

1925 г.

Т. V, ВЫП. 1—2.

# УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК.

ЭФФЕКТ МАГНУСА И ВЕТРЯНОЙ КОРАБЛЬ<sup>1)</sup>.

Л. Прандтль.

## I.

Ветряной корабль Флеттнера у всех на устах благодаря необычайно ревностной газетной пропаганде. В связи с этим гидродинамика, которая до сих пор вела скромное существование в кругу узких специалистов, приобрела внезапно всеобщий интерес. „Ротор Флеттнера“ обладает такими удивительными свойствами, которые никак нельзя объяснить простыми представлениями о ветряном давлении; достаточно сказать, что силовые действия на врачающийся цилиндр должны быть в 10—15 раз больше, чем на парус с такой же видимой поверхностью.

Современная гидродинамика не только может вполне объяснить это на первый взгляд загадочное явление, но она явила планомерной путеводительницей при открытии больших силовых действий вращающегося цилиндра. Законы гидродинамики недостаточно известны в широких кругах, они являются, однако, в значительной мере предпосылкой правильного объяснения процесса. Поэтому я с удовольствием пользуюсь этим случаем, чтобы на примере данного явления посильно ввести читателя в учение о движении жидкостей и газов.

Но прежде всего мы немного остановимся на истории открытия указанного замечательного явления. Эффект впервые замечен не на цилиндре, а на вращающемся шаре, брошенном в воздух. Отклонения линии полета такого шара от обычной траектории брошенного тела уже вначале замечены артиллеристами и любителями игры в мяч.

Еще в те времена, когда стреляли настоящими круглыми „ядрами“, артиллеристы обратили внимание на неправильные отклонения от обычной траектории снаряда. Робинс (B. Robins) еще в 1742 г. предположил, что такие отклонения связаны с вращением ядра.

<sup>1)</sup> Перевод из журнала „Die Naturwissenschaften“ (6 февраля 1925 г.). Статья является расширенным докладом автора, сделанным на заседании Геттингенского физического общества 17 ноября 1924 г.

Впоследствии он привел и опытное доказательство этого. Для регулирования таких совершенно неправильных вращений около 1830 г. стали применять ядра с эксцентрически расположенным центром тяжести. При стрельбе такими эксцентрическими ядрами обнаружили, что „недолет“ получался в том случае, когда ядро закладывалось в орудие центром тяжести вниз; давление порохового газа приложено к центру тяжести ядра, поэтому получалось вращение шара сверху вперед и вниз. Если ядро закладывали центром тяжести вверх, то систематически получался „перелет“. Соответственно, если центр тяжести располагался вправо, при полете снаряда получались отклонения вправо, при „левом“ расположении снаряда — отклонения были влево. Опыты стрельбы через несколько поставленных одна за другую мишней показали, что эти боковые отклонения не могут быть объяснены боковыми ударами при выходе из ствола орудия, так как траектория ясно искривлена в сторону и, следовательно, снаряд постоянно отклоняется воздушными силами.

Для определенного решения этого вопроса известный берлинский физик Магнус, учитель Гельмгольца, произвел в 1852 г. некоторые лабораторные опыты<sup>1)</sup>. Один из таких опытов заключался в следующем. Латунный цилиндр мог вращаться между двумя остриями; быстрое вращение цилинду сообщалось, как в волчке, шнуром. Вращающийся цилиндр помещался в раме, которая в свою очередь легко могла поворачиваться. На эту систему пускалась сильная струя воздуха при помощи маленького центробежного насоса. Цилиндр отклонялся в направлении, перпендикулярном к воздушной струе и к оси цилиндра, при том в ту сторону, с которой направления вращения и струи были одинаковы. Направление отклонения было такое же, как и в артиллерийских опытах, величину отклоняющей силы Магнус не измерял; он полагал, однако, что порядок этой величины такой же, как и при отклонении сферических снарядов<sup>2)</sup>. С этих пор принято всю группу явлений называть „эффектом Магнуса“. Таким образом заслуга Магнуса, впервые выяснившего явление в лабораторной обстановке, оценена по достоинству.

Впрочем, еще раньше артиллеристов отклонение вращающихся шаров заметили игроки в мяч. При игре в теннис это явление очень заметно, и всякому опытному игроку известно, что „срезанный мяч“ заметно отличается по своей траектории от не срезанного<sup>3)</sup>. Если

<sup>1)</sup> Ср. P. Pringsheim.—Naturwissenschaften, 13, 49, 1925.

<sup>2)</sup> В той же работе Магнус излагает опыты с вращающимися продолговатыми снарядами и приводит теоретические соображения по этому поводу. В популярных заметках, которые теперь часто можно найти в газетах, эти опыты, не имеющие ничего общего с „эффектом Магнуса“, иногда смешиваются в одну кучу.

<sup>3)</sup> По Уокеру, уже в 1671 г. Ньютон упоминает о том, что срезанный теннисный мяч описывает пространственную кривую.

ударить справа косо по мячу, то он отклоняется влево от плоскости, определяющей его первоначальное направление, и обратно. Мячи, ударяемые снизу, летят дальше, ударяемые сверху — ближе, чем следовало бы по их нормальной траектории. Еще удивительнее, по Уокеру, (Walker) явления, наблюдаемые при игре в гольф. В этом случае мяч, ударяемый снизу, летит в течение значительно большего времени и на большем пути, чем это следовало бы по законам падения на основании начальной скорости; при этом первая часть траектории заметно вогнута кверху. При неправильном (боковом) ударе отклонения в сторону от вертикальной плоскости, определяемой начальной скоростью, могут достигать 70 м. Эффект Магнуса легко демонстрировать без особых приспособлений в аудитории или комнате. Для этого можно, например, воспользоваться длинным цилиндром, склеенным из бумаги. Его бросают, сообщая ему одновременно сильное вращение (лучше всего бросать вперед, держа руку так же, как при игре в кегли, траектория должна быть подобной той, которая изображена на рис. 2). Явление особенно ясно, если цилиндр очень длинный; при этом рекомендуется на концах цилиндра наклеить картонные кружки, которые, с одной стороны, увеличивают его жесткость и облегчают вращение, а с другой стороны, — являются и аэродинамическим усовершенствованием. В середине цилиндра оставляется маленький бумажный выступ, за который захлестывается шнур с двумя концами, как изображено на рис. 1. Концы шнура прикрепляются к деревянной палке. Если намотать веревку и отпустить цилиндр, то он отклоняется в сторону, как изображено на рисунке. Бумажная трехгранная призма (в данном случае с картонными кружками на концах) так же очень ясно обнаруживает такое вращение, если ее пустить, поддерживая концами пальцев одной руки и сообщая вращение пальцем другой руки в месте, указанном на рис. 2 стрелкой<sup>1)</sup>.

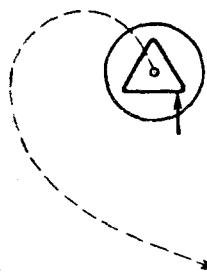


Рис. 2. Опытное доказательство явления Магнуса (второй опыт).

на концах) так же очень ясно обнаруживает такое вращение, если ее пустить, поддерживая концами пальцев одной руки и сообщая вращение пальцем другой руки в месте, указанном на рис. 2 стрелкой<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Во время доклада опыты демонстрировались.

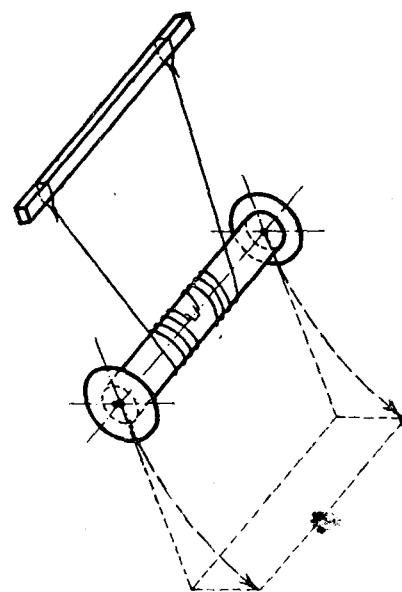


Рис. 1. Опытное доказательство явления Магнуса.

цилиндра наклеить картонные кружки, которые, с одной стороны, увеличивают его жесткость и облегчают вращение, а с другой стороны, — являются и аэродинамическим усовершенствованием. В середине цилиндра оставляется маленький бумажный выступ, за который захлестывается шнур с двумя концами, как изображено на рис. 1. Концы шнура прикрепляются к деревянной палке. Если намотать веревку и отпустить цилиндр, то он отклоняется в сторону, как изображено на рисунке. Бумажная трехгранная призма (в данном случае с картонными кружками на концах) так же очень ясно обнаруживает такое вращение, если ее пустить, поддерживая концами пальцев одной руки и сообщая вращение пальцем другой руки в месте, указанном на рис. 2 стрелкой<sup>1)</sup>.

## II.

Теперь перейдем к опытам, объясняющим явление. В артиллерийских кругах в старые времена были склонны объяснять явление так, что вращающийся шар испытывает большее трение со стороны „сжатой воздушной подушки“, находящейся перед шаром, в результате чего и получается отклонение в сторону. Пуассон доказал, однако, что воздушное трение совершенно недостаточно для объяснения явления. Упомянутые выше опыты с эксцентрическими шарами показывают, что в действительности отклонение происходит как раз в обратную сторону, чем следовало бы по „теории подушки“.

В связи со своими опытами Магнус предложил объяснение, которое хотя и делает явление несколько понятным, но теперь уже не может считаться удовлетворительным; в то время гидродинамика находилась еще в примитивном состоянии<sup>1)</sup>. Значительно больше дает толкование, опубликованное в 1877 г. лордом Рэлеем в связи с вопросом о траектории срезанных теннисных мячей. Гидродинамика к этому времени получила значительное развитие в работах Гельмгольца, сэра В. Томсона и других, правда, почти исключительно для случая „идеальной жидкости“ без трения и сжимаемости. Расчеты лорда Рэлея относятся к потоку такой идеальной жидкости около бесконечного в осевом направлении круглого цилиндра. Рэлей рассматривает состояние потока, когда на обычный „поток потенциальный“ налагается „циркуляционный поток“; он вычисляет силу, производимую на цилиндр из распределения давления около цилиндра. Лорд Рэлей сам указывает слабый пункт своей теории; расчеты справедливы только для жидкости без трения. По теореме Томсона, однако, в отсутствии трения вихревое движение не может возникнуть, или если оно существовало, то не может измениться. Таким образом возникновение потока, которое очевидно должно быть связано с тре-

<sup>1)</sup> Магнус исходит прежде всего из того, что воздушная струя, направленная перпендикулярно к оси покоящегося цилиндра, вызывает такое изменение давления, что пламя свечи или маленький бумажный флагок поворачиваются к цилиндру. Разумеется эти индикаторы должны быть расположены вне струи, так что последняя должна быть очень тонкой. Отсюда Магнус заключает, что „движение воздуха вдоль поверхности цилиндра не сопровождается, как это принято думать, увеличением давления около поверхности, но, наоборот, уменьшением давления в направлении, перпендикулярном к воздушному потоку, при чем уменьшение давления тем значительнее, чем больше скорость струи“. Далее Магнус заключает: „Если цилиндр не вращается, то уменьшение давления одинаково с обеих сторон. Если же происходит вращение, то с той стороны цилиндра, где направление вращения и скорости струи совпадают, уменьшение давления будет сильнее, чем с другой стороны“. С этой стороны Магнус наблюдал как бы воздушную „запруду“ и поэтому предположил наличие такого же избыточного давления, которое наблюдается при встрече двух противоположно направленных водяных струй.

нием жидкости, оставалось темным. Во всяком случае расчеты Рэлея очень поучительны, и для нас будет полезным заняться несколько подробнее теорией движения идеальной жидкости; такие реальные жидкости, как вода и воздух, обладают небольшим внутренним трением, так что в благоприятных случаях выводы о характере движения идеальной жидкости могут давать приблизительное представление о поведении жидкости реальной. Вопрос о том, „благоприятный случай“ перед нами или нет, требует, разумеется, еще особого исследования. К этому мы вернемся позднее.

Обычно исследуемые потоки в идеальной жидкости, вызываемые движением тел в первоначально покоящейся жидкости или давлениями на поверхности, имеют тот же геометрический характер, как потоки электричества в однородном телесном проводнике, или как магнитное поле в пространстве с неизменной проницаемостью.

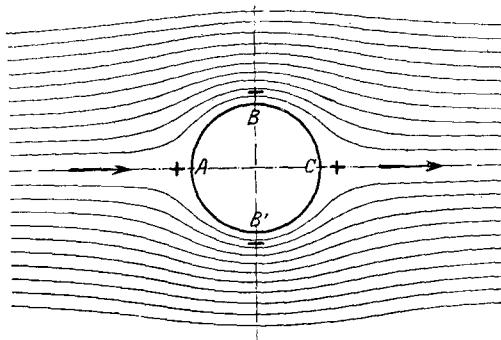


Рис. 3. Потенциальный поток около прямого цилиндра.

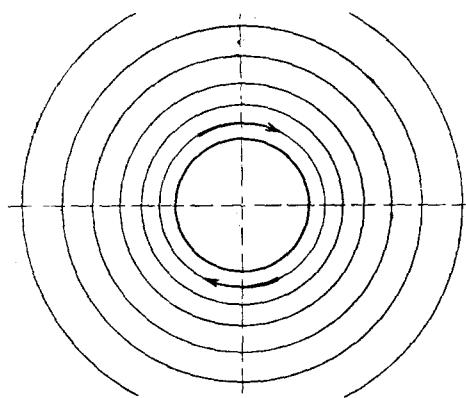


Рис. 4. Циркуляционное обтекание круглого цилиндра.

как на рис. 3, можно получить, пропуская электрический ток через жестянную пластинку с круглым отверстием в центре. При этом нужно представить себе, что по краям плохо проводящей жести припаяны хорошо проводящие медные полоски, через которые и подводится ток. Электрический аналог потока, изображенного на рис. 4, можно получить, только прорезав жестянную пластинку с круглым отверстием вдоль одного из радиусов; подводящие ток медные шины должны быть

Говоря специальным языком, эти движения могут быть выведены из потенциала, удовлетворяющего дифференциальному уравнению Лапласа. Существенным признаком такого потенциального потока является отсутствие вращений отдельных элементов жидкости. Это тесно связано с отсутствием трения: без помощи трения частица жидкости не может начать вращаться.

Оба потока, из которых исходит Рэлей, представлены на рис. 3 и 4. Поток такого же типа,

при этом припаяны по краям образовавшейся щели справа и слева. Магнитное поле типа рис. 4, напротив, хорошо известно. Если электрический ток идет перпендикулярно к поверхности рисунка через центр круглого отверстия, то магнитное поле будет как раз такое, как на рис. 4.

Поток, который рассматривает Рэлей, — результат наложения, суперпозиции обоих потоков (рис. 3 и 4). В этом потоке скорости в каждой точке получаются сложением по правилу параллелограмма обеих отдельных скоростей. Потенциал получается простым сложением обоих значений потенциала в каждой точке пространства. Система линий потока может быть найдена, если обе отдельные системы линий начертить так одна га другой, чтобы количества жидкости, проходящее одним и тем же, результирующие линии тока получатся в виде диагональных кривых, рис. 5. Сматря по интенсивности вихревого движения, наложение потоков (рис. 3 и 4) приводит к различным формам; одна из таких форм для случая умеренного вращения изображена на рис. 6, другая, для более сильного вращения, — на рис. 7.

Для понимания того, что достигается такими потоками, мы должны заняться распределением давления в текущей идеальной жидкости. Прежде всего, давление в одной и той же точке одинаково по всем направлениям, как и в случае покоящейся жидкости, но давление в двух различных точках, вообще говоря, разное. Мы не будем принимать во внимание собственного веса жидкости, понимая под давлением, о котором идет речь, только разницу

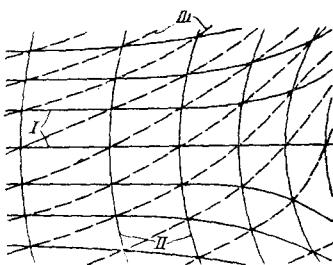


Рис. 5. Наложение двух потоков. Из систем линий I и II возникает система III диагональных кривых.

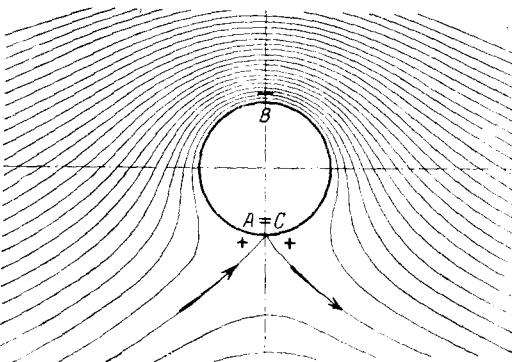
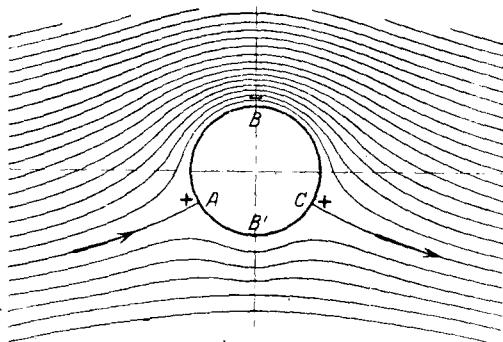


Рис. 6 и 7. Циркуляционные потоки, возникающие при наложении потоков рис. 3 и 4.

давлений в случае движения жидкости и покоя. Эта разница может быть положительной и отрицательной, поэтому мы будем говорить об увеличенном и уменьшенном давлении. Если на пути от некоторой точки  $A$  к точке  $B$  одной и той же линии тока давление постоянно уменьшается, то каждая частица жидкости имеет за собою большее давление, чем впереди, поэтому она будет продвигаться, ускоряясь в сторону уменьшающегося давления. Если в точке  $A$  уже имелась некоторая скорость по направлению к  $B$ , то эта скорость будет постоянно возрастать на пути к  $B$ ; если, наоборот, частица жидкости в  $B$  обладает значительной скоростью по направлению к  $A$ , то эта скорость будет замедляться вследствие противоположной разницы давления (у такой точки давление впереди все время больше, чем сзади). Следовательно и в этом случае скорость больше в точке  $B$ , где давление меньшее, чем в  $A$ . Расчет для стационарного, т.-е. неизменяющегося со временем, потока в идеальной жидкости приводит к такому соотношению: сумма давления  $p$  и величины  $\rho \frac{v^2}{2}$  ( $\rho$  — плотность, масса единицы объема,  $v$  — скорость) вдоль линии тока постоянна. Это соотношение, установленное в 1738 г. Д. Бернулли и часто называемое „теоремой Бернулли“, разумеется, тесно связано с законом сохранения энергии в механике точки. Пусть по гладкой впадине (рис. 8) скатывается шар; в самом глубоком месте впадины скорость его будет наибольшей, в самом высоком — наименьшей, при чём  $h + \frac{v^2}{2g} = \text{const.}$  ( $g$  — ускорение силы тяжести).

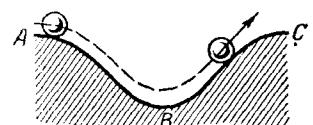


Рис. 8. Движение шара под действием силы тяжести.

Как и следовало ожидать, давление в потоке играет такую же роль, как высота  $h$  в данном случае.

В стационарных потоках с потенциалом, кроме того, сумма  $p + \rho \frac{v^2}{2}$  постоянна не только вдоль некоторой линии потока, но и во все области потока.

Мы применим это теперь к потокам на рис. 3, 6 и 7. В точке  $A$  этих потоков жидкость на мгновение совершенно останавливается, следовательно, по теореме Бернулли, давление здесь должно быть наибольшим, — на величину  $\rho \frac{V^2}{2}$  больше, чем в невозмущенном потоке.

(Здесь — скорость невозмущенного течения относительно тела, или, иначе, скорость тела, или, иначе, скорость тела относительно покоящегося воздуха). В области точки  $B$ , где линии тока сгущаются больше всего и где, следовательно, наибольшая скорость, давление должно быть наименьшим. В точке  $C$  давление так же велико, как и около  $A$ . В симметричном потоке (рис. 3) давление в  $B'$  такое же,

как и в  $B$ , напротив, в несимметричных потоках, рис. 6 и 7, давление в  $B$  значительно меньше, чем в  $B'$ , в результате чего существует сила в направлении  $B'B$ , которая и есть сила Магнуса. Из распределения давлений во всех трех потоках нельзя обнаружить сопротивления в направлении движения. Это обстоятельство связано с заменой реальной жидкости идеальной: для преодоления сопротивления должна быть затрачена работа, эквивалентом которой может быть только кинетическая энергия жидкости. Если же поток одинаков, как впереди тела, так и за ним, то указанной кинетической энергии, а следовательно, и сопротивления здесь не может быть. Впрочем, расчеты Рэлея, а следовательно, и наши последние соображения справедливы только в отношении очень длинного цилиндра, в котором можно не обращать внимания на состояния на концах. Для короткого цилиндра это уже недопустимо. Здесь можно только упомянуть, что и в идеальной жидкости при вращательном движении на концах цилиндра появляется кинетическая энергия, связанная с вихрем; она остается в потоке, и здесь возникает соответствующее сопротивление (так называемое наведенное сопротивление так же, как у подъемных крыльев). Отсюда позволительно заключить, — и опыты это подтверждают, — что эффект Магнуса полностью может наблюдаться только у весьма длинных цилиндров; с короткими цилиндрами и шарами эффект наблюдается в форме, сильно искаженной вихревым движением<sup>1)</sup>. Все старые наблюдения производились с относительно короткими телами, измерения в Геттингене в 1923 были впервые сделаны на достаточно длинных цилиндрах.

Здесь уместны еще два замечания. Во-первых, рассмотренные распределения давления можно хорошо представить себе и таким образом. Если частица жидкости движется по искривленной линии потока, то легко понять, что для этого на частицу должна действовать сила, отклоняющая ее к вогнутой части пути. Отсюда следует, что давление на выпуклой стороне должно быть несколько больше, чем на вогнутой. Можно также сказать, что частица в своем стремлении двигаться прямолинейно нажимает на выпуклую сторону, и, следовательно, появляется „центробежная сила“. Проследив эти разности давлений в направлении поперечном к линиям тока до области невозмущенного течения, где давление выравнивается, мы снова найдем, что в области  $A$ , где линии тока наиболее выпуклы в сторону

<sup>1)</sup> Приведено в моей теории подъемных крыльев (второе сообщение, Göttinger Nachr. 1919, 134) в формуле (68) выражение для уменьшения напора величины  $W_{\text{вг}} \delta$  ( $\delta$  — угол между направлением ветра и направлением оси вихря,  $W$  — наведенное сопротивление) может быть для коротких цилиндров столь значительным, что при увеличении циркуляции (ср. ниже) напор снова уменьшается или даже становится отрицательным. Это явление можно объяснить на основании засасывающей силы вихря в направлении оси последнего.

цилиндра, имеется избыток давления, в области же  $B$ , где линии наиболее вогнуты к цилиндру, имеется уменьшенное давление. Если произвести количественный расчет на основании этого представления, то получатся такие же давления, как и по теореме Бернулли, что ясно из внутренней связи этого представления с теоремой Бернулли.

Второе замечание относится к величине силы Магнуса. На основании распределения давлений Рэлей находит формулу, согласно которой эта сила пропорциональна произведению скорости  $V$  цилиндра относительно невозмущенной жидкости и скорости кругового потока  $U$  (рис. 4). Для отрезка мысленного „бесконечно длинного“ цилиндра  $l$ , радиуса  $r$ , эта сила

$$P = \rho V U \cdot 2\pi r l,$$

где  $\rho$  — плотность жидкости.

Часто ошибочно смешивают скорость кругового потока  $U$  с периферической скоростью вращающегося цилиндра. Связь этих скоростей заранее не определена и вообще не простая; пока ее приходится находить из опыта. В частности, на рис. 6  $U = V$ , на рис. 7  $U = 2V$ .

Следует заметить, что формула Рэлея является частным случаем формулы Жуковского (1906 г.)

$$P = \rho V \Gamma l,$$

которая применима для всех случаев, когда поток вызывает боковую силу, т.-е. для подъемных крыльев, парусов и т. д.  $\Gamma$  при этом „циркуляция“, получающаяся следующим образом: каждый линейный элемент любой замкнутой кривой, окружающей предмет вызывающий силу, умножается на компонент скорости в его направлении, эти произведения складываются (интегрируются). Такая „циркуляция“ обладает замечательными свойствами в случае потенциального потока. В обычных потоках, как, например, на рис. 3, она равна нулю для любой замкнутой кривой; для круговых потенциальных потоков типа, изображенных на рис. 4, 6 и 7, „циркуляция“ для всякой замкнутой кривой на обнимающей тела так же равна нулю, но для любой кривой, один раз охватывающей тело, она имеет конечную величину, так что значение ее  $\Gamma$  является мерой для кругового потока. Пусть на рис. 4 радиус произвольной круговой линии тока равен  $r$ , скорость  $u$  надо брать полностью, так как она совпадает по направлению с линейным элементом, следовательно, в данном случае  $\Gamma = 2\pi r u$ ; величина  $\Gamma$  постоянна, поэтому  $u$  должно быть обратно пропорциональным расстоянию  $r$ .

Понятие о циркуляции дает возможность точнее формулировать только мимоходом указанную выше важную теорему В. Томсона. Эта теорема гласит, что в однородной жидкости без трения

циркуляция, взятая по любой линии, постоянно состоящей из одних и тех же частиц жидкости, не может изменяться со временем. Эта теорема при указанных условиях сохраняет силу не только для „потенциальных движений“, но и для любых вихревых движений. Если сначала двигать цилиндр без вращения, то не возникает никакого циркуляционного движения (рис. 3), но если затем привести цилиндр во вращение, то совершенно неясно, каким же образом внезапно, вопреки теореме Томсона, может возникнуть циркуляция. Таким образом положение дела, несмотря на очень удовлетворительную картину потока и распределений давления, совершенно безнадежно с точки зрения идеальной жидкости; остается непонятным, как может возникнуть вращательное движение жидкости.

Если внимательнее присмотреться, то и наше решение для простого обтекания невращающегося цилиндра (рис. 3) не многим удаляетворительнее. Известно, что в действительной жидкости такой цилиндр движется вовсе не без сопротивления, и формы потока в реальной жидкости совершенно отличны от изображенных на рис. 3, в действительности за цилиндром возникают вихревые движения. В дальнейшем увидим, что объяснение отклонения простого потока с сопротивлением от идеальной картины (рис. 3) дает также ключ к объяснению эффекта Магнуса.

### III.

Можно указать причину беспомощности теории идеальной жидкости в отношении указанных проблем. Силы трения таких мало вязких жидкостей, как вода и воздух, ничтожны внутри жидкости, ими можно пренебречь в сравнении с силами инерции; но в тонких слоях непосредственно на поверхности погруженных тел, или твердых тел, эти силы становятся такого же порядка величины, как и силы инерции. Если представить себе, что трение (вязкость) жидкости непрерывно уменьшается, то специфические проявления трения на поверхности не уменьшаются, суживается только толщина соответствующего слоя.

В наличии такого слоя убедиться не трудно, все опытные измерения с вязкими жидкостями показывают, что слой, непосредственно примыкающий к телам, как бы пристает к ним, т.-е. находится относительно них в покое. Следующие слои перемещаются один относительно другого, так что скорость слоя, более удаленного от стенки, больше, чем у слоя, ближе расположенного к ней. Таким образом вокруг тела или стенки образуется зона, в которой скорость меняется от нуля непосредственно около стенки до скорости свободного потока, на которую трение не оказывает влияния. Такой переход скоростей осуществляется благодаря силам трения; эти силы, рассчитанные

на единицу объема того же порядка величины, как и силы давления, вызываемые действиями инерции свободной жидкости, скорости в зоне трения отличаются на конечные значения от скоростей свободной жидкости. Характер распределения скоростей в зоне трения изображен на рис. 9. „Толщина“  $\delta$  этой зоны может считаться равной примерно  $1/50 - 1/100$  диаметра цилиндра, в зависимости от большей или меньшей вязкости<sup>1)</sup>.

Далее, очевидно, возникает вопрос о законах движения в этой зоне трения или „пограничном слое“, как говорят специалисты (выражение не совсем удачное, но принятое, поэтому мы будем им пользоваться). Эти законы в значительной мере доступны вычислению, но сами вычисления очень затруднительны.

Наиболее важные результаты можно, однако, понять из качественного рассмотрения. На частицы в „пограничном слое“, с одной стороны, как и в свободной жидкости, действуют ускоряющие или замедляющие разности давления, с другой — они тормозятся трением у стенки. На конкретном примере посмотрим, что получается при таком взаимодействии. Выберем для этого начало движения круглого цилиндра, до сих пор находившегося в покое<sup>2)</sup>. Для свободной жидкости с достаточной точностью применимы законы идеальной жидкости. Согласно нашему предположению в начале все находилось в покое, поэтому вначале для всякой замкнутой линии циркуляция равна нулю и должна оставаться и далее равной нулю для всех линий, образованных одними и теми же частицами жидкости. Поэтому вначале, независимо от того, начинает ли двинувшийся цилиндр вращаться или нет, возможен только потенциальный поток типа рис. 3 без циркуляции, обладающей, как мы видели выше, таким свойством. Положим, что цилиндр не вращается, и изучим зону трения. Если ускорение в течение меняющихся условий давления вполне достигнуто и цилиндр движется равномерно, то в A и C (рис. 3), как говорилось выше, имеется повышенное давление, в B — пониженное. На пути от A к B частицы свободного потока приобретают кинетическую энергию и раstra-

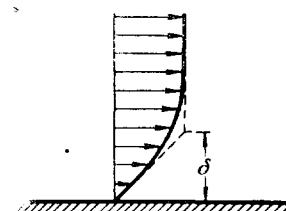


Рис. 9. Распределение скоростей около стенки.

<sup>1)</sup> Правильной мерой этой толщины является число Рейнольдса  $\Re = \frac{V \cdot d}{v}$ , где  $v = \frac{\eta}{d}$  кинематическая вязкость ( $\eta$  — мера вязкости,  $d$  — диаметр цилиндра). Величина  $\frac{\delta}{d}$  того же порядка величины, как  $\frac{1}{\sqrt{\Re}}$ .

<sup>2)</sup> Задачи такого рода разрешимы только в том случае, если в начальном состоянии известны скорости всех частиц. В этом смысле простейшее начальное состояние — состояние совершенного покоя.

чивают ее снова на пути от *B* к *C*. Но в пограничном слое вследствие трения о стенку частицы теряют часть своей кинетической энергии и не способны уже разбежаться так, чтобы проникнуть в область высокого давления у *C*, они останавливаются и вследствие падения давления от *C* к *B* возвращаются обратно. Соотношения здесь такие же, как для шара, в волнообразном канале (рис. 8), если бы он несколько тормозился трением; не достигнув *C*, шар повернет обратно. В пограничном слое условия несколько иные, чем у катящегося шара, потому что (об этом у нас еще не было речи) свободная жидкость оказывает на пограничный слой некоторую силу, проталкивающую его вперед. Благодаря этой силе, между прочим, попятное движение меньше, чем оно было в ее отсутствии<sup>1)</sup>.

В частности получается следующее: наиболее тормозящиеся внутренние слои сначала идут в обратную сторону, соседние слои следуют за ними, и только самые внешние слои зоны трения увлекаются дальше внешним потоком. Пограничный слой у *B* задерживает все новые и новые количества жидкости, которые также идут обратно; таким образом между *B* и *C* образуется уплотненный клубок жидкости, получающей вращение, вследствие трения; этот клубок под влиянием разности давлений движется к *B* и, сталкиваясь с продвигающимся вперед потоком, входит в свободную жидкость в виде „вихря“. Таким образом постепенно благодаря незаметным процессам в пограничном слое поток совершенно изменяется. Поток совершенно отрывается вблизи *B* от стенки, образуя все новые вихри; между ним и стенкой остается область с неправильным слабым движением.

Несколько снимков, полученных мною лет двадцать тому назад, когда я впервые занялся этими вещами, при помощи примитивных приборов могут иллюстрировать процесс более наглядно. В небольшом канале течет вода, приводимая в движение колесом с лопастями; в воде взмучены частицы железного блеска. Это — красный минерал, состоящий из тонких блестящих листочек; при вихревом движении воды чешуйки ориентируются в различных частях вихря по-разному и вызывают различное отражение солнечного света. На рис. 10, 11 и 12 изображены три различных состояния потока вокруг цилиндра; первая картина соответствует очень короткому пути, вторая — несколько более длинному, и третья — еще более длинному. На рис. 13 изображено уставновившееся состояние, которое характеризуется колебательным движением вихревого следа.

Тогда же, 20 лет тому назад, я мог дать и наглядное доказательство того, что причиной образования вихря являются процессы

<sup>1)</sup> Для тел, имеющих вытянутую форму в направлении потока, эта проталкивающая сила может значительно превосходить силу, вызывающую попятное движение. Тогда вихри не образуются, и сопротивление проявляется только в виде трения. Примеры: форма рыбы, воздушного корабля, обычные подъемные крылья.

в пограничном слое. Если в том месте, где впервые образуется обратный поток сделать прорез в цилиндре, через который можно непрерывно отсасывать воду, то этим способом можно удалять затормозившуюся

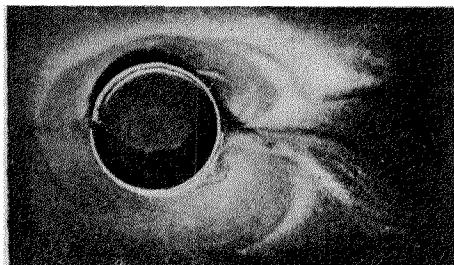


Рис. 10.

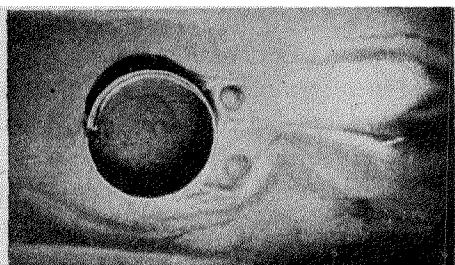


Рис. 11.

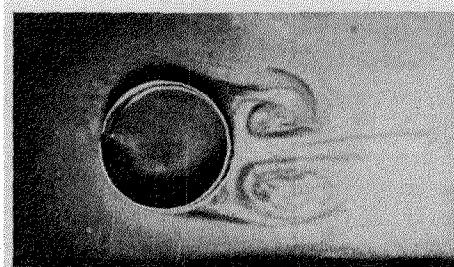


Рис. 12.

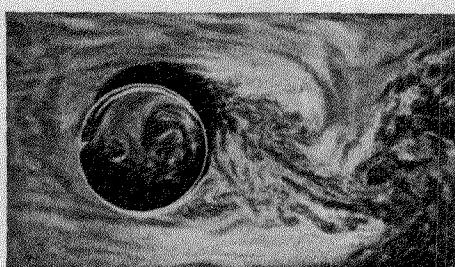


Рис. 13.

Рис. 10 — 13. Поток около круглого цилиндра в различных фазах развития.

жидкость прежде, чем она начнет обратное движение. Действие такого отсасывания видно на рис. 14 и 15. На рисунках можно заметить конец каучуковой трубки, отводящей отсасываемую воду; с той стороны цилиндра, где производится откачивание, вихрь не образуется, и поток,

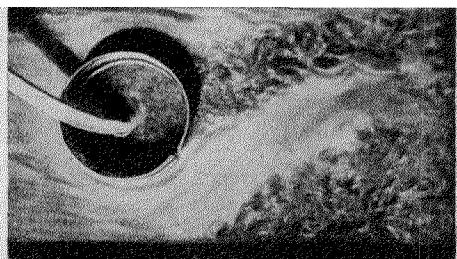
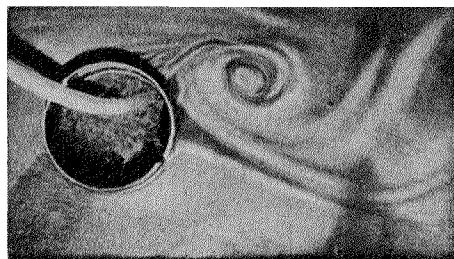


Рис. 14—15. Поток вокруг цилиндра с отсасыванием.

не отрывается. Замечательно еще, что отрыв потока, отсутствующий теперь у цилиндра, происходит у прямых стенок канала.

Условие отрыва потока связано в данном случае не с выпуклой формой стенки, как у цилиндра, но с тем, что без этого отрыва

наступило бы замедление движения (сопровождающееся повышением давления). Если обстоятельства складываются так, что у прямой стенки такое повышение давления должно возникнуть, то появляется и обратный поток, затем вихрь и затем отклонение потока от стенки. Следует еще обратить внимание на то, что начало образования вихря у стенки канала намечается уже на рис. 14 в месте *a*. Если бы здесь в стене сделать щель, то можно было бы воспрепятствовать отрыву, в таком случае здесь получилось бы постоянное повышенное давление и замедление потока<sup>1)</sup>.

Опытов с вращающимся цилиндром я тогда неставил. По внешним причинам (осенью 1904 г. я переселился из Ганновера, где про-



Рис. 16. Два цилиндра, вращающиеся в противоположные стороны.

изводились описанные опыты, в Геттинген; здесь сначала у меня были другие задачи; кроме того, надо было сызнова соорудить установку, подобную ганноверской) только позднее я вернулся к опытам с водяными потоками (начиная с 1907 г.) и исследовал, между прочим, поток около двух цилиндров, вращающихся в противоположных направлениях и прикасающихся друг к другу в потоке. В этом случае можно было ожидать, что при достаточной скорости цилиндров образование вихрей и отрыв потока прекратится, так как здесь при трении о стенки, двигавшиеся вместе с потоком, жидкость не замедляется, а в крайнем

<sup>1)</sup> В последнее время в руководимом мною экспериментальном институте вновь начаты опыты с отсасыванием у стенок. Обнаружилось, что если расположить по стенке много тонких щелей, через которые жидкость отсасывается в небольших количествах, то получается ряд потоков, очень сильно отличающихся от обычных (так, например, отклонение воздушного потока на 180° при отсасывании в трубе). Ясно, что метод отсасывания применим во всех случаях, когда нужно избежнуть отрыва. Например, для подъемных крыльев, парусов, турбин, пропеллеров, корабельных корпусов, рулей турбинных труб, диффузоров и т. д.

случае, наоборот, ускоряется. Опыт это подтвердил. Стенки и дно канала были покрыты движущимися полотнами, так что и здесь отрыв потока избегался. Эти полотна, двигавшиеся посредством валов, вызывали, однако, сильное искажение движения. Снимок такого потока дан на рис. 16<sup>1)</sup>). В связи с этими опытами в одном случае исследовался также и один вращающийся цилиндр, хотя в то время этому опыту не придавалось особого значения. На рис. 17 воспроизводится единственный сохранившийся снимок. Эти снимки получались по методу проф. Альборна в Гамбурге при освещении электрической искрой и были технически очень несовершенными. Позднее техника съемки была значительно улучшена. На рис. 18—21 воспроизводится ряд сним-

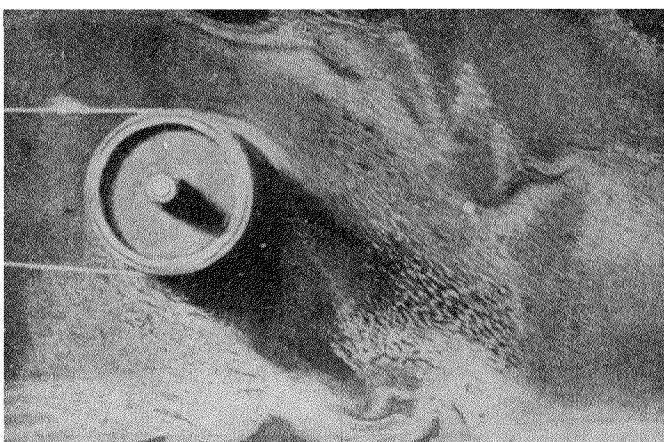


Рис. 17. Вращающийся цилиндр.

ков, полученных Рубахом (Rubach) в 1913—14 г. Они очень ясно показывают процессы отрыва около круглых цилиндров. Сначала существует потенциальный поток, только в очень узкой зоне заметны начатки обратного потока. Но быстро нарастает пара вихрей; в том месте, где они касаются цилиндров, они вызывают вторичные процессы отрыва и вихря. Эти вторичные вихри все более усложняют картину, которая становится неправильной и наконец обращается в колеблющийся поток, сопровождающийся образованием новых вихрей. Снимков потоков с вращающимися цилиндрами в то время не производилось. Я надеюсь получить такие снимки, так же, как и снимки процессов отсасывания, в ближайшее время.

<sup>1)</sup> Маленькие вихри за парой цилиндров возникают вследствие того, что пограничный слой здесь движется быстрее остального потока; они не имеют ничего общего с вихрями, приводящими к отрыву потока. Такого же происхождения облакообразные возмущения по обеим сторонам потока, посыпанные ликоподием; они вызываются стенками, движущимися быстрые воды.

Предшествующее изложение дает возможность просто объяснить возникновение циркуляционного потока для вращающихся цилиндров, необходимого для удовлетворительной теории явления Магнуса.

При достаточно сильном вращении с той стороны цилиндра, которая движется в одну сторону с потоком, торможения не получится, не будут возникать и отрываться вихри, наоборот с другой стороны вихрь возникнет, подобно тому, как это происходит в цилиндре с отсасыванием. Для линии *abda* на рис. 22, охватывающей вместе с цилиндром вихрь в области свободного потока, циркуляция все еще равна нулю. Если добавить две линии *bd*, пробегающие в противоположных направлениях, то ничего не изменится, эти два участка контуров взаимно нейтрализуются. Но из рассмотренных линий можно составить еще два замкнутых путя *abda* и *cdbc*. Для последней линии, охватывающей только вихрь, циркуляция отлична от нуля, а следовательно, и линия *abda*, замыкающая цилиндр, также должна иметь такую же циркуляцию. Вихрь уплывает с потоком, но циркуляция цилиндра остается<sup>1)</sup>.

При слабом вращении цилиндра только один из обоих

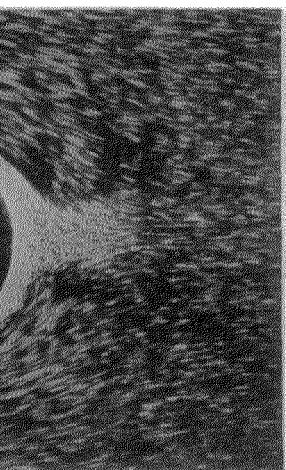


Рис. 18.

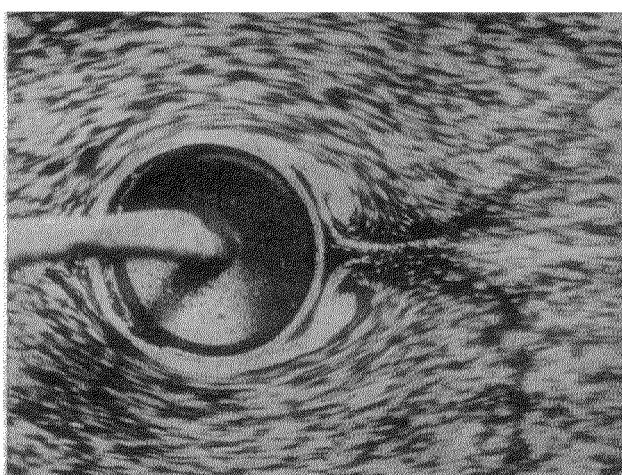


Рис. 19.

<sup>1)</sup> Следует помнить, что теорема Томсона перестает быть справедливой в зоне трения, поэтому замкнутые линии, проходящие где-либо через жидкость, проходящую из зоны трения, имеют циркуляцию, отличную от нуля.

вихрей будет меньше, чем в случае неподвижного цилиндра, другой вихрь будет больше. Здесь циркуляция вокруг цилиндра будет равной разности циркуляций отходящих вихрей.

Заметим, предо-стерегая от распространенной ошибки, что кинетическая энергия циркуляционного потока не имеет ничего общего с работой воздушного трения, которую цилиндр должен преодолевать при вращении. Мой сотрудник инж. Аккерет (Acke-rett) показал (в неопубликованной еще работе), что цилинду приходится преодолевать сопротивление при его продвижении во время образования циркуляции; соответствующая работа и является эквивалентом возникающей энергии потока.

В конечном счете трение воздуха выполняет регулирующую функцию; если, например, циркуляция при изменении скорости вращения цилиндра или скорости ветра перестает соответствовать „нормальному состоянию, то в результате трения воздуха до тех пор образуется больше вихрей одного направления вращения, чем другого, пока не установится циркуляция, соответствующая данному мгновенному состоянию.

С точки зрения этих сведений о пограничном слое мы смотрим еще раз внимательнее поток на рис. 7.

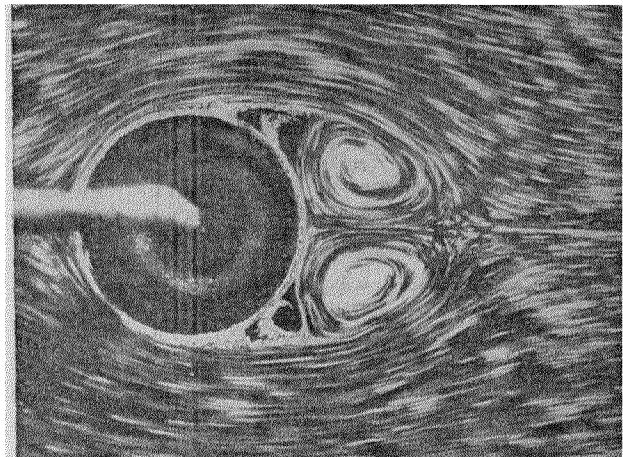


Рис. 20

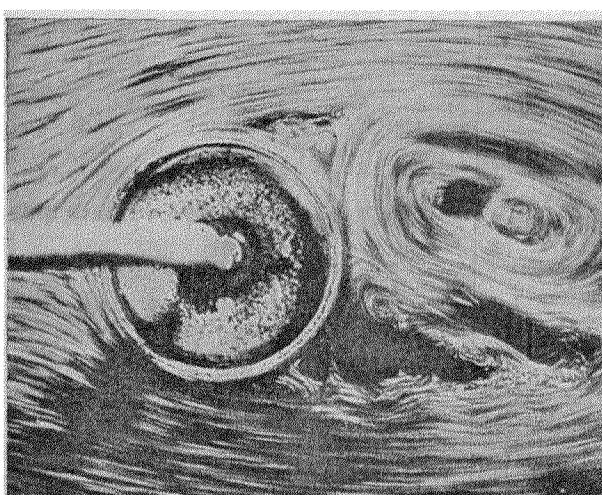


Рис. 21. Образование вихрей около цилиндра.  
Снимки Рубаха.

Здесь поток обходит цилиндр только в одном направлении. Если цилиндр начнет вращаться с периферической скоростью, превышающей максимальную скорость потока, то пограничный слой нигде не затормозится, наоборот, он всюду будет увлекаться вперед, по этому здесь нельзя более ожидать отделения вихря при достижении циркуляции, соответствующей этому потоку. Отсюда мы заключаем, 1) что в этом случае картина рис. 7 приближенно соответствует действительности и в случае вращения цилиндра в вязкой жидкости, 2) что соответствующая поперечная разность давлений соответствует теоретическому максимуму<sup>1)</sup>. Какова должна быть периферическая скорость цилиндра при достижении такого состояния? Прежде всего теория дает для максимума скорости потока рис. 3 (при  $B$  и  $B'$ ) значение  $2V$ ; скорость обращения  $U$  добавочного потока рис. 4 поэтому также  $2V$ , так что у  $B$  и  $B'$  возникают скорости  $4V$  и  $0$ ; это же рассуждение применимо и для периферических скоростей цилиндра  $u$ , больших, чем  $4V$ . Можно, однако, ожидать, что позволительно иметь дело и со скоростями, несколько меньшими  $4V$ , небольшое торможение в месте максимальной скорости потока, очевидно, не может принести никакого вреда, так как оно выравнивается напором в местах с меньшей скоростью потока.

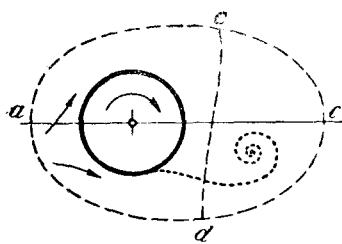


Рис. 22. Возникновение циркуляции.

На основании наших расчетов в отделе II можно определить и максимальную теоретическую силу.  $\Gamma = 2\pi r U = 4\pi r V$ , следовательно

$$P_{max} = 4\pi\rho V^2 rl.$$

Чтобы перейти к числу, применяемому в аэродинамике,  $c_a$  [число напора (Auftriebzahl)] разделим  $P$  на видимую поверхность цилиндра  $F = 2rl$  и на „высоту размаха“  $q = \rho \frac{V^2}{2}$ , мы получим

$$(c_a)_{max} = \frac{P}{Fq} = \frac{4\pi}{2} = 12,57^2).$$

<sup>1)</sup> Это заключение не совсем точно потому, что частицы жидкости, увлекаемые цилиндром, отбрасываются центробежной силой и могут в свою очередь увлекать поток; вследствие этого циркуляция будет еще несколько больше, чем следует из рис. 7. Однако это действие не может быть значительным, так что приведенное утверждение приблизительно верно; оно подтверждается и опытами, приводимыми ниже.

<sup>2)</sup> Не по моей вине в газетах распространяются сведения, что я получил эту цифру уже в 1904 г. Это не верно. Я сам не могу указать точную дату; полагаю, однако, что цифра стала мне известной около 1918 г.

Можно заметить, что это сопротивление приблизительно в 10 раз больше, чем величины, достигаемые на обычных аэропланах крыльях. Это связано с тем, что поток около вращающегося цилиндра отклоняется значительно сильнее, чем у подъемной поверхности. Если изучить распределение давления потока на рис. 7, то теорема Бернулли приводит к выводу, что в местах *A* и *C* в сравнении с невозмущенным потоком имеется избыток давления соответствующей обычной „высоте размаха“  $\rho \frac{V^2}{2}$ , но в области *B* давление на  $16 \rho \frac{V^2}{2}$  меньше, чем в *A*, поэтому недостаток давления в сравнении с давлением невозмущенного потока равен пятнадцатикратной „высоте размаха“. Таким образом главная часть поперечного напора достигается отсасывающими действиями! Это ясно и из рассмотрения рис. 7, если вспомнить о центробежных действиях в жидкости, которые, очевидно, весьма значительны в области, расположенной над цилиндром<sup>1)</sup>.

#### IV.

Уже давно опыты с вращающимся цилиндром, шарами и другими телами были занесены в список очередных задач руководимого мной Аэродинамического Экспериментального Института; указанные теоретические соображения в особенности побуждали к опытной проверке. Однако другие неотложные задачи заставляли откладывать исследование. Весной 1923 г. мы получили очень быстроходные маленькие электромоторы, разработанные моим долголетним чрезвычайно ценным сотрудником Бетцом для вращения пропеллеров аэроплановых моделей<sup>2)</sup>; это послужило окончательным поводом для начала работ. Г. Акерет, весьма заинтересованный всеми вопросами, связанными с пограничным слоем, занялся тогда исследованием вращающихся цилиндров. Для возможно большего приближения к теоретическим условиям цилиндр помещался между двумя параллельными стенками; таким образом процессы, связанные с потоком, должны быть одинаковы во всех плоскостях, параллельных обеим стенкам, и можно избежать вредных обтеканий на концах цилиндров. Периферическая скорость доводилась до четырехкратной скорости ветра, но вначале наибольшее достигнутое значение  $c_a$  было около 4 вместо теоретической величины 12,57. Исследование потока вскоре показало, что правильно работала только средняя часть цилиндра, по сторонам поток не удерживался у цилиндра и поэтому мало отклонялся. Я приписал такое

<sup>1)</sup> На выпуклых поверхностях обычных аэропланов отсасывающее действие с верхней стороны больше, чем действие давления снизу, хотя и не в такой степени, как у вращающегося цилиндра.

<sup>2)</sup> Ackeret ZS. f. Flugtechnik u. Motorluftschiffart, стр. 101, 1924 г.

несогласие с ожидаемым потоком отрыву воздушного течения на обеих стенках, соответствующее отрыву на боковой стенке рис. 15. Для избежания этого я предложил поместить на концах цилиндра шайбы, вращающиеся вместе с цилиндром; они должны были воспрепятствовать торможению пограничного слоя в критических местах (ср. рис. 23). Ожидания оправдались. Поток распространялся до стенок от цилиндра, и число  $c_a$  возросло примерно до 10 при отклонении воздушного течения высотою около 20 см почти на прямой угол цилиндром толщиною в 4 см. Этим можно было удовлетвориться, так как нельзя было ожидать достижения величины 12,57 вследствие отклонений, вызываемых трением.

Соображения о практическом использовании вращающегося цилиндра были нами высказаны уже в связи с теоретическими результатами, но ни одно из указанных возможных применений (аэропланы крылья, пропеллер<sup>1)</sup>, крылья ветряных мельниц, турбинные лопасти и т. д.) не оказалось достаточно выгодным. В этом отношении я не изменил своих взглядов и теперь. Применяя вращающиеся цилиндры вместо крылообразных форм, можно значительно уменьшить глубину, измеряемую в направлении потока, так как на видимую поверхность цилиндра действует сила в 8—10 раз большая; но это обстоятельство не представляет большого интереса,

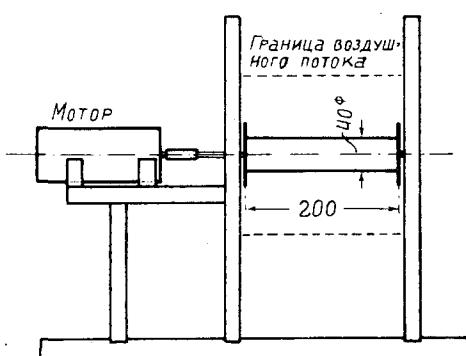


Рис. 23. Схема установки опытов с вращающимся цилиндром.

если принять во внимание, что осуществление форм без подвижных частей много проще; с другой стороны, хорошие формы подъемных крыльев испытывают в направлении движения меньшее сопротивление. Поэтому существенно отметить, что, применяя вращающиеся цилиндры, нельзя съэкономить на площади аэроплановых крыльев, ветряных мельниц и пр., так как пределы мощности этих частей в значительной мере зависят от количества воздуха, захватываемого в единицу времени. Это количество определяется, однако, площадью крыльев.

К сожалению, мы не рассмотрели тогда случай корабельных парусов, где имеются другие соотношения и где вращающиеся цилиндры являются выгодными. Это выполнил А. Флетчер, известный изобретатель „флетнеровского корабельного руля“. В руководимом мною институте он производил уже раньше различные опыты для

<sup>1)</sup> Проф. Гюмбель (Gümbel) в Берлине еще в 1918 г. испытывал пропеллер вращающимися цилиндрами.

выяснения свойств своего изобретения и пришел к мысли применить идею этого руля<sup>1)</sup> к корабельному парусу. Парусные суда по экономическим причинам постепенно уступили свое место пароходам и кораблям с дизелями; главные основания этого — необходимость большого персонала, обслуживающего паруса, и частые работы по ремонту такелажа. Флеттнер хотел ввести металлические паруса, построенные подобно подъемным крыльям металлических аэропланов; паруса должны были устанавливаться по ветру автоматически при помощи вспомогательных рулей. Затруднением являлись бури. Металлические паруса нельзя собирать, но при помощи вспомогательных рулей они могут установиться точно в направлении ветра, не испытывая бокового давления. Но что делать, если во время бури вспомогательный руль потерпит аварию и останется в положении, соответствующем полному давлению на парус?! Дальнейшее разочарование принесло сравнение новых парусов со старыми; оказалось, что обыкновенные паруса при правильной установке по ветру совсем не так плохи, как склонны были думать; получавшиеся силы достигали 80 проц. величины, измеренной с металлическими парусами. Для выгодной замены старых парусов новыми нужно было делать металлические паруса чрезвычайно большими. Поэтому Флеттнер обратился к поискам другого выхода. Когда ему сообщили о геттингенских опытах с врачающимся цилиндром, он быстро решил исследовать применимость таких цилиндров для своего парусного корабля, войдя по этому поводу в связь с нами. На основании наших предварительных опытов мы могли тогда же предложить ему как наиболее выгодную форму ту, которая и была осуществлена на корабле. Согласно вышеизложенному цилиндр должен быть длинным и с шайбами на концах. Верхняя свободная шайба должна выполнять теперь другое назначение, чем шайбы у стенок, о которых была речь выше. Без этой шайбы воздух проникал бы с лобовой поверхности цилиндра в область недостаточного давления и таким образом разрушал бы в значительной части по длине цилиндра циркуляционный поток; такое разрушение будет тем больше, чем значительнее уменьшение давления. Разумеется, шайба должна вращаться вместе с цилиндром во избежание отрыва потока около нее, о котором мы говорили раньше. У этих шайб есть и другое преимущество, ясно обнаруживающееся на опыте; они уменьшают наведен-

<sup>1)</sup> Этот руль отличается от обычного тем, что он может, подобно ветряному флюгеру, свободно вращаться на своей оси: он не поворачивается, как обыкновенно, рулевой машиной, вместо этого имеется на его заднем крае маленький вспомогательный руль; последний играет в отношении главного руля такую же роль, как обыкновенный руль в отношении корабля. Таким образом для управления рулем даже в больших кораблях требуется очень незначительная сила; даже в непогоду действие такого руля постоянное, так как он мог следовать за меняющимися течениями. (Ср. статью Ферстера (E. Förster). Современное развитие корабельного дела, Naturwissenschaften, 12, 1106, 1924).

ное сопротивление благодаря тому, что краевой вихрь разделяется на два вихря, отходящих от краев шайбы; преимущество здесь такое же, как при переходе от моноплана к биплану<sup>1)</sup>.

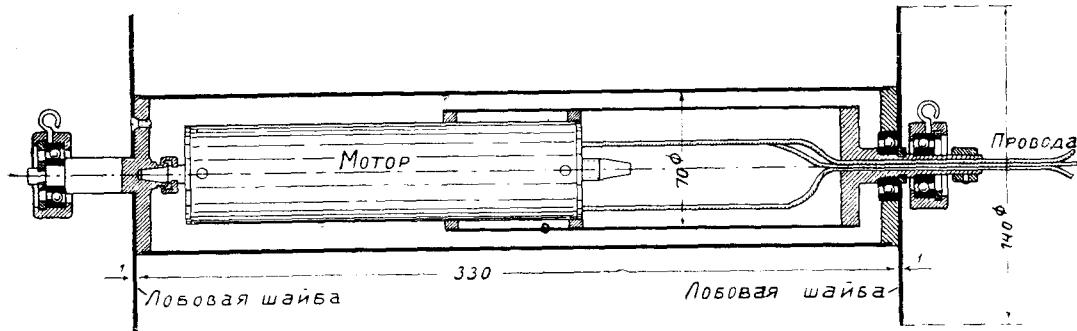


Рис. 24. Вращающийся цилиндр с мотором.

Теперь коротко сообщим о дальнейших опытах. Сначала исследовался цилиндр с электродвигателем, помещенным внутри (рис. 24) без шайб и двумя парами шайб различных диаметров. На рис. 25 дана кривая, показывающая связь „числа напора“  $c_a$  с „числом сопротивления“  $c_w$ <sup>2)</sup> в форме „полярной диаграммы“; в нижнем левом углу нанесена штриховая полярная диаграмма аэроплана крыла. На кривой рис. 26 изображена зависимость  $c_a$  от  $\frac{u}{V}$  (отношение периферической скорости цилиндра и скорости ветра). Мы видим,

что в области  $\frac{u}{V} = 4$  при цилиндре с шайбами достигается наибольший напор, при чем  $c_a$  приблизительно достигает значения 10; цилиндр без шайб достигает только  $c_a = 4$ .

Кроме того, исследовалась сила ветра на модели корабля „Букау“ с вращающимся цилиндром и одновременно на парусном корабле для относительного ветра<sup>3)</sup> постоянного направления

<sup>1)</sup> Флетчер указывает, что именно это действие шайб было ему известно по другим работам, поэтому он снабдил бы цилиндр шайбами и без нашего предложения.

<sup>2)</sup> Сопротивление в направлении ветра, разделенное на  $F \cdot q$ .

<sup>3)</sup> Ветер относительно идущего корабля.

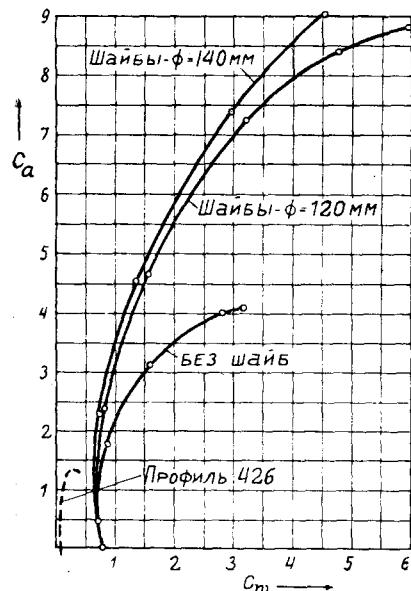


Рис. 25. Полярная кривая:  $c_a$  — число напора,  $c_w$  — число сопротивления.

и силы таким образом, что полезная компонента в направлении движения корабля нанесена для всевозможных направлений курса относительно ветра. Поверхности парусов обеих моделей (рис. 28) относились как 1:9,8. На парусной модели паруса при изменении курса

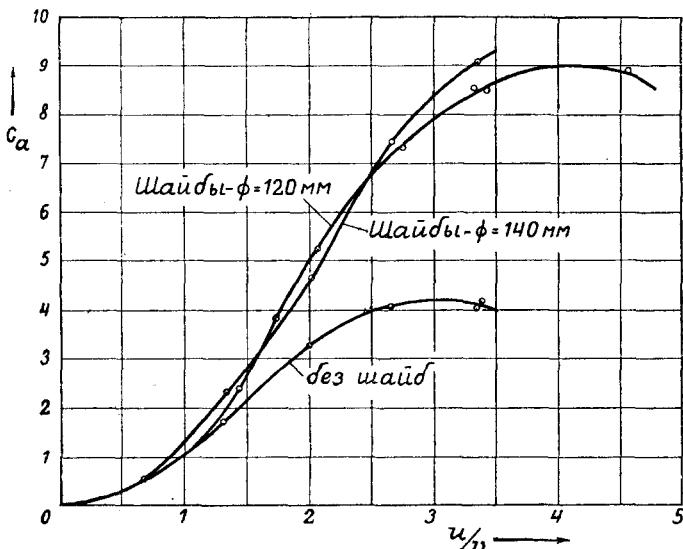


Рис. 26. Зависимость  $c_a$  от  $\frac{u}{V}$ .

должны были устанавливаться сизнова; смотря по качеству установки получались измеренные точки, расположенные внутри или вне диаграммы. Область колебания этих точек отмечена на диаграмме штриховкой. Установка в „роторе“ возможна только в виде изменения скорости, смотря по силе ветра. Отсутствие всяких перестановок при изменении направления ветра является важным преимуществом „ротора“. На парусном судне всякое изменение направления или силы ветра связано с изменением положения парусов. На больших кораблях это особенно утомительно, поэтому паруса не поворачивают, пока судно как-нибудь движется, в результате получается очень плохое парусное плавание. У кораблей-роторов правильная установка получается сама собой; для изменения числа оборотов до нужной величины требуется минимальное усилие, для этого рулевому нужно только поворачивать ручку реостата электродвигателя. Только при изменении ветра с рулевого на кормовой необходимо переменить направление вращения роторов.

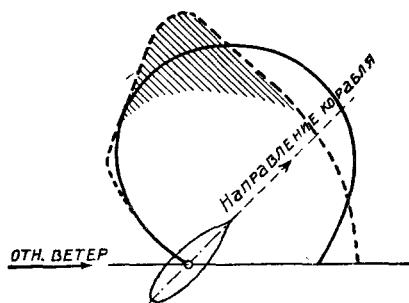


Рис. 27. Силы ветра на корабельных моделях, — ротор; - - - парусник.

Если заставить цилиндры вращаться в противоположные стороны, то можно корабль вращать на месте. При возрастании ветра отношение  $\frac{u}{V}$  и вместе с тем  $c_a$  уменьшается, т.-е. сила ветра возрастает медленнее,

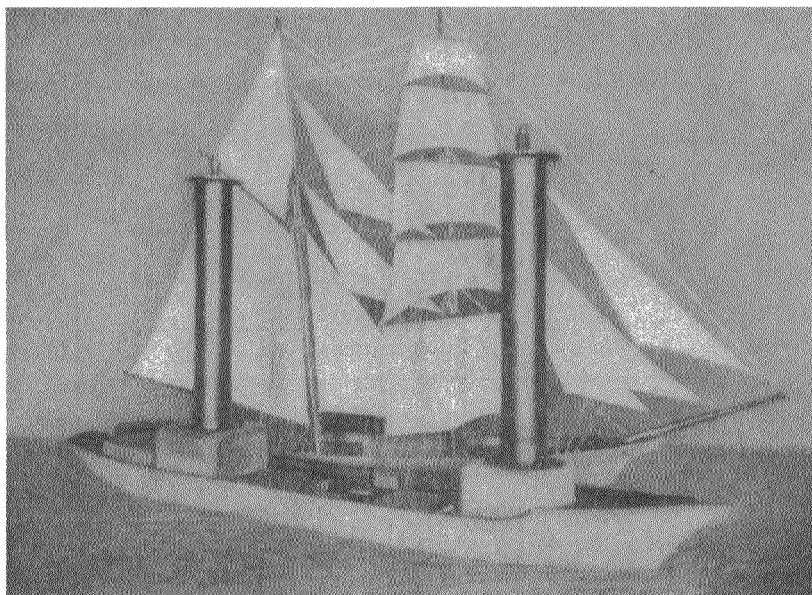


Рис. 28. Две корабельные модели. У каждого ротора внутри имеется электродвигатель (конструкция по рис. 24).

чем на старых парусных кораблях, где приходится снимать паруса. Ослабить силу еще больше можно уменьшением числа оборотов. Если во время сильной бури роторы совершенно останавливаются, то натиск

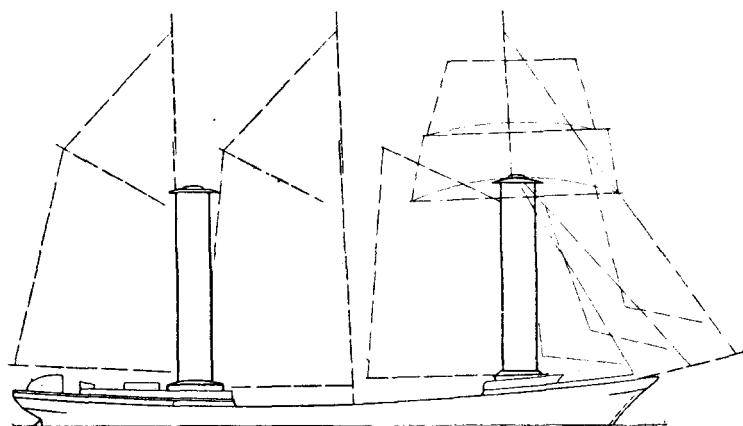


Рис. 29. „Паруса“ „Букау“ до и после перестройки.

ветра остается очень небольшим,  $c_a = 0$  и  $c_w = 0,3$ <sup>1)</sup>. Сопротивление в этом случае меньше, чем у пустого такелажа эквивалентного старого парусника.

На рис. 29 схематически изображен моторный парусник „Букау“ в 600 тонн до и после перестройки (штрихами обозначены старые паруса). Рис. 30 дает вид с капитанского мостика на корме на передний ротор, детали которого хорошо видны на фотографии. Мачта на середине корабля служит для подъема тяжестей, погружаемых на корабль.

Во время пробного рейса „Букау“ 12 ноября 1924 г. я мог убедиться в чрезвычайной тщательности и красоте выполнения конструкции роторов, а также их машинной части на кильской верфи „Германия“. Внутри роторов находится твердо связанная с парусом корабля колонна из стальной жести; она поддерживает ось, на которой висит цилиндр. Внизу ротор имеет вторую опору. Движение передается парой зубчаток, помещенных как раз над верхней осью, которая приводится в движение электродвигателем по Леонарду<sup>2)</sup>. Роторы изготовлены из листового железа толщиной в 1 мм и имеют для большей жесткости еще внутреннюю конструкцию. Практи-

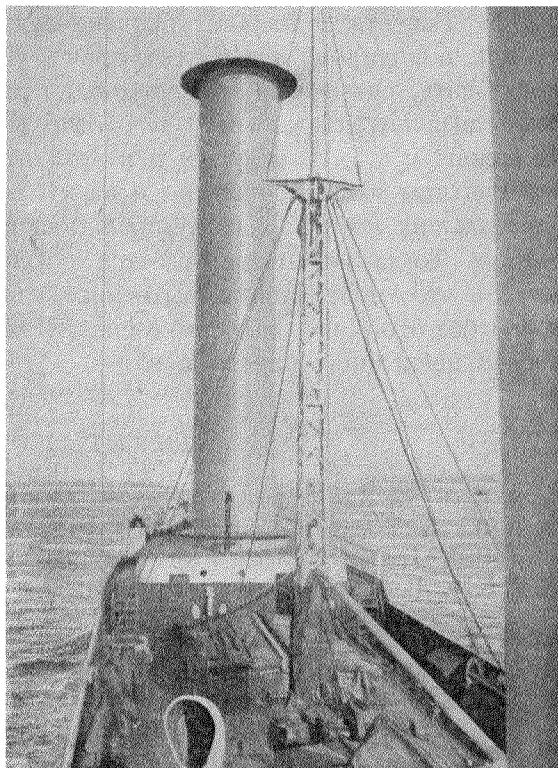


Рис. 30. Вид с капитанского мостика „Букау“ на передний ротор.

<sup>1)</sup> Большее значение  $c_w$  на рис. 25 связано с тем, что при остановке цилиндра-модели критическая скорость (точнее, критическое число Рейнольдса) еще не достигнута. Ср., напр., Wieselberger, Phys. ZS. 22, 321, 1921; L. Prandtl. Festschr. d. Kaiser Wilhelm Ges. Berlin. 1921, стр. 178: Ergeb. d. aerodyn. Versuchsanst, II вып. Мюнхен, 1923, стр. 23.

<sup>2)</sup> В схеме Леонарда двигатель постоянного тока приводится в движение особой, связанной с ним, динамо так, что магнитное поле двигателя возбуждается сторонним током постоянной силы, поле же динамо может регулироваться; оба якоря

чески они действуют бесшумно; способность корабля к маневрированию по мнению специалистов оказалась превосходной. Испытание корабля во время бури еще не производилось, так как со времени окончания постройки бури еще не было. В этом отношении не приходится опасаться, так как силы ветра при остановленных роторах очень малы<sup>1)</sup>.

Естественно возникает главный вопрос: может ли корабль-ротор конкурировать в экономическом отношении с пароходами и моторными судами? Расчеты, которые, впрочем, лежат вне пределов моей компетенции, повидимому это подтверждают. Действительное доказательство может дать, разумеется, только опыт с кораблями-роторами. На практике выяснится многое, чего заранее нельзя учесть (расходы на ремонт и т. д.). Впрочем и в этом отношении, как можно думать, перспективы благоприятные, поэтому весьма отрадно слышать, что ряд больших моторных парусников должен быть перестроен в корабли-роторы. Тогда испытание удается осуществить на примерах. Жалко только, что снова машина вытесняет из жизни клочок поэзии. Впрочем и без этого не удалось бы спасти парусных кораблей. Пожелаем успеха наследнику парусников!

#### ЛИТЕРАТУРА.

- 1) B. Robins. New principles of gunnery. London. 1842.
- 2) B. Robins. Mathematical tracts of gunnery. London. 1761, стр. 200 и пр.
- 3) S. D. Poisson. Recherches sur le mouvement des projectiles. Paris. 1839.
- 4) I. P. v. Heim. Beiträge zur Ballistik in besonderer Beziehung auf die Umdrehung der Artilleriegeschosse. Ulm. 1848.
- 5) G. Magnus. Über die Abweichung der Geschosse. Abh. d. Kgl. Ak. d. Wiss. zu Berlin. 1852: Pogg. Ann. 88, 1, 1853.
- 6) J. W. Strutt (Lord Rayleigh). On the irregular flight of a tennis-ball. Messenger of Mathematics 7, 14, 1877, Scientific papers. Cambridge. 1899, стр. 344.
- 7) G. t. Walker. Статья „Игра и спорт“ в Enzyklopädie der math. Wissenschaften IV, 9, стр. 136 и след. 1900.
- 8) C. Cramz. Статья „Баллистика“ в Enzykl. der math. Wissenschaften IV, 18, стр. 226 и след. 1903.
- 9) L. Prandtl. Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. Verhandl. d. 3-ten Intern. Mathematikerkongr. zu Heidelberg. 1904. Лейпциг. 1905, стр. 484.
- 10) Lafay. Sur l'inversion du phénomène de Magnus C. R. 151, 867. 1910.
- 11) Lafay. Contribution expérimentale à l'acrodynamique du cylindre. Revue Mécanique. 30, 431 и след. 1912.

---

включены последовательно. Вследствие этого динамо дает ток любого напряжения, которое можно регулировать; мотор вращается с частотой, пропорциональной этому напряжению. Соответственно этому на „Букай“ помещены два двигателя для независимого вращения обеих башен и три маленьких динамо по одной для каждой башни и одна для общих надобностей корабля и для возбуждения магнитного поля.

<sup>1)</sup> Добавление при корректуре. Путешествие во время бури удалось осуществить. Корабль показал себя с хорошей стороны. Теперь он предпринял торговый рейс.

## ЭФФЕКТ МАГНУСА И ВЕТРЯНОЙ КОРАБЛЬ

- 12) L. Prandtl. Статья „Flüssigkeitbewegung“ в „Handwörterbuch der Naturwissenschaften“. Iena. 1913.
- 13) H. Föttinger. Neue Grundlagen des Propellerproblems. Jahrb. d. Schiffbautechnik. Ges. 19, 426 и след. 1918.
- 14) L. Prandtl. Tragflügeltheorie. Nachr. d. Kgl. Ges. d. Wiss. Göttingen. 1908, стр. 451 и 1909, стр. 107.
- 15) A. Betz. Einführung in die Theorie der Flugzeugtragflügel. Naturwissenschaften. 1918, стр. 557.
- 16) L. Prandtl. Tragflächenauftrieb und — Widerstand in der Theorie. Jahrb. d. Wiss. Ges. f. Luftfahrt. Berlin. 1920, стр. 37 и след.
- 17) Th. v. Kármán. Über laminare und turbulente Reibung. Zeitschr. f. angew. Mathem. u. Mechanik. 1, 233, 1921.
- 18) A. Flettner. Die Anwendung der Erkenntnisse der Aerodynamik zum Windantrieb von Schiffen. Werft, Reederei, Hafen. 5, 657, 1924.
- 19) A. Betz. Der Magnuseffekt, die Grundlage der Flettnerrotors, ZS. d. Vereins deutsch. Ing. 69, 9, 1925.
- 20) J. Ackeget. Das Rottorschiff und seine physikalischen Grundlagen. Göttingen. 1925. Vanderhoeck u. Ruprecht-Verlag. Русской перевод А к к е р е т. Роторный корабль. Госиздат. М. 1925 г.