

ВИХРЕВЫЕ КОЛЬЦА

И. Снизинов, журнал «Наука и жизнь» №6, 2006

Стендовый доклад на тему «Вихревые кольца» Иван Снизинов, ученик 11-го класса московской гимназии № 1543, сделал на физическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова в рамках молодежной программы, посвященной году физики, которым был объявлен 2005 год в связи со столетием создания теории относительности. Соавторами работы были его одноклассники А. Турок и Д. Налобин; научным руководителем – преподаватель физики Д. Королев.

Что общего может быть у урагана и, например, НЛО? Ураганы и циклоны – это гигантские вихревые образования, а то, что мы видим как неопознанный летающий объект, скорее всего, атмосферный вихрь. Вообще, вихревые образования мы встречаем чуть ли не повсюду: например, кружащиеся клубы снега либо песка или когда спускаем воду из наполненной ванны. Научившись ими управлять, мы сможем обуздать ураганы, торнадо и даже летать с их помощью, как это делают многие жуки. Но это, конечно же, в теории, а сначала нужно исследовать их свойства.

Для исследования взяли частный случай вихревых образований – вихревые кольца. Была построена установка – аппарат Тейта. Он представляет собой кубический ящик со стенками длиной 0,75 метра. Его задняя стенка – мембрана – сделана из куска клеёнки и системы резиновых жгутов, которые обеспечивают упругость мембраны. Напротив неё стоит диафрагма – стенка с круглым отверстием, его диаметр можно менять при помощи насадок. Кое-что ещё вы можете прочесть в журнале «Квант» № 12, 1971г. в статье Роберта Вуда «Вихревые кольца». Американский физик Роберт Вуд первым стал проводить наглядные опыты с вихревыми кольцами. (Заметки о вихревых кольцах в воздухе и в воде были также опубликованы в журнале «Наука и жизнь» № 12, 1968г., с. 126 и № 12, 2001г., с. 91. – Прим. ред.)

ОБРАЗОВАНИЕ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ

Внутри ящика помещён стакан с бинтом, вымоченным в дымящей чилийской селитре, чтобы сделать кольца видимыми. Ударяя по мембране, мы сообщаем некоторую скорость прилегающему к мембране слою дыма. Придя в движение, этот слой вызывает уплотнение соседнего слоя, тот – следующего и так далее. Когда уплотнение доходит до диафрагмы, дым вырывается из отверстия, приводит в движение ранее покоившийся воздух комнаты и благодаря силам вязкого трения сам закручивается в дымовое кольцо. Может быть, в образовании вихревых колец главную роль играют края отверстия? Проверим. Вместо обычной диафрагмы поставим в аппарате Тейта сетку. Если наша гипотеза верна, должно получиться много маленьких колец. Однако опыт показывает, что это не так: образуется одно большое вихревое кольцо. Очень важно, чтобы дым из аппарата выходил отдельными порциями, а не непрерывной струей. Если заменить мембрану поршнем и перемещать его, из отверстия вместо колец появится непрерывная струя дыма.

ДВИЖЕНИЕ СРЕДЫ ВОКРУГ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ

Что происходит с окружающей средой после образования вихря? Ответить на этот вопрос нам помогли соответствующие опыты.

На расстоянии 2-3 метра от аппарата Тейта поставим зажжённую свечу. Дымовое кольцо пустим так, чтобы оно не врезалось в пламя свечи, а прошло рядом. Пламя либо погаснет, либо будет очень сильно колыхаться. Это говорит о том, что движется не только видимая часть кольца, но и слои воздуха, прилегающие к кольцу.

Чтобы посмотреть, как они движутся, возьмём две тряпочки, одну смочим соляной кислотой, другую – нашатырным спиртом и подвесим их на расстоянии 10-15 сантиметров одну от другой. Пространство между ними сразу же заполнится дымом (парами нашатыря). Пустим в облако этого дыма дымовое кольцо из аппарата. Пройдя через облако, кольцо увеличивается в размерах, а облако приходит в круговое движение. Из этого можно заключить, что вокруг вихревого кольца воздух вращается. Аналогичный опыт можно провести и с водой. Медленно вращая воду в стакане, капнем в нее чернила и дадим воде устояться. В стакане образуются чернильные нити. Теперь пустим чернильное кольцо. Когда оно проходит вблизи нитей, они закручиваются.

РАССЕЯНИЕ ДЫМОВЫХ КОЛЕЦ

Мы провели несколько опытов по взаимодействию дымовых колец с диафрагмами различного диаметра и с плоскостью.

Представим себе, что кольцо налетает на диафрагму, диаметр которой меньше диаметра кольца. Рассмотрим два случая: центральное соударение, когда скорость поступательного движения кольца перпендикулярна плоскости диафрагмы, а центр кольца проходит через середину отверстия, и нецентральное соударение, когда центр кольца не проходит через неё.

В первом случае происходит следующее. Налетающее на диафрагму кольцо рассеивается, а по другую сторону диафрагмы возникает новое кольцо меньшего диаметра. Причина его возникновения та же, что и в аппарате Тейта: воздух, движущийся вокруг первоначального кольца, устремляется в отверстие и увлекает за собой дым рассеянного вихря. Аналогично происходит центральное соударение в случае, когда диаметр диафрагмы равен диаметру кольца или несколько больше его.

Гораздо более интересен результат нецентрального соударения: вновь образовавшийся вихрь вылетает под углом к начальному направлению движения. Теперь рассмотрим взаимодействие кольца с плоскостью. Если плоскость перпендикулярна скорости кольца, кольцо только как бы расплывается, не теряя своей формы. Объяснить это можно тем, что поток воздуха, движущегося внутри кольца, образует область повышенного давления, в результате чего и происходит равномерное расширение всего вихревого кольца. Если же плоскость наклонить под некоторым углом к первоначальному положению, вихрь, налетая на плоскость, будет отталкиваться от нее. Этот факт тоже можно объяснить возникновением области повышенного давления в пространстве между кольцом и плоскостью.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОЛЕЦ

Бесспорно, самыми интересными оказались опыты по изучению взаимодействия вихревых колец. Мы проводили эксперименты с кольцами и в воде и в воздухе.

Если пустить каплю чернил с высоты 1-2 сантиметра в сосуд с водой, а через секунду пустить ещё одну каплю, но уже с высоты 2-3 сантиметра, образуются два вихря, движущиеся с разными скоростями: второй – быстрее, чем первый ($V_2 \gg V_1$). Оказавшись на одной высоте, кольца начинают взаимодействовать.

Здесь, оказывается, возможны три случая.

1. Второе кольцо обгоняет первое, не задевая его. При этом происходит следующее. Во-первых, потоки воды от обоих колец как бы расталкивают кольца. Во-вторых, обнаруживается переток чернил от первого кольца ко второму: водяные потоки второго кольца более интенсивны, они и увлекают чернила за собой. Иногда часть этих чернил проходит через второе кольцо, вызывая образование нового небольшого кольца. Затем кольца начинают делиться; дальше ничего интересного заметить не удастся.

2. Второе кольцо с более интенсивными потоками при обгоне задевает первое и разрушает его. Как правило, из оставшегося от первого кольца сгустка чернил образуются новые маленькие вихри.

3. Кольца испытывают центральное соударение. При этом второе кольцо проходит через первое и уменьшается в размерах, а первое, наоборот, расширяется. Как и в предыдущих случаях, это происходит за счёт взаимного действия водяных потоков одного кольца на другое. В дальнейшем кольца начинают делиться.

Взаимодействие дымовых колец в воздухе мы исследовали с помощью аппарата Тейта с двумя отверстиями. Оказалось, что результаты опытов сильно зависят от силы и продолжительности удара по мембране. В некоторых установках удар производят тяжёлым маятником, а в нашей установке удар проводился рукой.

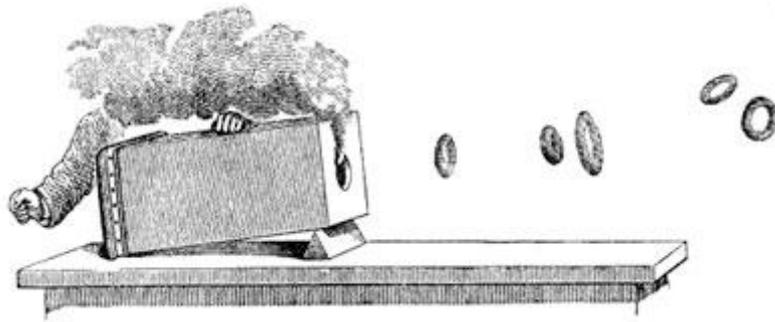
Было обнаружено, что, если расстояние l между отверстиями меньше диаметра d каждого отверстия ($l < d$), два потока воздуха перемешиваются, и образуется одно вихревое кольцо. При $d < l \ll 1,5d$ кольцо, как правило, вообще не образуется. Во всех остальных случаях возникают два кольца. При этом, если $l > 4d$, кольца не взаимодействуют друг с другом, а если $1,5d \ll l < 4d$, кольца сначала сближаются, а затем, в конце своей «жизни», могут расходиться.

Сближение можно объяснить тем, что в пространстве между кольцами образуется нечто подобное «мнимому» кольцу, которое движется в противоположную сторону. Плоскости колец поворачиваются одна к другой, и кольца начинают сближаться. Что происходит с кольцами в конце «жизни», нам объяснить не удалось. В дальнейшем мы планируем провести эксперименты с использованием мембран из других материалов, изучить взаимодействие колец с наклонной плоскостью, с неподвижным воздухом при помощи его задымления и многое другое.

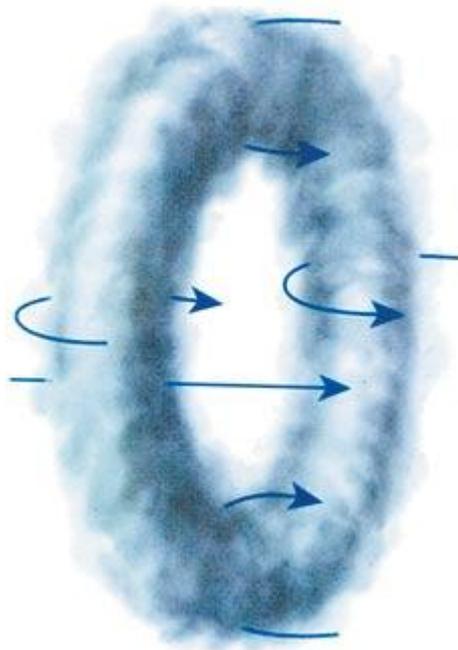
ПРИЛОЖЕНИЕ



Вихревое кольцо в разрезе. Видно, что его образует туго свернутая дымовая спираль.



Генератор дымовых колец построил шотландский физик Питер Тейт в 1867 году. Рисунок из журнала того времени.



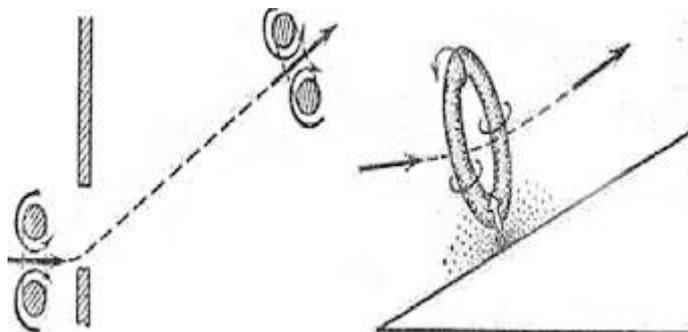
Дымовое кольцо в полете.



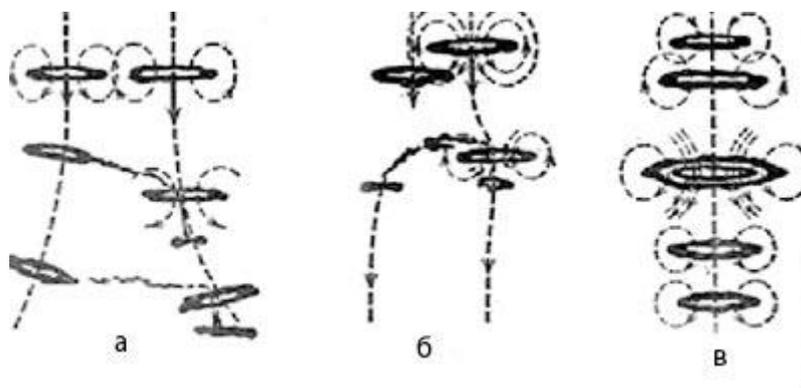
Если в генераторе Тейта отверстие заменить сеткой, всё равно образуется одно дымовое кольцо.



«Игра» вихревых колец. Если пустить одно за другим два кольца, то второе быстро догонит первое и проскочит сквозь него. При этом первое кольцо в диаметре увеличивается, а второе уменьшается. Теперь второе стало первым, и «игра» повторяется.



Кольцо, налетающее на край диафрагмы или одним боком на стенку, продолжает движение под углом к первоначальному направлению.



Взаимодействие чернильных колец в воде.

Детальное описание иллюстрации

Взаимодействие чернильных колец в воде: а – второе кольцо обгоняет первое, не задевая его; потоки воды расталкивают кольца, часть чернил перетекает от первого кольца ко второму; б – второе кольцо задевает первое и разрушает его, создавая новые вихри меньшего размера; в – при центральном соударении колец наблюдается их «игра».