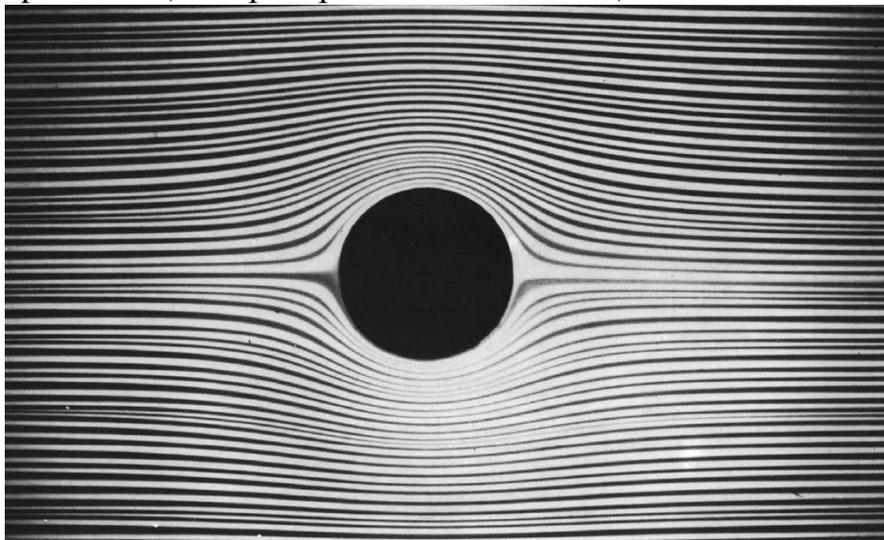


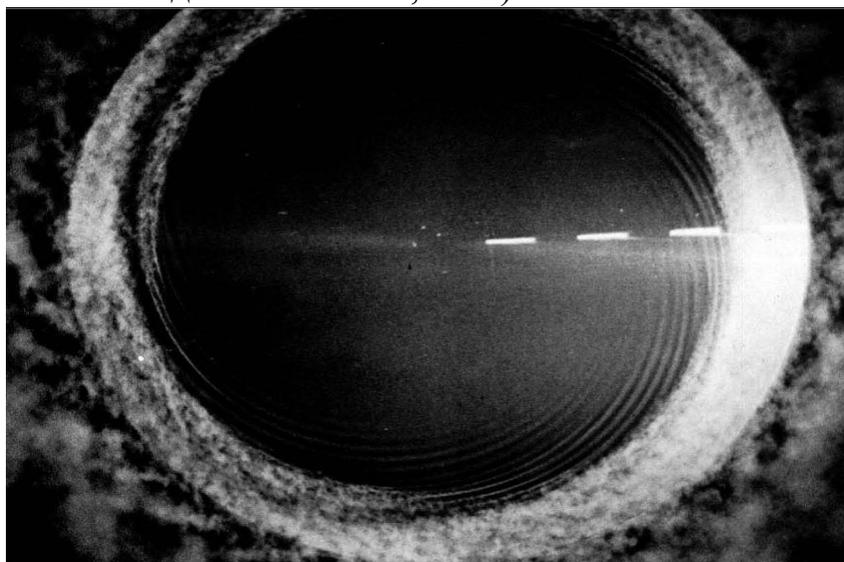
## Эти удивительные присоединённые циркуляционные вихри

Очень интересно ознакомиться с удивительным поведениемдвигающихся в гидродинамической среде вращающихся твёрдых тел. Описание такого поведения можно, например, найти в книге крупнейшего немецкого гидромеханика профессора Геттингенского университета Людвиг Прандтля (“Гидроаэромеханика”, 2000).



**Рис.1. Линии тока воды вокруг не вращающегося цилиндра**

Если на твёрдый цилиндр набегают медленный поток подкрашенной гидродинамической среды, то линии огибающих цилиндр токов будут выглядеть симметрично. Для того, чтобы избежать турбулентных эффектов, эксперименты подобного рода проводились в специальном устройстве, называемом ‘лоток Хил-Шоу’. В нём краска течёт со скоростью 1мм/сек в воде в зазоре толщиной 1мм между стеклянными пластинками. Фото экспериментов можно найти в книге М.Ван-Дайка (“Альбом течений жидкости и газа”, 1982).



**Рис.2. Вихрь вокруг вращающегося цилиндра**

Если в неподвижной гидродинамической среде твёрдый цилиндр вращается, то он начинает увлекать во вращение и окружающую среду. Вокруг него сформируется вихрь среды, присоединённый к поверхности цилиндра вязким трением. Линии огибающих цилиндр круговых токов опять будут выглядеть симметрично. И любое другое твёрдое вращающееся тело в неподвижной среде создаёт вокруг себя подобную симметричную циркуляцию окружающей среды.

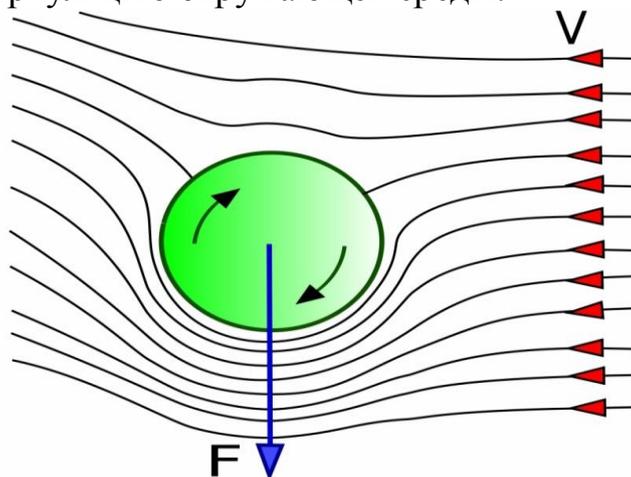


Рис.3. Направление действия силы Магнуса

Совсем другое дело, если на вращающийся круглый цилиндр набегаёт поток окружающей среды в направлении, перпендикулярном к оси цилиндра. В этом случае два простых, симметричных ранее, движения среды объединяются в одно сложное несимметричное движение. Если с какой-либо стороны цилиндра скорости циркуляционного и набегающего потоков складываются и суммарная скорость увеличивается, то согласно уравнению Бернулли в этом месте давление понижается. Если скорости циркуляционного и набегающего потоков встречно направлены, то в этом месте давление повышается. В результате возникает поперечная сила, действующая на цилиндр в направлении, перпендикулярном к направлению потока и сдвигающая его из области повышенного давления в область пониженного давления. Удивительное явление!



Рис.4. Иллюстрация эффекта Магнуса в футболе

Таким образом, поперечная сила всегда направлена к той стороне вращающегося тела, на которой направление вращения и направление потока совпадают. Такое явление называется эффектом Магнуса по имени учёного, открывшего его в 1852 году. До изобретения нарезных артиллерийских орудий существовали только гладкоствольные пушки. Магнус исследовал случаи значительных отклонений шаровых ядер от запланированных траекторий. Он показал, что причиной такого поведения ядер служило вращение вокруг поперечной оси, которое снаряд получал вследствие случайных причин. Такие же боковые отклонения, часто очень значительные, наблюдаются и при полёте срезанного мяча при игре в футбол, теннис или гольф. Но самым удивительным является круговой полёт бумеранга – кривой палки для охоты на птиц, придуманной австралийскими аборигенами. Если бумеранг не попадает в цель, то он всегда возвращается в руки охотника. Удивительное явление!



**Рис.5. Бумеранг всегда возвращается, описав круговую траекторию**

Если привести в быстрое вращение легкий цилиндр с горизонтальной осью и отпустить, то можно провести ещё одну демонстрацию эффекта Магнуса. Вместо того, чтобы под действием силы тяжести упасть вертикально вниз, цилиндр начнёт планировать по пологой траектории. Аналогично по пологой траектории будет планировать и брошенный с большой высоты вращающийся тяжелый баскетбольный мяч. Эффект Магнуса можно продемонстрировать и с помощью легкой рельсовой тележки с вертикальным цилиндром, приводимым во вращение электромоторчиком. Если направить на цилиндр поток воздуха поперёк рельсов, то тележка начнёт двигаться по рельсам. Немецкий инженер Антон Флеттнер решил использовать такой эффект в мореплавании. Впервые цилиндрические паруса были успешно испытаны на шхуне «Букау» в 1924 году. Удивительное явление!



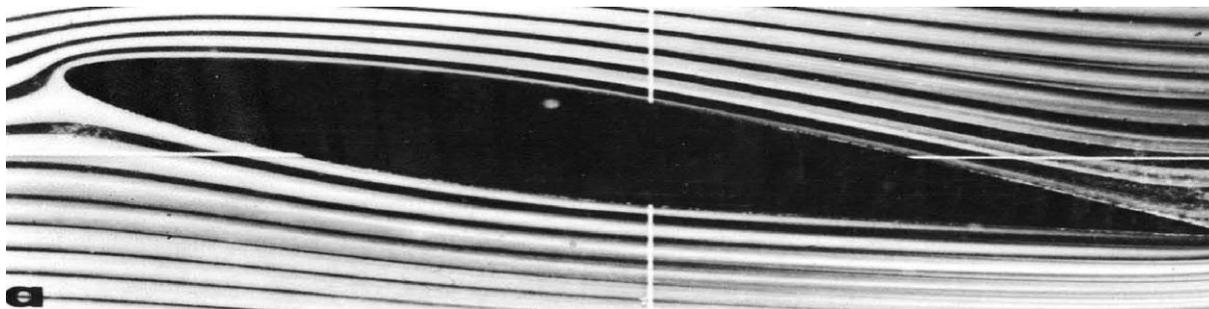
**Рис.6. Вид турбопарусов, изобретённых Антоном Флеттнером**

Технологию турбопарусов научились использовать и в электроэнергетике. Лопасти обычного ветрогенератора электроэнергии очень плохо крутятся при слабом ветре. А если на них одеть турбопаруса, то они будут крутиться и при слабом ветре. Удивительное явление!



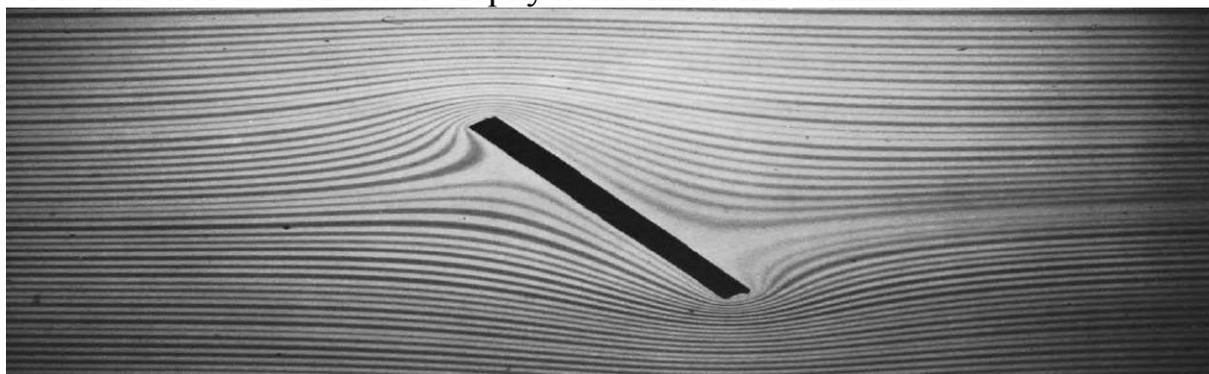
**Рис.7. Ветрогенератор электроэнергии с турболопастями**

Эффект Магнуса настолько широко распространён, что создаётся впечатление, что с его помощью можно объяснить любые гидродинамические эффекты. Именно так считал и великий русский гидромеханик Николай Егорович Жуковский. По его теории причиной возникновения подъёмной силы крыла является наличие у профиля передней толстой кромки и острой задней кромки, благодаря которым возникает циркуляция воздуха вокруг крыла. Соответственно, из-за эффекта Магнуса появляется разница давлений снизу и сверху крыла. Но экспериментальные данные не подтверждают изменения подъёмной силы с изменением формы крыла, указываемого теорией Жуковского. Парадокс теории Жуковского – теоретически коэффициент подъёмной силы должен возрастать с утолщением крыла, а в действительности он обычно убывает.



**Рис.8. Линии тока жидкости вокруг профиля**

Противоречат теории Жуковского и экспериментальные исследования течений вокруг профиля. При медленном течении жидкости линии тока плавно обходят профиль без каких-либо попыток образования циркуляции. При быстром течении жидкости у острой задней кромки начинают образовываться и срываться вихри, а циркуляции вокруг профиля нет. Более правдоподобной причиной подъёмной силы крыла является обыкновенное лобовое сопротивление гидродинамической среды. Исследования линий тока жидкости вокруг тонкой наклонной пластинки приводят к выводу, что среда уплотняется снизу наклонной пластинки и становится менее плотной сверху наклонной пластинки.



**Рис.9. Линии тока жидкости вокруг тонкой наклонной пластинки**

Аналогично с нижней стороны крыла из-за лобового сопротивления возникает повышенная плотность и повышенное давление среды. С другой стороны крыла возникает пустота и пониженное давление по причине расталкивания крылом набегающего на него воздуха. Именно по этой причине и возникает сила, выталкивающая крыло из области повышенного давления в область пониженного давления. Чем больше скорость, тем быстрее образуется пустота, тем труднее воздуху сверху крыла плавно заполнить эту пустоту. Наконец, при некоей критической скорости плавность заполнения нарушается и позади крыла возникает турбулентный поток с хаотическим перемешиванием воздуха и пустоты. Движущееся крыло скользит по более плотной поверхности среды, подобно тому, как на большой скорости водные лыжи скользят по поверхности воды. Неподвижный спортсмен тонет вместе с лыжами. Чем с большей скоростью его тянет катер, тем больше подъёмная сила водных лыж. Никакая толстая передняя кромка профиля им не нужна. И нет никакой циркуляции воды вокруг водных лыж.



**Рис.10. Иллюстрация подъёмной силы водных лыж**

Так как поверхность крыла не вращается, то нет никаких физических причин для формирования циркуляции. Скорость обтекающего потока не с чем складывать и вычитать. Соответственно, тут нет места для действия закона Бернулли. Нет физических причин для появления силы Магнуса. Миф об абсолютном распространении в гидродинамике эффекта Магнуса был опровергнут также американским математиком Г.Биркгофом (“Гидродинамика. Методы. Факты. Подобие”, 1963). Он обнаружил, что иногда поведение вращающихся тел противоречит эффекту Магнуса. Парадокс эффекта Магнуса заключается в том, что при малых скоростях вращения направление отклонения в действительности противоположно тому, которое наблюдалось Магнусом. Мало того, после изобретения нарезных орудий обнаружился эффект деривации.



**Рис.11. Деривация – отклонение пули в горизонтальной плоскости**

Биркгоф пишет, что вращающиеся снаряды имеют тенденцию отклоняться от вертикальной плоскости, в которой производится стрельба. Отклонение происходит в направлении вращения снаряда. Снаряды с правым вращением отклоняются вправо от вертикальной плоскости.

Снаряды с левым вращением отклоняются влево от вертикальной плоскости. Парадокс эффекта деривации заключается в том, что направление отклонения вращающегося снаряда уже всегда противоположно тому, которое наблюдалось Магнусом.

При тщательном рассмотрении отличий условий полёта футбольного мяча и снаряда выясняются интересные особенности. Оказывается, что эффект Магнуса возникает только тогда, когда ось вращения перпендикулярна направлению движения. А при полёте снаряда ось вращения параллельна направлению движения и поэтому для эффекта Магнуса нет условий. Более правдоподобное объяснение явления деривации дал французский математик Симеон Дени Пуассон. Снизу снаряд испытывает более сильное сопротивление, чем с других сторон, потому что под действием силы тяжести он непрерывно опускается под линией бросания по закону свободного падения тел. Снаряд падает к земле плашмя. Следовательно, на нижней стороне должно создаться большее давление, а значит и большее трение. Это и должно привести к отклонению в наблюдаемом направлении. Именно так катится круглый предмет по твёрдой поверхности. Соответственно силу, отклоняющую объект в таком направлении, можно назвать силой Пуассона, а явление деривации можно назвать эффектом Пуассона. Величина деривации тем больше, чем продолжительнее полет снаряда. Снаряд 76-миллиметровой пушки при стрельбе на 5 километров отклоняется вправо на 5 метров, а при стрельбе на 10 километров – уже на 50 метров. Отклонение происходит явно не по линейному закону, что подтверждает версию Пуассона. Свободное падение снаряда под действием сил гравитации происходит с ускорением. Соответственно, давление на нижнюю поверхность и трение снаряда об воздух увеличиваются с ускорением. Соответственно, в проекции на вертикальную плоскость, перпендикулярную плоскости бросания, снаряд катится вбок с ускорением, как с твёрдой наклонной плоскости.



**Рис.12. Круглое тело катится по наклонной плоскости с ускорением**

Вернёмся теперь к парадоксу эффекта Магнуса. Движущиеся вращающиеся сфера или цилиндр отклоняются от траектории движения в сторону, где совпадают направления потоков среды и присоединённого вихря. Интенсивность присоединённого вихря зависит от скорости вращения твёрдого тела и от его площади соприкосновения с присоединённым вихрем. Именно поэтому при малых скоростях вращения

твёрдого тела отклонение от траектории движения происходит согласно силе Пуассона совсем в противоположную сторону. Точно такой же эффект наблюдается при бросании в горизонтальной плоскости плоского тонкого диска (малая площадь соприкосновения). Для такой броски можно использовать старую грампластинку или современный компакт-диск. При бросании правой рукой диск раскручивается по часовой стрелке (если смотреть сверху). Казалось бы, согласно эффекту Магнуса, траектория диска должна поворачивать направо. Но лично мне ни разу не удалось заставить так лететь диск. Он упрямо поворачивает налево. При большой скорости вращения диск долго летит прямо (относительно вертикальной плоскости), но в самом конце пути, потеряв скорость вращения, он сворачивает влево и приземляется.

Подведём итоги. Получается, что любой движущийся в плоскости вращения вращающийся объект ведёт себя по-разному в разных условиях: либо поворачивает направо, либо поворачивает налево, либо летит прямо. Такое возможно только в том случае, если одновременно существуют две силы смещения, действующие в противоположных направлениях. Если силы равны, то вращающееся тело летит прямолинейно. В противоположном случае тело поворачивает в сторону действия большей силы. Одна сила широко известна. Это сила Магнуса. Вторая сила – малоизвестная сила Пуассона, вызывающая эффект деривации. Необходимым условием для существования силы Пуассона является наличие разницы в плотности среды с противоположных сторон объекта. Разница может возникнуть либо при естественном градиенте плотности среды, либо при лобовом сопротивлении однородной среды. В первом случае эффект будет тем больше, чем больше градиент среды. Во втором случае эффект проявляется только тогда, когда циркуляция мала. Лобовое сопротивление среды создает эффект местного повышения плотности с одной стороны объекта. Но циркуляция обладает эффектом размывания повышенной плотности. Чем больше циркуляция, тем больше эффект размывания, тем более однородна плотность вокруг объекта. Эффект размывания мал, если линейная скорость поверхности вращающегося объекта намного меньше его поступательной скорости движения. Сила Магнуса будет возникать, когда эти скорости соизмеримы, одного порядка величины. При полном равенстве сил смещения вращающийся объект будет двигаться прямолинейно. Наконец, сила Магнуса будет преобладать абсолютно над силой Пуассона, если линейная скорость поверхности вращающегося объекта намного больше его поступательной скорости движения. В этом случае вокруг вращающегося объекта возникает сильная циркуляция однородной среды с одинаковой плотностью. При абсолютном доминировании какой-либо силы траектория вращающегося объекта в плоскости вращения должна быть похожа на окружность.