

Качественное описание вихревых проявлений

В предлагаемом материале изложены некоторые результаты теоретических и экспериментальных исследований, связанных с образованием, структурой и движением кольцевых вихрей.

Несмотря на большое число работ, посвященных этой проблеме, многие важные и интересные вопросы, к ней относящиеся, до последнего времени оставались без ответа. Исследования, проведенные за последнее десятилетие, улучшили положение. Были поставлены многочисленные опыты, на основе которых создана математическая модель, позволяющая определить закон движения, структуру кольцевых вихрей, количество примеси, которое они могут переносить, и другие характеристики. Полученные результаты дают хорошее совпадение с опытом.

Более трудным для исследования оказался механизм образования кольцевых вихрей. Здесь получены некоторые экспериментальные результаты, дающие основу для качественного понимания явления, однако задача его полного математического описания ещё не решена.

Кольцевые вихри

Если обычному воздушному шару в резиновой оболочке сообщить скорость 5 – 10 м/сек, то он проходит расстояние 1,5 – 2 м. С другой стороны, давно известно, что если с той же скоростью кинуть (например, вытолкнуть поршнем из трубки) такую же массу воздуха без оболочки, то она пройдет расстояние, в 10 – 15 раз большее.

Опыт показывает, что во втором случае движение происходит так, как показано на рис. 121, где изображены линии тока для движения относительно системы координат, движущейся вместе с вытолкнутой массой воздуха. Движение обладает осевой симметрией; внутри выпуклой области, образованной вращением участка ABC линии тока, оно вихревое, а вне этой области – практически потенциальное. На ABC скорости внутреннего и внешнего движений совпадают, так что поле скоростей оказывается непрерывным. Это и объясняет эффект, с которого мы начали, – из-за непрерывности трение на границе движущейся без оболочки массы меньше, чем массы в оболочке, следовательно, меньше сопротивление и больше проходное массой расстояние.

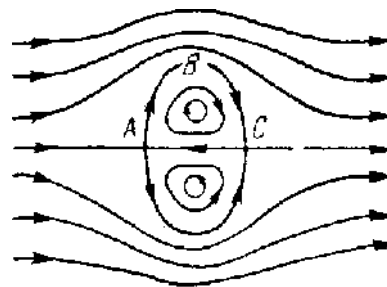


Рис. 121.

Аналогичное движение можно наблюдать и в воде. Оно известно уже давно и называется кольцевым вихрем. В конце прошлого века такая схема движения привлекала

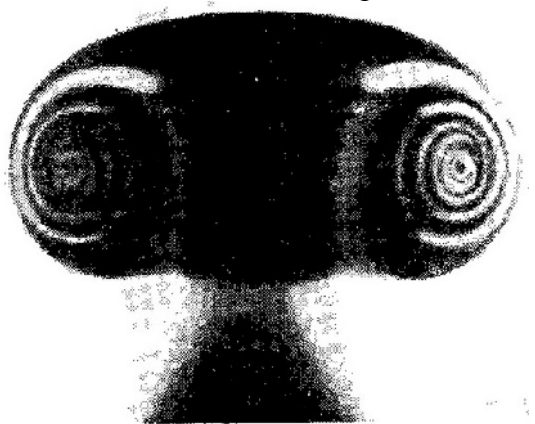


Рис. 122.

внимание в связи с попытками создания вихревой модели атомов (У. Томсон-Кельвин, Дж. Дж. Томсон). Эти попытки успеха не имели, но они послужили поводом для интересных исследований, с которыми можно ознакомиться по книге Ламба.

Интерес к проблеме сильно возрос после появления атомных бомб, при взрыве которых образуется характерное грибовидное облако, структура которого аналогична структуре кольцевого вихря, изображённого на фото рис. 122. Такое облако с большой скоростью поднимается на высоту нескольких километров. Аналогичное явление наблюдается и при взрыве больших зарядов обычных ВВ.

В последнее время исследуются возможности практического применения кольцевых вихрей для удаления дыма, вредных газов и т. п. на промышленных предприятиях. В связи с этим возникает много вопросов, ответы на которые нельзя получить без учёта вязкости, диссипации энергии, турбулентного характера движения и т. д.

Дымовые кольца. Проведённый анализ позволяет объяснить интересное явление, связанное с дымовыми кольцами, которые выпускают изо рта искусные курильщики. Такие кольца хорошо моделируются в наполненном дымом ящике с круглым отверстием, о котором говорилось. Кольца из этого ящика, не разрушаясь, проходят расстояния порядка 150 – 200 диаметров. Можно соорудить пистолет, стреляющий дымовыми кольцами –

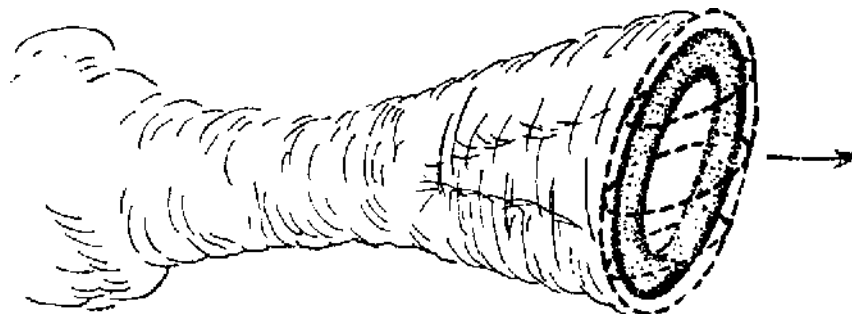


Рис. 126.

вылетающие из него кольца колыхат довольно плотную портьеру на расстоянии 5 – 6 метров от места выстрела.

Мы знаем, что вместе с вихрем в воздухе движется тело вращения, близкое к сплюснутому эллипсоиду, но в описанных опытах четко видны именно кольца из дыма, за которыми остаётся дымовой след (рис. 126).

Дело в том, что вследствие турбулентной диффузии частицы дыма у границ движущегося тела быстро отходят от него (они и образуют след). Видимой является только область высокой концентрации частиц дыма, которая представляет собой кольцо (тор).

Поразительная устойчивость дымовых колец, о которой говорилось выше, по-видимому, и объясняется тем, что они представляют собой часть движущегося эллипсоида вращения – одной из наиболее часто встречающихся в природе устойчивых форм.

Заметим, что точно такие же кольца можно наблюдать в воде, если вытолкнуть в неё поршнем некоторый объём жидкости, подкрашенной чернилами. Очень хорошо видно густо окрашенное чернильное кольцо, которое движется вместе с некоторым, окрашенным слабее, объёмом жидкости, имеющим эллипсоидальную форму. Ограниченные размеры экспериментальной установки не позволяют, однако, проследить весь путь вихря до его остановки – вихрь наталкивается на стенку и разрушается.

Формирование и движение вихрей

Вихри в воздухе. Экспериментально известен ряд способов создания вихревых движений. Описанный выше способ получения дымовых колец из ящика позволяет получать вихри, радиус и скорость которых имеют порядок 10 – 20 см и 10 м/сек соответственно, в зависимости от диаметра отверстия и силы удара. Такие вихри проходят расстояния 15 – 20 м.

Вихри гораздо большего размера (радиусом до 2 м) и большей скорости (до 100 м/сек) получаются с помощью ВВ. В трубе, закрытой с одного конца и заполненной дымом, производится подрыв заряда ВВ, расположенного у дна. Вихрь, получаемый из цилиндра радиусом 2 м при заряде весом около 1 кг, проходит расстояние около 500 м. На большей части пути вихри, получаемые таким способом, имеют турбулентный характер и хорошо описываются законом движения.

Механизм образования таких вихрей качественно ясен. При движении в цилиндре воздуха, вызванном взрывом, на стенках образуется пограничный слой. На краю цилиндра пограничный слой отрывается, в результате чего создаётся тонкий слой воздуха со значительной завихрённостью. Затем происходит сворачивание этого слоя. Качественная картина последовательных этапов приведена на рис. 127, где изображён один край цилиндра и срывающийся с него вихревой слой. Возможны и другие схемы образования вихрей.

При малых числах Рейнольдса спиральная структура вихря сохраняется довольно долго. При больших числах Рейнольдса, в результате неустойчивости, спиральная

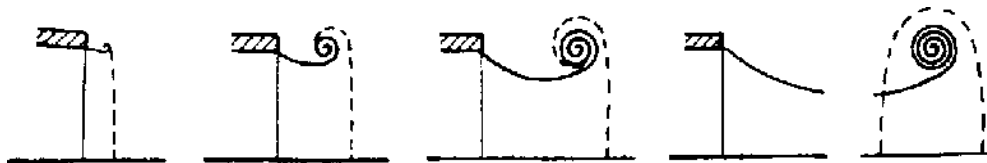


Рис. 127.

структура разрушается сразу и происходит турбулентное перемешивание слоёв и, как следствие, образуется вихревое ядро.

Однако в настоящий момент нет никакой схемы расчёта, которая позволяла бы по заданным параметрам трубы и весу ВВ определять начальные параметры сформировавшегося турбулентного вихря (т. е. его начальные радиус и скорость). Эксперимент показывает, что для трубы с заданными параметрами существует наибольший и наименьший вес заряда, при которых вихрь образуется; на его образование сильно влияет и расположение заряда.

Вихри в воде. Мы уже говорили, что вихри в воде можно получать аналогичным способом, выталкивая поршнем из цилиндра некоторый объём жидкости, подкрашенной чернилами.

В отличие от воздушных вихрей, начальная скорость которых может достичь 100 м/сек и более, в воде при начальной скорости 10 – 15 м/сек вследствие сильного вращения жидкости, движущейся вместе с вихрем, возникает кавитационное кольцо. Оно возникает в момент образования вихря при срыве пограничного слоя с края цилиндра. Если пытаться получить вихри со скоростью более 20 м/сек, то кавитационная каверна становится столь большой, что возникает неустойчивость и вихрь разрушается. Сказанное относится к диаметрам цилиндра порядка 10 см; возможно, что с увеличением диаметра удастся получить устойчивые вихри, движущиеся с большой скоростью.

Интересное явление возникает, когда вихрь движется в воде вертикально вверх по направлению к свободной поверхности. Часть жидкости, образующая так называемое тело вихря, взлетает над поверхностью, сначала почти без изменения формы – водяное кольцо выпрыгивает из воды. Иногда скорость вылетевшей массы в воздухе увеличивается. Это можно объяснить отбрасыванием воздуха, которое происходит на границе вращающейся жидкости. В дальнейшем вылетевший вихрь разрушается под действием центробежных сил.

Падение капель. Легко наблюдать вихри, образующиеся при падении капель чернил в воду. Когда чернильная капля попадает в воду, образуется кольцо, состоящее из чернил и движущееся вниз. Вместе с кольцом движется некоторый объём жидкости, образующий тело вихря, которое также окрашено чернилами, но гораздо слабее. Характер движения сильно зависит от соотношения плотностей воды и чернил. При этом оказываются существенными различия плотности в десятые доли процента.

Плотность чистой воды меньше, чем чернил. Поэтому при движении вихря на него действует сила, направленная вниз, по ходу вихря. Действие этой силы приводит к увеличению импульса вихря. Импульс вихря

$$P \approx \Gamma R^2, (1)$$

где Γ – циркуляция или интенсивность вихря, и R – радиус вихревого кольца, а скорость движения вихря

$$V \approx \Gamma/R. (2)$$

Если пренебречь изменением циркуляции, то из этих формул можно сделать парадоксальный вывод: действие силы в направлении движения вихря приводит к уменьшению его скорости. Действительно, из (1) следует, что с ростом импульса при постоянной циркуляции должен увеличиваться радиус R вихря, но из (2) видно, что при постоянной циркуляции с ростом R скорость падает.

В конце движения вихря чернильное кольцо распадается на 4 – 6 отдельных сгустков, которые в свою очередь превращаются в вихри с маленькими спиральными кольцами внутри. В некоторых случаях эти вторичные кольца распадаются ещё раз.

Механизм этого явления не очень ясен, и существует несколько его объяснений. В одной схеме главную роль играет сила тяжести и неустойчивость так называемого тейлоровского типа, которая возникает, когда в поле тяжести более плотная жидкость находится над менее плотной, причём обе жидкости вначале покоятся. Плоская граница, разделяющая две такие жидкости, неустойчива – она деформируется, и отдельные сгустки более плотной жидкости проникают в менее плотную.

При движении чернильного кольца циркуляция на самом деле уменьшается, и это приводит к полной остановке вихря. Но на кольцо продолжает действовать сила тяжести, и в принципе оно должно было бы опускаться дальше как целое. Однако возникает тейлоровская неустойчивость, и в результате кольцо распадается на отдельные сгустки, которые опускаются под действием силы тяжести и в свою очередь образуют маленькие вихревые кольца.

Возможно и другое объяснение этого явления. Увеличение радиуса чернильного кольца приводит к тому, что часть жидкости, движущаяся вместе с вихрем, принимает форму, изображённую на рис. 127. В результате действия на вращающийся тор, состоящий из линий тока, сил, аналогичных силе Магнуса, элементы кольца приобретают скорость, направленную перпендикулярно скорости движения кольца как целого. Такое движение неустойчиво, и происходит распад на отдельные сгустки, которые снова превращаются в маленькие вихревые кольца.

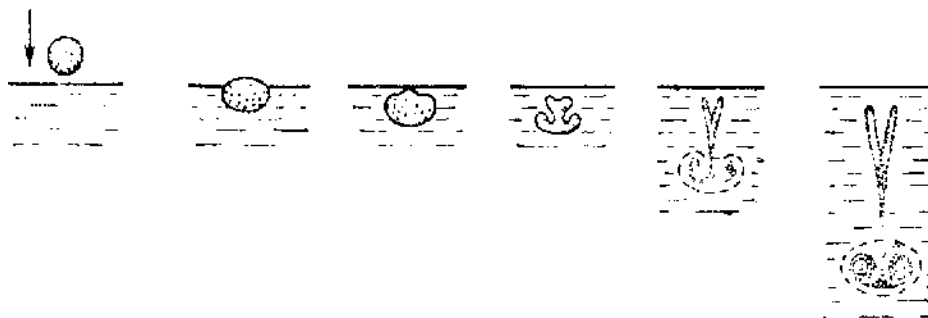


Рис. 128.

Механизм образования вихря при падении каплей в воду может иметь разный характер. Если капля падает с высоты 1 – 3 см, то её вход в воду не сопровождается всплеском и свободная поверхность деформируется слабо. На границе между каплей и водой образуется вихревой слой, сворачивание которого и приводит к образованию кольца чернил, окружённого захваченной вихрем водой. Последовательные стадии образования вихря в этом случае качественно изображены на рис. 128.

При падении капля с большой высоты механизм образования вихрей иной. Здесь падающая капля, деформируясь, растекается на поверхности воды, сообщая на площади, много большей её



Рис. 129.

диаметра, импульс с максимальной интенсивностью в центре. В результате на поверхности воды образуется впадина, она по инерции расширяется, а потом происходит схлопывание и возникает кумулятивный всплеск – султан.

Масса этого султана в несколько раз больше массы капли. Падая под действием силы тяжести в воду, султан образует вихрь по уже разобранный схеме (рис. 128); на рис. 129 изображена первая стадия падения капли, приводящая к образованию султана.

По этой схеме образуются вихри, когда на воду падает редкий дождь с крупными каплями – поверхность воды покрывается тогда сеткой небольших султанчиков. Вследствие образования таких султанчиков каждая капля значительно наращивает свою массу, и поэтому вихри, вызванные её падением, проникают на довольно большую глубину.

По-видимому, это обстоятельство можно положить в основу объяснения известного эффекта гашения дождём поверхностных волн в водоёмах. Известно, что при наличии волн горизонтальные составляющие скорости частиц на поверхности и на некоторой глубине имеют противоположные направления. Во время дождя значительное количество жидкости, проникающее на глубину, гасит волновую скорость, а восходящие из глубины токи гасят скорость на поверхности. Было бы интересно подробнее разработать этот эффект и построить его математическую модель.

Вихревое облако атомного взрыва. Явление, очень похожее на образование вихревого облака при атомном взрыве, можно наблюдать при взрывах обычных ВВ,

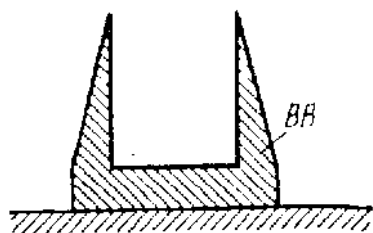


Рис. 130.

например, при подрыве плоской круглой пластины ВВ, расположенной на плотном грунте или на стальной плите. Можно также располагать ВВ в виде сферического слоя или стакана, как показано на рис. 130.

Наземный атомный взрыв отличается от обычного взрыва, прежде всего, существенно большей концентрацией энергии (кинетической и тепловой) при очень малой массе бросаемого вверх газа. При таких взрывах образование вихревого облака происходит за счёт выталкивающей силы, которая появляется из-за того, что масса горячего воздуха, образующаяся при взрыве, легче окружающей среды. Выталкивающая сила играет существенную роль и при дальнейшем движении вихревого облака. Точно так же, как при движении чернильного вихря в воде, действие этой силы приводит к росту радиуса вихревого облака и

уменьшению скорости. Явление осложняется тем, что плотность воздуха меняется с высотой.

Вихревая модель турбулентности. Пусть поток жидкости или газа обтекает поверхность, которая представляет собой плоскость с вмятинами, ограниченными сферическими сегментами (рис. 131а). Ранее мы показали, что в районе вмятин естественно возникают зоны с постоянной завихрённостью.

Предположим теперь, что завихрённая зона отделяется от поверхности и начинает двигаться в основном потоке (рис. 131б). В силу закрученности эта зона, кроме скорости V основного потока, будет иметь ещё компоненту скорости, перпендикулярную к V . В результате такая движущаяся вихревая зона вызовет турбулентное перемешивание в слое жидкости, размер которого в десятки раз превышает размеры вмятины.

Это явление, по-видимому, можно использовать для объяснения и расчётов передвижения больших масс воды в океанах, а также передвижения масс воздуха в горных районах при сильных ветрах.

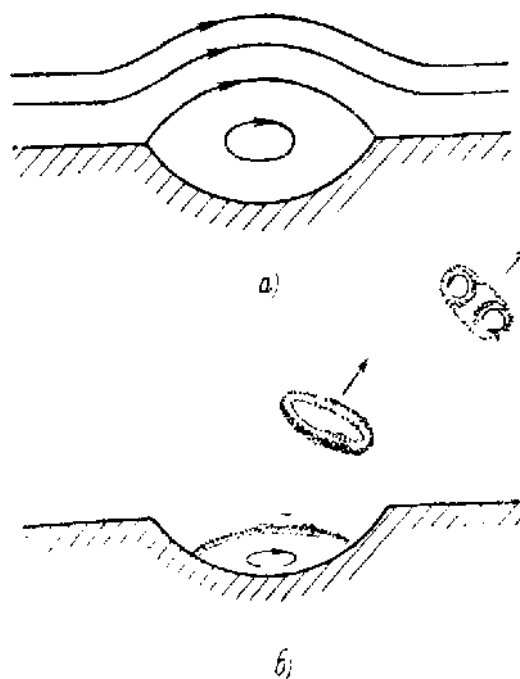


Рис. 131.

(По материалам книги: М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат, Проблемы гидродинамики и их математические модели, – М.: Наука, 1973).