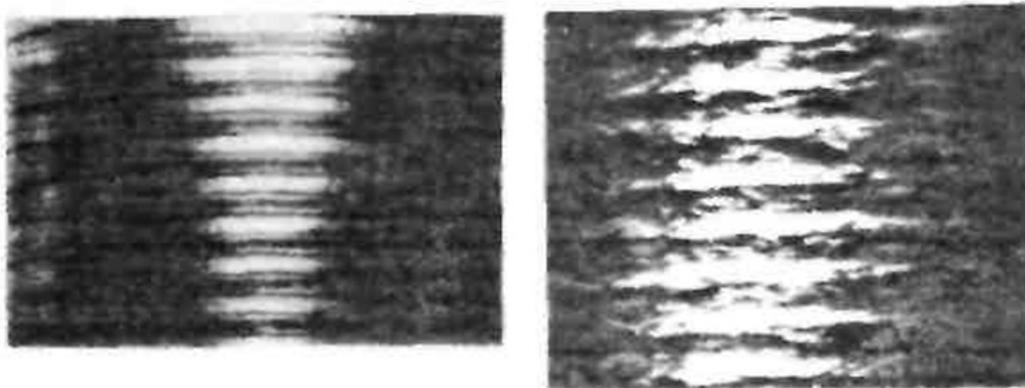


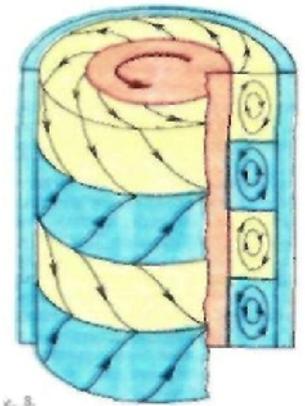
Рис. 2

С дальнейшим ростом скорости вращения появляется периодическое искривление вихрей Тейлора. Наконец, при еще большей скорости на периодическое течение накладывается хаотическое движение (рис. 2, справа). Такие вихри называют турбулентными.

**Закрученные потоки.** В 1931 году было открыто неожиданное явление, заключающееся в следующем. В специальной камере, имеющей круглое выходное отверстие, закручивают воздух, сжатый до 10 атмосфер. По выходе из отверстия температура воздуха на оси и на периферии оказывается различной. Если на периферии воздух комнатной температуры, то на оси его температура падает до минус 200 градусов Цельсия! Это явление называется эффектом Ранка. В

настоящее время природа этого явления до конца не выяснена, хотя исследованию эффекта Ранка посвящается много работ, созываются специальные симпозиумы. Поиск продолжается...

Поскольку эффект Ранка в условиях школьной лаборатории наблюдать нельзя, так как для его осуществления нужна специальная камера, проведем эксперимент, легко воспроизводимый даже в домашних условиях и чем-то напоминающий опыт Ранка. Этот опыт демонстрирует взаимодействие вращательного и поступательного движений жидкости, вытекающей из вращающегося сосуда (рис. 4).



Предлагаемый эксперимент можно поставить следующим образом. Сосуд с водой укрепите на подшипниках так, чтобы он мог свободно вращаться вокруг своей оси, раскрутите его, а затем снимите крутящие усилия и одновременно откройте сток в дне. После этого скорость вращения сосуда начнет заметно возрастать.

Форма свободной поверхности в этом опыте зависит от скорости вращения и от высоты жидкости  $H$  в сосуде. Если скорость вращения мала или велико значение  $H$ , на свободной поверхности образуется небольшая впадина (рис. 5). С увеличением скорости вращения или с уменьшением  $H$  вихрь достигает дна сосуда, а затем проникает в вытекающую из отверстия струю. Подобные воронки можно наблюдать в реках, при спуске воды в ванной.

**Взрыв вихря.** В 1957 году американские ученые Пекхем и Аткинс обнаружили необычное явление – внезапное разрушение спиральных вихрей (взрыв вихря), сходящих с боковых кромок самолетного крыла. Наблюдать этот необычный эффект можно только в условиях научно-исследовательской лаборатории, поэтому мы лишь расскажем об этом интересном явлении и приведем его фотографии.

Модель треугольного крыла самолета устанавливают в потоке жидкости (или воздуха) под некоторым углом к направлению течения. С нижней плоскости крыла частицы жидкости устремляются на верхнюю, где давление меньше, и движутся по потоку вдоль крыла, образуя отходящие от его боковых кромок спиральные вихри. Почти прямые оси вихрей (визуализированные с помощью впрыскиваемой вблизи вершины крыла жидкой краски) искривляются, обретая нерегулярную форму (рис. 6).

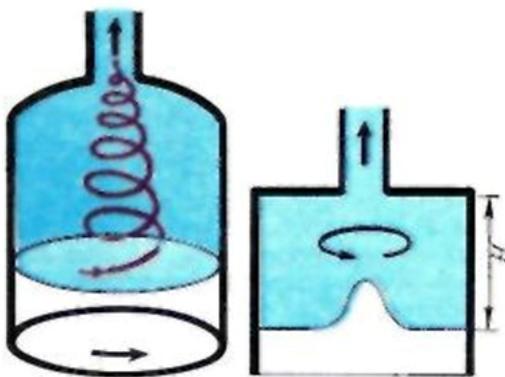


Рис. 4.

Рис. 5.

Это во многом загадочное явление изучают в специальных вихревых камерах, где поток воды закручивается искусственным образом, например лопастями вентилятора (в данном случае модель крыла отсутствует), а по оси камеры вводится краска. При малой скорости вращения потока образуется спиральная структура, фотография которой показана на рисунке 7 сверху; при большой скорости осевая линия приобретает «пузыревидную» форму (рис. 7, внизу). Таковы два основных типа взрыва вихря.

**Наблюдение пророчицы Деборы.** Не только в опытах с вращающейся жидкостью, но и в

любых других ситуациях, где проявляется влияние вязкости, следует различать два типа жидкостей: ньютонову и неньютонову.

Жидкости и газы, состоящие из «легких» молекул с относительными молекулярными массами не более 1000, называют ньютоновыми. К ним относятся воздух и вода при наших земных условиях. Классическая гидродинамика описывает движение ньютоновой жидкости.

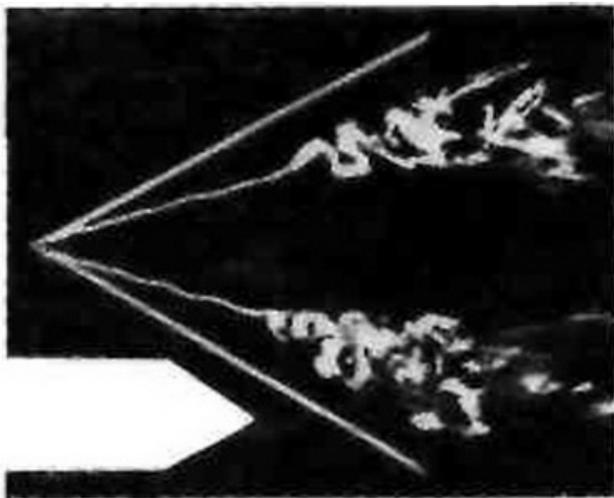


Рис. 6

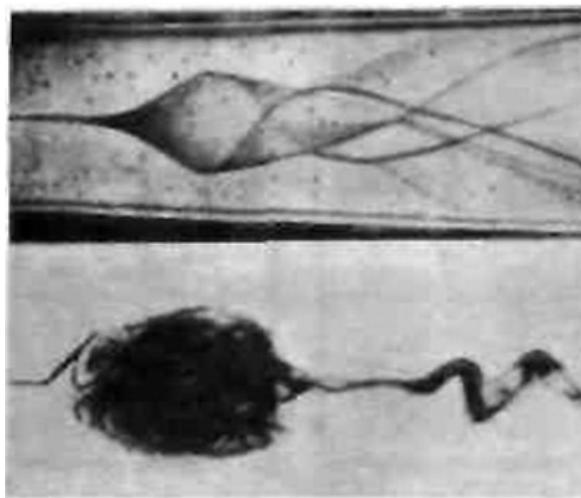


Рис. 7

«Тяжелые» жидкости – неньютоновы – состоят из огромных молекул, каждая из которых представляет собой цепь из большого числа повторяющихся звеньев. Примером являются полимерные жидкости, молекулярная масса которых  $10^5$ – $10^8$ ; растворы синтетических и биологических полимеров и неразбавленные полимеры, называемые «расплавами». Сюда относятся полиэтилен  $(-\text{CH}_2-)_n$ , полистирол  $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-)_n$ , натуральный каучук  $(-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)=\text{CH}-\text{CH}_2-)_n$  и т. д. (Здесь  $n$  – очень большое число порядка  $10^3$ – $10^6$ .)

Неньютоновы жидкости обладают рядом особенностей. Например, они имеют память. Дело в том, что время, характерное для процесса перестройки длинных молекул, может превышать время наблюдения за течением жидкости. Течение не успевает перестроиться, имеет место эффект запаздывания, а значит, эффект памяти.

Как утверждает библейская мифология, пророчица Дебора изрекла, что пред Богом текут даже горы. Она первая подметила аналогию между поведением жидких и твердых тел.

Но что самое важное – Дебора ясно выразила идею разных временных масштабов. За время своей жизни человек не заметит уменьшения горы – оно незначительно. А по временной шкале Бога горы текут! Ученые часто шутят – юмор помогает им в трудной работе. Числом Деборы они назвали отношение характерного времени «настройки» молекул к времени наблюдения. Когда число Деборы велико, жидкость ведет себя подобно твердому телу. При малых числах Деборы жидкость ведет себя как ньютонова. В промежуточном случае, когда число Деборы порядка 1, жидкость обладает рядом аномальных свойств.

Удивительные свойства неньютоновых жидкостей. Двигаясь в трубе, жидкость испытывает силу трения о ее поверхность, в результате чего кинетическая энергия переходит в тепловую. Поэтому снижение силы трения является важной технической проблемой. Как оказалось, добавление в жидкость малого количества полимера значительно снижает силу трения. Это

удивительное и до конца не понятное явление называется эффектом Томса. Всего лишь 20 миллионных долей полиокса (длинноцепочного полимера) могут снизить силу трения турбулентного потока в трубе на 50 %!

В 50-е годы американские пожарные начали добавлять полимерные добавки в жидкость, вытекающую из брандспойта, при этом длина струи увеличивалась в полтора раза. Полимерные добавки в смазывающих материалах повышают ресурсы станков и приборов. Можно увеличивать скорость судна путем впрыскивания вблизи его носовой части малых количеств полимерного раствора. Имеется гипотеза, что дельфины и другие обитатели морей и океанов тоже «используют» эффект Томса для уменьшения гидродинамического сопротивления.

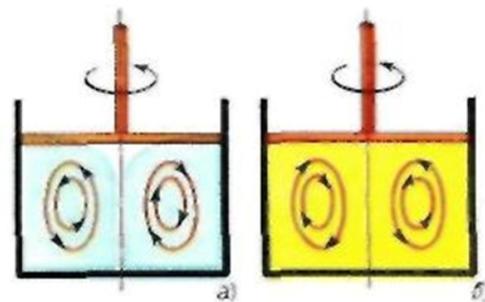


Рис. 8.

Теперь, подготовленные к неожиданностям, снова перейдем к теме нашей беседы – опытам с вращающейся жидкостью. Сравним, как поведут себя ньютоновы и неньютоновы жидкости, оказавшись в одинаковых условиях. В наших опытах в качестве ньютоновой жидкости можно использовать воду, а неньютоновой – подсолнечное масло.

Вставьте во вращающийся стакан с водой неподвижный стержень, ось которого совпадает с осью стакана. Свободная поверхность не утратит форму параболоида вращения. Если же вместо воды взять подсолнечное масло, то жидкость поднимется в центре стакана. Свободная поверхность уже не будет параболоидом. Опыт можно изменить: вращать не стакан, а стержень. Эффект будет тот же самый. Подобная картина возникает, если убрать стержень, а на дно стакана поместить вращающийся диск. Свободная поверхность ньютоновой жидкости в центре опускается, неньютоновой – поднимается.

Если вращающийся диск разместить на поверхности жидкости, то наряду с первичным потоком, скорость которого направлена по касательной к диску, возникнет вторичный поток в меридиональном направлении (красные линии на рисунке 8). В ньютоновой (а) и неньютоновой (б) жидкостях направления вторичного течения противоположны.