

M.

О СОПРОТИВЛЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ И О ВОЗДУХОПЛАВАНИИ.

Д. МЕНДЕЛЬЕВА.

ПЕРВЫЙ ВЫПУСКЪ.

(Съ 12-ю таблицами чертежей).

ЦЕНА 2 Р. 50 К.



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Тип. В. ДЕМАКОВА, Новый пер., д. № 7.
1880.



N.L.

О СОПРОТИВЛЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ

и

О ВОЗДУХОПЛАВАНИИ.

Д. МЕНДЕЛЬЕВА.

ПЕРВЫЙ ВЫПУСКЪ.

(Съ 12-ю таблицами чертежей).

ЦВИЛ 2 Р. 50 к.



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.

Тип. В. ДЕМАКОВА, Новый пер., д. № 7.

1880.



№ 1. О СОПРОТИВЛЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ

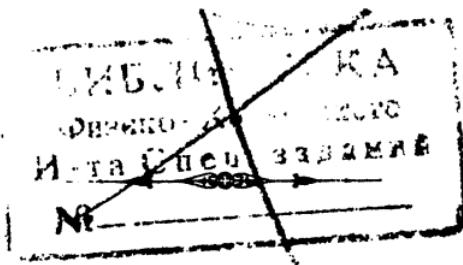
и

О ВОЗДУХОПЛАВАНИИ.

— Д. МЕНДЕЛЬЕВА.

ПЕРВЫЙ ВЫПУСКЪ.

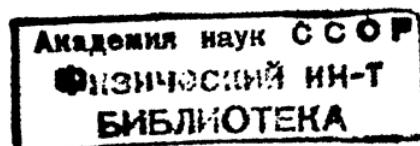
(Съ 12-ю таблицами чертежей).



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Тип. В. ДЕМАКОВА, Новый пер., д. № 7.
1880.



С.-ПЕТЕРБУРГЪ.



СОПРОТИВЛЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ¹⁾.

Тѣло, перемѣщающееся въ какой либо однородной средѣ²⁾, необходимо должно сообщать ея частицамъ долю своего движенія, на что неизбѣжно требуется затрата нѣкотораго количества работы. По этой причинѣ всякое движение, возбуждаемое ли постоянно дѣйствующими силами, напр. паденіе тѣлъ отъ тяжести, движение судна подъ вліяніемъ винта и т. п., или продолжающееся по инерціи (отъ ранѣе подѣйствовавшей силы), напр. движение пули или ядра, стрѣлы и т. п.—замедляется каждый разъ, когда совершается въ нѣкоторой средѣ, что и составляетъ такъ называемое *сопротивление среды* или сопротивленіе жидкостей.

Сопротивленіе среды должно быть рассматриваемо какъ сила, потому что сила есть все то, что производитъ, измѣняетъ, ускоряетъ или замедляетъ движение, а сопротивленіе среды имѣть именно такое значеніе: сопротивленіе среды препятствуетъ, замедляетъ движение лодки. Но оно же и служить для движенія при упорѣ въ воду весломъ или винтомъ, или какимъ либо другимъ способомъ. Какъ сила — *сопротивление среды измѣряется фунтами, килограммами* или тому подобными единицами вѣса³⁾. *Работа сопротивленія*, какъ и работа всякой силы и всякаго двигателя, выражается произведеніемъ изъ пройденного пути на мѣру силы сопротивленія. Если, напримѣръ, сопротивленіе какого-либо шара въ воздухѣ равно R кило, а пройденный имъ путь h

¹⁾ Ученіе о сопротивленіи твердыхъ тѣлъ составляетъ весьма обработанную часть механики и не иходитъ вовсе въ предметъ, рассматриваемый въ этой статьѣ. А потому подъ словами «жидкость» или «среда» здѣсь должно подразумѣвать исключительно капельные и газообразные жидкости.

²⁾ При переходѣ изъ одной среды въ другую явленія усложняются, но въ сущности не измѣняются. Движеніе въ воздухѣ, который имѣть различную плотность въ разныхъ своихъ слояхъ, можетъ быть рассматриваемо, какъ движение въ средѣ однородной только до тѣхъ поръ, пока перемѣны высотъ движущихся тѣлъ сравнительно не велики.

³⁾ Собственно, грузы измѣряющіе вѣсъ или гири суть массы, а не силы. Но замѣнія обычные вѣсы—пружинными, которые измѣряютъ уже силы, а не массы. легко видѣть то простое отношеніе, которое существуетъ между вѣсомъ и силой. Абсолютною мѣрою силъ должна служить, по предложению Гаусса, такая сила, которая способна сообщить единицѣ массы (напр. 1 килограмму) въ единицу времени (въ 1 секунду) скорость, равную единицѣ длины (1 метръ).

метровъ, то вся работа сопротивленія $= hR$ килограммометровъ. Если этотъ путь пройденъ съ равномѣрною скоростью въ n секундъ, то въ одну секунду проходится путь $\frac{h}{n} = v$ и следовательно въ 1 секунду на сопротивление требуется работа Rv килограммометровъ или $\frac{Rv}{75}$ лошадиныхъ силъ.

Очевидно, что при решеніи задачъ воздухоплаванія необходимо имѣть полное знакомство съ вопросомъ о сопротивлениі воздуха, если желательно по произволу направлять движение тѣла въ воздухѣ. Сопротивление воздуха, въ этомъ смыслѣ, составляетъ причину той затраты работы, которая необходима для управления двигающимся въ воздухѣ приборомъ, и единственное средство для произведенія желаемаго, самостоятельнаго перемѣщенія.

Для того, чтобы давать направление двигающемуся тѣлу въ воздухѣ, необходимо опираться опять на тотъ же самый воздухъ, пользуясь силою сопротивленія воздуха, потому что въ воздушной средѣ не встречается никакой другой точки опоры. Когда на поверхности воды находится (плаваетъ) нѣкоторое тѣло, то можно производить движение или при помощи сопротивленія воды, или при помощи сопротивленія воздуха, или даже пользуясь сопротивленіемъ твердыхъ тѣлъ — береговъ или дна, каната или цѣпи. Въ первомъ случаѣ, т. е. пользуясь сопротивленіемъ самой воды, примѣняютъ весла, винтъ и колеса, во второмъ случаѣ (пользуясь сопротивленіемъ воздуха) примѣняется шарусъ; но можно также перемѣщать плавающее въ водѣ тѣло, заставляя двигаться въ воздухѣ винтъ, подобный обыкновенному пароходному винту или крыльямъ вѣтряной мельницы. На водѣ можно двигаться также упираясь и въ сушу, какъ это бываетъ, напр., при рѣчномъ судоходствѣ. Ничто подобное¹⁾ не можетъ быть примѣнено въ воздухоплаваніи. Необходимо найти упоръ въ самомъ воздухѣ, подобно тому, какъ при движении на водѣ или въ водѣ находятъ упоръ въ самой этой жидкости. Двигающую силу можно при этомъ получить или найти точку опоры, пользуясь только тѣмъ самымъ сопротивленіемъ воздушной среды, противъ котораго приходится бороться и которое составляетъ причину затраты на перемѣщеніе. На основаніи сказанного, движение воздухоплавательнаго прибора нельзя сравнивать ни съ движениемъ по сушѣ, ни съ движениемъ по поверхности воды: тамъ двѣ среды, здѣсь одна; и если можно проводить параллель, то развѣ съ движениемъ подводнаго судна или, вообще, съ плаваніемъ подъ водою. Тѣло рыбы само представляетъ сопротивление водѣ, а плавники и особенно хвостъ, приведенные въ движение мускульною силою, сообщаютъ движение всей рыбѣ также на основа-

¹⁾ Конечно, за исключеніемъ того, практически маловажнаго случая, когда аэростатъ перемѣщается, прикрепленный на канатѣ.

ванії сопротивлення, встрѣчаемаго ими по отношенію въ воздухѣ. Такъ птица, аэростатъ, или всякой другой приборъ, двигающійся въ воздухѣ, могутъ быть приведены въ самостоятельное движение относительно окружающего воздуха только при помощи двигающихся частей и не иначе, какъ пользуясь законами сопротивленія воздуха. Пусть это будутъ приборы, подобные крыльямъ птицы или пароходному винту, или наклонная плоскость (какъ въ аэропланахъ); во всякомъ случаѣ самостоятельное движение получается не иначе, какъ на основаніи законовъ, управляющихъ сопротивленіемъ среды. Все различие двигательныхъ приборовъ (пропеллеровъ), дѣйствующихъ въ жидкой средѣ, сводится къ тому, что одни изъ нихъ, напр. весла и гребныя колеса, дѣйствуютъ, пользуясь прямымъ сопротивленіемъ, являющимся при ихъ движении, а другіе двигательные приборы, какъ винтъ, крыло птицы, рыбий хвостъ и т. п., дѣйствуютъ вслѣдствіе реакціи, являющейся въ направленіи иномъ, чѣмъ движеніе, потому что наклонная плоскость двигателянаго снаряда содѣствуетъ разложенію силы на ея слагающія. Такъ крыло птицы бѣть воздухъ сверху внизъ, а вслѣдствіе наклоннаго положенія крыла является такая горизонтальная слагающая сила, которая заставляетъ птицу двигаться впередъ. Такъ точно въ пароходномъ винтѣ движеніе совершается около горизонтальной оси, а потому прямое сопротивленіе дѣйствуетъ въ направленіи, перпендикулярномъ къ этой оси, а поступательное движеніе совпадаетъ съ этою осью.

Поэтому задачи дальнѣйшаго развитія воздухоплаванія тѣсно связаны съ рѣшеніемъ задачъ, относящихся до сопротивленія воздуха или, вообще, до сопротивленія среды, потому что сущность вопроса о сопротивленіи среды не позволяетъ дѣлать какого-либо разграничения между сопротивленіемъ капельныхъ и упругихъ жидкостей. Это заставляетъ насъ въ дальнѣйшемъ изложеніи не отдавлять вопроса о сопротивленіи воздуха отъ вопроса о сопротивленіи воды. Къ такому слитному изложенію побуждаетъ не только примѣръ всѣхъ главныхъ изслѣдователей вопроса, но еще и то существенное обстоятельство, что число опытныхъ изслѣдований для однихъ газовъ недостаточно для рѣшенія многихъ основныхъ задачъ въ ученіи о сопротивленіи среды. Опыты съ водою дополняютъ и дополняются опытами съ воздухомъ. Получится еще и та выгода, что сводъ данныхъ о сопротивленіи среды приобрѣтаетъ интерес не только въ примѣненіи къ воздухоплаванію, но и въ примѣненіи къ плаванію по водѣ.

Однако, прежде чѣмъ приступить къ изложенію современного состоянія ученія о сопротивленіи воды и воздуха, считаю полезнымъ мотивировать вышеупомянутое сліяніе ученія о двухъ средахъ, столь, повидимому, различныхъ между собою, приведя для того вѣкоторые наведенія, почерпнутыя изъ соображеній и изъ опыта или наблюденія.

Еще до Ньютона, а особенно вслѣдствіе его теоретическихъ

и опытныхъ изслѣдованийъ, сопротивление среды рассматривалось и нынѣ продолжаетъ разсматриваться безъ ближайшаго знакомства съ качествами среды, потому, прежде всего, что многие опыты заставляютъ утверждать, что сопротивление среды зависитъ *почти* исключительно отъ ея плотности, а не отъ какихъ либо другихъ, ея качествъ. Это особенно справедливо для среднихъ скоростей движения. При очень малыхъ скоростяхъ сѣѣленіе частицъ среды, столь громадное у твердыхъ тѣлъ и еще значительное у капельныхъ жидкостей¹⁾, сѣѣленіе, гораздо меньшее у газовъ, оказываетъ, по мнѣнію большинства изслѣдователей, свое замѣтное вліяніе. Отъ того въ опытахъ Кулона двигающаяся въ жидкости поверхность представляла при медленныхъ движеніяхъ значительно различныя сопротивленія въ маслѣ и въ водѣ. Когда скорость возрастаетъ, растетъ сопротивление, сѣѣленіе же частицъ остается неизмѣннымъ, и работа, идущая на его преодолѣніе, становится ничтожно малою сравнительно со всею осталльною массою затрачиваемой работы, а потому, тогда движение плоскости въ маслѣ и въ водѣ будетъ встрѣчать сопротивление *различное только вслѣдствіе разной плотности масла и воды* и почти независящее отъ разности сѣѣленія. Обычный случай сопротивленія жидкости можно представить поэтому подобнымъ переливанію жидкости съ одного места на другое, на что расходуется работа, зависящая, прежде всего, отъ плотности жидкости, при одномъ и томъ же объемѣ переливаемой жидкости. Станемъ ли мы производить сопротивление отъ инерціи жидкости, какъ это дѣлали Ньютоны и его послѣдователи, или будемъ его считать происходящимъ преимущественно отъ тренія, какъ то признаютъ Ранкинъ и его послѣдователи, во всякомъ случаѣ надо допустить тѣсную связь между основными причинами сопротивленія и плотностями жидкостей, потому что таковъ результатъ опытныхъ изслѣдований.

При движении въ жидкой средѣ, сзади двигающагося тѣла образуется свободное пространство, замѣщаемое жидкостью. Очевидно, во-первыхъ, что, смотря по качеству жидкости и по скорости движенія, кормовое пространство будетъ замѣщаться жидкостью болѣе или менѣе скоро и полно, во-вторыхъ, что падающая на корму жидкость будетъ содѣйствовать движению тѣла, а потому, когда движение будетъ столь быстро, что за кормою будетъ образоваться свободное²⁾ или разрѣженное пространство, тогда сопротивление будетъ возрастать съ возрастаніемъ скорости быстрѣе, чѣмъ обычно, т. е. чѣмъ тогда, когда тѣло будетъ получать удары отъ жидкости, наступающей на корму. Такъ какъ

¹⁾ Оно измѣряется въ капиллярныхъ явленіяхъ и проявляется въ жидкости, временемъ истечения, въ подвижности и т. п. свойствахъ жидкостей.

²⁾ Извѣстный французскій адмиралъ г. Дюпюи-де-Ломъ сообщалъ миѣ въ 1878 г., что при испытаніи очень быстроходныхъ новыхъ французскихъ миноносокъ далѣе 20 узловъ, онъ наблюдалъ, что при уклонѣ руля, около него, во всю его высоту, образуется сквозное свободное пространство, *невидимое* водою.

скорость вступлениі жидкостей въ пустоту зависить отъ свойствъ жидкостей, то, начиная съ нѣкоторой скорости, сопротивление всякой жидкости будетъ возрастать быстрѣе, чѣмъ до того. Но это касается и до капельныхъ и до упругихъ жидкостей. Для послѣднихъ есть измѣренія сопротивленій при очень большихъ скоростяхъ, получающихся при полетѣ артиллерийскихъ снарядовъ. Эти измѣренія дѣйствительно показываютъ тогда значительное возрастаніе сопротивленія. На основаніи этого не должно, однако, считать сопротивление воздуха глубоко отличнымъ отъ сопротивленія воды, потому что должно думать, что еслибы изслѣдовались движенія въ водѣ при значительныхъ скоростяхъ, получились бы и здѣсь такія же явленія.

Если движеніе происходитъ въ воздухѣ или, вообще, въ упругой средѣ, то предъдвигающимъ тѣломъ плотность среды возрастаетъ, тѣмъ больше, чѣмъ легче сжимаема и чѣмъ менѣе подвижна жидкость, а задвигающимъ тѣломъ плотность уменьшается; поэтому должно ожидать для упругихъ жидкостей, при большихъ скоростяхъ, сопротивленія, возрастающаго не только въ прямой зависимости отъ скорости и плотности, но и еще въ большей мѣрѣ, вслѣдствіе того, что сгущенная жидкость впереди тѣла будетъ оказывать болѣе значительное сопротивленіе, а разрѣженное сзади пространство будетъ заставлять тѣло двигаться медленнѣе. Толкая его какъ бы въ обратную сторону. Этими соображеніями достаточно объясняется значительное возрастаніе коэффиціента сопротивленія воздуха¹⁾ съ возрастаніемъ скорости, какъ видно изъ опредѣленій сопротивленія артиллерийскихъ снарядовъ. Если же рѣчь идетъ о такихъ небольшихъ скоростяхъ, непревышающихъ 10—20 метровъ въ секунду, какія встрѣчаются въ дѣйствительности при движеніяхъ рыбъ, птицъ, пароходовъ, поѣздовъ и т. п., то тогда сопротивление среды съ достаточнouю точностью опредѣляется ея нормальною плотностю, т. е. возрастаетъ съ ся увеличеніемъ прямо пропорціонально.

Такъ должно думать потому, что непосредственными опытами доказывается, что, несмотря на громадное различие плотностей воды и воздуха, сопротивление той и другой среды—одно и то же, принявъ во вниманіе одно различіе ихъ плотностей. Такъ, напр., изъ опытovъ надъ движеніемъ шарообразныхъ тѣлъ въ воздухѣ и въ водѣ (что мы разсмотримъ подробнo впослѣдствіи) оказывается,

¹⁾ Коэффиціентомъ сопротивленія мы станемъ называть частное изъ величины сопротивленія на квадратъ скорости, при данныхъ другихъ свойствахъ жидкости и тѣла, напр. при плотности среды=1, при наибольшемъ сжатіи тѣла (по направлению, перпендикулярному къ направлению движенія)=1. Для шара при метрической мѣрѣ, при плотности среды=1 (снегая плотность воды или вѣсъ куб. метра въ кило=1000) и при величинѣ большаго круга=1 кв. метру, коэффиціентъ сопротивленія для обычныхъ скоростей, непревышающихъ 10 метровъ, близокъ къ 0,03 килограмма (если скорости выражены въ метрахъ), а при скоростяхъ въ 400—500 метровъ коф. сопротивленія шара достигаетъ 0,05, даже 0,053 кило, какъ видно изъ французскихъ и русскихъ артиллерийскихъ опредѣленій.

что на каждый квадратный метръ наибольшаго поперечнаго сѣченія двигающагося шара, при скорости равной 1 метру въ секунду, сопротивление среды близко къ 0,03 килограмма или 30 грам., если въесь кубического метра среды равенъ 1 килограмму. Но-этому, такъ какъ куб. метръ воды вѣсить 1000 кг., сопротивленіе воды близко къ 30 килограммамъ. Воздухъ при температурѣ въ 0° и 760 мм. давленія вѣсить всего 1,29 килограмма на кубический метръ, а потому сопротивленіе такого воздуха противу шара, имѣющаго сѣченія 1 кв. метръ, при скорости 1 метра въ секунду, близко къ 0,03·1,29 или къ 0,0387 килограмма. Атмосферный воздухъ измѣняетъ свою плотность, смотря по температурѣ, высотѣ надъ уровнемъ моря, или съ давленіемъ и отъ степени влажности, а потому и сопротивленіе воздушной среды измѣняетъ свою величину, смотря по плотности. Слѣдовательно, говоря о сопротивленіи воздуха, необходимо уже принять во вниманіе его измѣненіе съ перемѣнною плотности, а это и достигается проще всего, когда изслѣдованіе сопротивленія относится и къ такой плотной средѣ, какъ вода, и къ такой рѣдкой, какъ воздухъ, обращая каждый разъ вниманіе на плотность.

Не надо забывать, что съ уменьшеніемъ сопротивленія, вредящаго движению, уменьшается и то сопротивленіе, при помощи котораго можетъ быть производимо направленіе воздухоплавательного прибора. Такъ, напр., ударъ крыльевъ, произведенный съ известною быстротою на значительной высотѣ, будетъ представлять меньшии упоръ въ воздухѣ, чѣмъ близъ поверхности земли, гдѣ воздухъ болѣе плотенъ. Поэтому въ цѣломъ выводъ, касающемся самостоятельнаго движения въ воздухѣ, можно также не обращать вниманія на плотность среды.

Теоретически это выражается тѣмъ, что мѣрою сопротивленія считаются въесь жидкаго столба, имѣющаго основаніемъ наибольшее поперечное сѣченіе (мидель), а высотою ту высоту H , которая при свободномъ паденіи тѣлъ соотвѣтствуетъ скорости v движения и которая $H = \frac{v^2}{2g}$, гдѣ g есть ускореніе тяжести. Поэтому очевидно, что свойства среды при такомъ разсмотрѣніи вовсе не принимаются въ разсчетъ и подразумѣваются въ вѣсѣ столба жидкости.

Практически также доказана возможность изъ совокупности свѣдѣній о сопротивленіи, касающихся до воды, судить о сопротивленіи въ воздухѣ по тому, что сдѣлано Дюпон де-Ломонъ. Въ 1870 онъ сдѣлалъ разсчеты, относящіеся до аэростата, принявъ только тѣ данные, которые получены для воды, и на основаніи этихъ соображеній, при данной движущей силѣ, размѣрѣ и формахъ аэростата и при заранѣе опредѣленныхъ скоростяхъ и размѣрахъ винтоваго двигателя, разсчитъ какую самостоятельную скорость долженъ получить аэростатъ. При опытахъ, сдѣланныхъ 2-го февраля 1872 года, собраны наблюденія, изъ которыхъ можно видѣть, что предварительные разсчеты о скорости самостоятельнаго движения аэростата вполнѣ подтвердились въ дѣйствительности. Слѣдовательно всѣ

данныя для сопротивленија воды прямо можно примѣнить къ воздуху, принявъ въ разсчетъ разность плотностей.

И такъ мы будемъ рассматривать совмѣстно сопротивленіе воды и воздуха. Въ этомъ разсмотрѣніи мы будемъ держаться слѣдующаго порядка. Сперва познакомимся съ общимъ состояніемъ всего вопроса и съ тѣми гипотезами и теоріями, которые были примѣнены къ его разрѣшенію. Этому посвящается вся слѣдующая глава. Въ ней мы однако избѣгаемъ математического развитія и подробностей теоретическихъ и опытныхъ расчетовъ, а ограничиваемся только указаніемъ на исходные пункты гипотезъ и на нѣкоторые изъ получаемыхъ выводовъ. Такъ поступаемъ мы въ виду того, что ни одна изъ многихъ теорій сопротивленија не оказалась удовлетворяющею дѣйствительности, хотя каждая изъ главныхъ была побудительницей къ нѣкоторому дальнѣйшему движению всего ученія о сопротивлениї и соотвѣтствуетъ той или иной сторонѣ сложной задачи. Въ виду же того, что развитіе теоретическихъ построений, касающихся сопротивленија, имѣть самостоятельный интересъ, я считаю не излишнимъ въ особенномъ приложеніи изложить нѣкоторая изъ важнѣйшихъ теорій сопротивленија, а особенно Ньютонову теорію сопротивленија среды. Вследствіе недостаточности теоріи сопротивленија, зависящей отъ сложности задачи, приходится въ сущности руководствоваться разултатами опытныхъ данныхъ. Имъ посвящаются двѣ особыя главы. Въ одной изъ нихъ я описываю всѣ, которые мнѣ были известны, достовѣрныя и систематическая изслѣдованія о сопротивлениї тѣль определенныхъ формъ, распределѣвъ ихъ по методамъ изслѣдованія. При этомъ я старался собрать по возможности большее количество численныхъ данныхъ прямыхъ опытовъ и сдѣлать ихъ сличимыми, приведя ихъ всѣ къ метрической системѣ. Въ то же время я старался дать практическую оцѣнку полученнымъ результатамъ, что положительно необходимо въ виду разнорѣбчія многихъ изъ добытыхъ результатовъ. Это изложено во 2-й главѣ. Третья глава посвящается выводамъ изъ опытныхъ данныхъ такихъ, по возможности достовѣрныхъ, результатовъ, какіе нужны для практической стороны вопросовъ о воздухоплаваніи.

Считаю долгомъ оговориться здѣсь въ томъ отношеніи, что вопросъ о сопротивлениї среды занялъ меня сперва только по отношенію его къ воздухоплаванію. Приступая къ изученію сопротивленија, я, признаюсь, не ожидалъ найти такіе недостатки въ теоріи и въ опытахъ, до него касающихся, какіе оказались въ дѣйствительности. Надобно было думать, что въ примѣненіи къ кораблестроенію и кораблевожденію вопросъ разработанъ съ полнотою. Оказалось, что корабли строить и по сихъ порѣ ощущаю, пользуясь многоразличною практикою, а не расчетомъ, основаннымъ на теоріи или опытахъ сопротивленија. Въ такомъ дѣлѣ, какъ плаваніе по водѣ, это и возможно. Опытъ вѣковъ уже великъ и ощущаю, догадкою, и наблюдательностію можно улучшать то, что давно существуетъ. Не таково воздухоплаваніе. Опыты полета, за исклю-

ченіемъ аэростата, который до сихъ поръ не властелинъ, а рабъ вѣтровъ, ионынѣ были, какъ извѣстно, еще мало успѣши. А между тѣмъ птицы летаютъ, аэростатомъ уже съумѣли бороться противу слабаго вѣтра, а потому есть увѣренность и въ томъ, что когда либо достигнутъ и полной побѣды надъ воздухомъ, станутъ управлять полетомъ. Только для этого очевидно необходимо точно знать сопротивленіе воздуха, хотя бы на столько, чтобы имъ воспользоваться для первыхъ, пока грубыхъ, попытокъ борьбы съ атмосферою. Все изложеніе ученія о сопротивленіи я подчиняю этой основной цѣли всего сочиненія и стараюсь въ вышеупомянутой послѣдней главѣ свести то, что сюда прямо относится. Недостаточность опытныхъ данныхъ о сопротивленіи среды для полного решенія задачи воздухоплаванія, однако, столь очевидна, что я считаю невозможнымъ умолчать о неизбѣжной необходимости новыхъ точныхъ опытовъ, о ихъ цѣли, о необходимыхъ пріемахъ и о средствахъ, для выполненія ихъ нужныхъ. Этимъ недостаткомъ точныхъ опытныхъ данныхъ о сопротивленіи среды объясняется въ одно и тоже время причина слабаго развитія, какъ общей теоріи сопротивленія среды, такъ и практики воздухоплаванія. Само мореплаваніе должно много выиграть отъ новыхъ точныхъ опытовъ надъ сопротивленіемъ, потому что вслѣдъ за ними несомнѣнно явится болѣе удовлетворительная, чѣмъ нынѣ существующая, теорія сопротивленія среды, а тогда возможнѣе, чѣмъ нынѣ, будетъ достичь въ морской архитектурѣ такихъ цѣлей, которыхъ вызываются практикою, т. е. наибольшихъ скоростей хода при наименьшей тратѣ топлива, при наибольшей вмѣстимости и надежности остойчивости, поворотливости и пр. свойствахъ корабля. Если мнѣ не по силамъ дать дальнѣйшее движеніе такимъ важнымъ вопросамъ, какъ всѣ вышеуказанные, то я по крайней мѣрѣ стараюсь облегчить путь дальнѣйшимъ дѣятелямъ, собравъ здѣсь все, что считаю наиболѣе важнымъ, и указывая тѣ способы опытного изслѣдованія, какими, по моему мнѣнію, дѣло можетъ быть подвѣнто далѣе, чѣмъ при современномъ состояніи знаній о сопротивленіи среды.

ГЛАВА I.

Важиѣшія свѣдѣнія о сопротивлѣніи среды.

Первымъ побужденiemъ къ зарожденію знаній о сопротивлѣніи среды послужило изученіе движенія падающихъ тѣлъ. Галилей и Флорентинская академія были и здѣсь, какъ во многихъ другихъ частяхъ механики и физики, начинателями дѣла. Первые опыты Риччоли (1640—1650), равно какъ одни изъ полнѣйшихъ для того времени опыты Мариотта и Ла-Гира (1679—1714) представляютъ именно изслѣдованія временъ паденій тѣлъ въ водѣ и воздухѣ. Стали понимать, что воздухъ вѣсомое тѣло, а потому и узнали, что онъ, какъ вода, замедляетъ паденіе и движеніе вообще.

Общія, сами собою понятныя соображенія и немногіе опыты, произведенные въ это время, дали уже поводъ считать сопротивление среды пропорціональнымъ площади съченія, плотности среды и некоторой степени скорости. Затѣмъ ученіе о сопротивлѣніи среды развивалось преимущественно подъ вліяніемъ двухъ практическихъ направленій, требующихъ знакомства съ этимъ предметомъ, а именно: мореплаванія и артиллеріи; двигающейся въ водѣ корабль и летящій въ воздухѣ снарядъ представляютъ ясные примеры важнаго значенія законовъ сопротивлѣнія среды, потому что тамъ и здѣсь двигатель расходуетъ, если не всю, то значительную долю своей силы на борьбу съ сопротивленіемъ среды. Теоретическія изслѣдованія Ньютона надъ сопротивлѣніемъ среды, изложенные во 2-мъ томѣ его знаменитаго творенія: *Philosophiae naturalis principia mathematica*, составляютъ исходную точку всего дальнѣйшаго движения свѣдѣній объ этомъ предметѣ. Ньютонъ также производилъ (1710—1719) опыты паденія шарообразныхъ тѣлъ въ водѣ и въ воздухѣ и воспользовался ими для сужденія о сопротивлѣніи среды. Но онъ первый пошелъ въ дѣлѣ рѣшенія задачь сопротивлѣнія, кромѣ опытнаго способа, путемъ чисто теоретическімъ и опытными изслѣдованіями старался только узнать, какую изъ (трехъ) гипотезъ, которая онъ имѣлъ въ виду, должно признать за отвѣчающую дѣйствительности.

Строго говоря, не то что теперь, а во время самого Ньютона, онъ самъ, изъ своихъ собственныхъ опытовъ, легко долженъ былъ заключить, что ни одна изъ имѣвшихся у него въ виду (трехъ) гипотезъ, объясняющихъ сопротивлѣніе среды, не удовлетворяетъ дѣйствительности¹). Тѣмъ не менѣе исходныя соображенія Ньютона долго и крѣпко держались въ наукѣ, и ради этого мы ихъ излагаемъ здѣсь въ томъ видѣ, въ какомъ они наиболѣе подходятъ къ дѣйствительности и какъ они излагаются въ большинствѣ сочиненій конца прошлаго (послѣ Эйлера) и начала нынѣшняго столѣтія. (Собственные мысли Ньютона изложены отдельно, въ первомъ приложеніи къ этой книгѣ). Ути, отчасти видоизмененныя мысли Ньютона, многіе называли «обыкновенною теоріей (théorie ordinaire) сопротивленія».

Ньютонъ долженъ быть, конечно, задаться иѣкоторыми гипотезами, для того, чтобы имѣть возможность подвергнуть математическому изслѣдованію тотъ невидимый процессъ взаимодѣйствія между тѣломъ и частицами среды, который составляетъ причину сопротивленія среды. Ни точныхъ наблюдений, ни тѣмъ паче какихъ либо точныхъ законовъ сопротивленія, которые могли бы лежать въ основу математического анализа, могли бы служить новодомъ для составленія удовлетворительной гипотезы — ни у Ньютона, ни у другихъ математиковъ, занимавшихся этимъ вопросомъ не было. Пришлось задаться произвольными гипотезами, берущими начало въ первомъ знакомствѣ съ предметомъ, — въ наблюденіи, а не въ измѣреніи или опытѣ. А если явленіе сложно, какъ сопротивленія среды, то такой путь не приводить никогда къ вѣрнымъ, согласнымъ съ природою, слѣдствіямъ. Это видно во всемъ историческомъ развитіи точныхъ знаній. Выводъ этотъ можно выразить кратко примѣромъ изъ астрономіи: Ньютонъ сидѣлъ головою Кеплеромъ. Ньютона гипотеза тяготѣнія согласуется съ природою, даже и зарождается въ головѣ Ньютона, только потому, что раньше Кеплеръ свѣль, извлекъ изъ массы наблюдений дѣйствительные законы движенія планетъ. Гипотеза Ньютона есть плодъ этихъ выводовъ и ими одними она сильна, дѣлается дѣйствительной теоріею, захватывающею всѣ частности природнаго явленія. Нельзя и думать, чтобы такая вѣрная гипотеза зародилась безъ сумнѣально известныхъ фактovъ, или при помощи одного общаго

¹) Три гипотезы Ньютона суть: 1) жидкость рѣдкая упругая, состоящая изъ упругихъ частицъ, 2) жидкость рѣдкая упругая, состоящая изъ неупругихъ частицъ и 3) жидкость сплошная. Для шара (градусъ) получается по первой сопротивлѣніе $= 2h\pi r^2 \Delta$, по второй $= h\pi r^2 \Delta$, по третьей $\frac{h}{2} \pi r^2 \Delta$, где h есть высота, отвѣчающая скорости, Δ плотность. Для воздуха и воды Ньютонъ получилъ по опыту результатъ близкій къ третьей гипотезѣ, и нельзя же воздухъ счесть неупругою жидкостью. Кроме того эта третья гипотеза, оправдавшаяся для шаровъ, сама по себѣ очевидно не ограждаетъ дѣйствительности, потому что по ней сопротивлѣніе шара и цилиндра при одинакъ съченіи одинаково, чего нѣтъ въ дѣйствительности и что не могъ, конечно, думать самъ Ньютонъ.

знакомства съ явлениями. Хотя такая случайность мыслима, но ея не быть въ исторіи знаній. И немудрено, что въ сложномъ вопросѣ сопротивленія среды, безъ точнаго знакомства съ дѣйствительностью, Ньютонъ и др. теоретики задались гипотезою, совершенно не удовлетворяющею природѣ явлений. Обыкновенно, вслѣдъ за Ньютономъ считали сопротивленіе зависящимъ отъ удара передней части движущагося тѣла о шарообразная частицы среды — которымъ, разъ ударившись о поверхность тѣла, навсегда ее оставляютъ и действуютъ независимо другъ отъ друга. При такой гипотезѣ сопротивленіе среды сводится къ ясному и простому вопросу объ ударѣ тѣла. Все сомнѣніе въ приложеніи къ дѣйствительности ограничивается при этомъ обыкновенно вопросомъ о мѣрѣ упругости ударяющихъ тѣлъ. Можно было бы ждать поэтому большаго различія между сопротивленіемъ газовъ и капельныхъ жидкостей и можно было бы думать далѣе, что задняя, кормовая часть движущагося тѣла не оказываетъ вліянія на сопротивленіе — а это не отвѣчаетъ дѣйствительности. Так же мало соотвѣтствуетъ ей основная формула, выводимая изъ гипотезы и принаровленная при помощи коэффиціента К къ дѣйствительности, а именно:

$$R = KM\Delta v^2 \sin^2 \alpha^{-1} \dots \dots \dots \quad I$$

гдѣ R есть прямое давленіе или сопротивленіе (число килограмм.), испытываемое тѣломъ въ направленіи движения. K постоянный коэффиціентъ, одинаковый для всякой среды и для всѣхъ тѣлъ, M величина (куб. метры) плоскости, представляющей проекцію движущейся плоскости (или призматического тѣла, движущагося по своей оси, потому что въ обоихъ случаяхъ проекція одна) на плоскость, перпендикулярную къ направленію движения (въ случаѣ призмы — M есть сѣченіе призмы, въ шарѣ это есть площадь большаго круга, въ кораблѣ — плоскость миделя); Δ вѣсь (килограммы) одного объема (одного куб. метра) жидкости, въ которой происходитъ движение (въ случаѣ воды Δ близка къ 1000, для морской воды

¹⁾ Мы увидимъ далѣе, что такая же точно формула удовлетворяетъ и тому случаю, когда рассматривается сопротивленіе, перпендикулярное къ плоскости, если на мѣсто величины M поставить величину самой плоскости при наклонѣ α . Въ этомъ послѣднемъ видѣ часто при математическомъ изслѣдованіи предмета примѣняютъ формулу сопротивленія. Но въ практическомъ примѣненіи приличнѣе для сущности дѣла относить сопротивление къ проекціи тѣла, а не къ его поверхности (напр. къ миделю корабля, а не къ его передней боковой поверхности) и опредѣлять только то сопротивленіе, которое дѣйствуетъ въ направленіи пути, и не въ направленіи, перпендикулярномъ къ плоскости движущагося тѣла, а потому мы придали здѣсь всѣмъ множителямъ формулы сопротивленія вышеуказанное значение. Такъ какъ значеніе членовъ, входящихъ въ основную формулу сопротивленія, должно быть вполнѣ ясно усвоено для знакомства съ сопротивленіемъ, то вслѣдъ за симъ я считаю нужнымъ развить приложение формулы сопротивленія для разныхъ простѣйшихъ случаевъ ея примѣненія. Считаю также полезнымъ упомянуть здѣсь, что вышеприведенный видъ формулы сопротивленія, отвѣчающей идеямъ Ньютона, данъ былъ не сакимъ, а его послѣдователями, но былъ почти тотъ же у Pardics въ 1670 году. (См. Gehler's Phys. Wörterbuch X. p. 1810).

въ 1020, для воздуха въ 1,2); v скорость (въ метрахъ), то-есть путь, проходимый въ одну секунду, α уголъ, образуемый переднею плоскостю съ направлениемъ пути (съ осью призмы).

Обходя подробности изложения гипотезы¹⁾ и выводъ ея дѣствій, укажемъ только главныя руководящія соображенія Ньютона и его ближайшихъ послѣдователей въ теоретической части ученія о сопротивленіи среды. Взаимодѣйствія жидкихъ частицъ, равно какъ и треніе частицъ среды о движущемся тѣло, первые исследователи считали столь малыми сравнительно съ тѣми затратами, которыхъ идутъ на перемѣщеніе частицъ, что вовсе не приняли въ разсчетъ при опредѣленіи сопротивленія. Другими словами, это значитъ, что все сопротивленіе среды приписывалось ея *инергіи*, то-есть въ затрату силы и двигателя считали происходящую отъ необходимости сдвинуть, вывести изъ покоя массу жидкости, уступающей свое мѣсто движущемуся тѣлу. При такомъ представлении, конечно, можно было уподобить весь механизмъ сопротивленія удару тѣль. Относительно этого послѣдняго, какъ известно, должно отличать ударъ упругихъ тѣль (какъ билліардный шаръ) отъ удара неупругихъ тѣль (каковъ до некоторой степени свинецъ). Природный же тѣла занимаютъ средину, потому что иѣтъ ни совершенно упругой, ни абсолютно неупругой матеріи. Если представимъ, что въ неподвижной средѣ плоскость движется въ направлениіи нормальномъ къ каждой линіи на ней лежащей, то-есть уголъ между плоскостью и направлениемъ ея движенія есть прямой ($\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$), то очевидно прежде всего, что сопротивленіе, по смыслу вышеприведенного представления о немъ, будетъ пропорціонально величинѣ плоскости (M въ уравненіи I) и что, при той же скорости, оно будетъ возрастать пропорціонально плотности среды λ , потому что масса сдвигаемыхъ частицъ среды возрастаетъ съ величиною плоскости и числомъ частицъ, содержащихся въ одномъ объемѣ.

Такъ какъ при возрастаніи скорости не только возрастаетъ число частицъ, ударяющихъ о тѣло, но еще и сила удара, то и должно ждать возрастанія сопротивленія пропорціонально квадрату скорости (v^2). Съ измѣненіемъ уклона плоскости къ направлению движенія, о данную плоскость ударяетъ очевидно во столько разъ меньшее число частицъ, во сколько синусъ угла меньше синуса прямаго угла, то-есть единицы; сверхъ того въ направлениіи движенія встрѣчается при этомъ лишь уменьшенное сопротивленіе, потому что сила удара разлагается по направлению параллельному плоскости и по направлению ей перпендикулярному, изъ которыхъ дѣйствуетъ только послѣдняя слагающая. Но и она, въ свою очередь, разлагается на двѣ силы: одну параллельную движенію, другую перпендикулярную къ ней. Обыкновенно изслѣдуется только эта послѣдняя. Другая слагающая сопротивленія перпендикулярна пути и составляетъ то реакціонное дѣйствіе сопротивляющейся среды, которое сжимаетъ бока судна

¹⁾ Они изложены въ прибавлениіи, сопровождающемъ эту книгу.