

ИрД

Б-251674

К.Э. ЦИОЛКОВСКИЙ

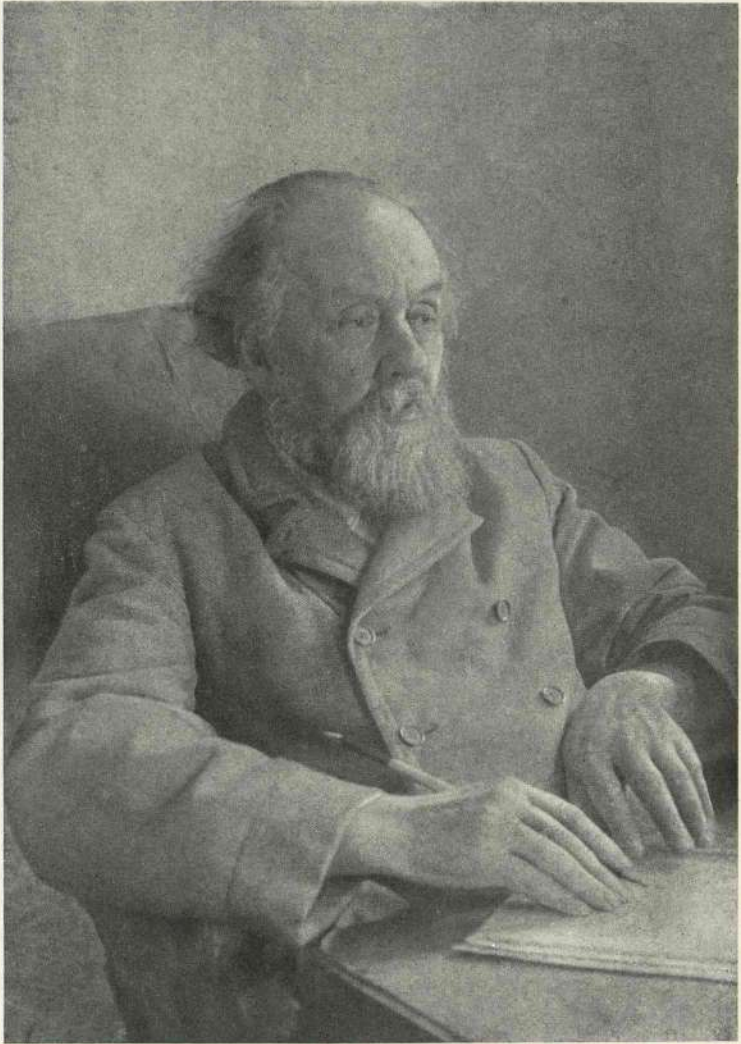
СОБРАНИЕ
СОЧИНЕНИЙ

крж
Б-257674

18
02

КНИГА ДОЛЖНА БЫТЬ
ВОЗВРАЩЕНА НЕ ПОЗЖЕ
УКАЗАННОГО ЗДЕСЬ СРОКА

Колич. предыд. выдач _____



АКАДЕМИЯ НАУК СССР

к.р.я
629.3
Ц-663

К.Э. ЦИОЛКОВСКИЙ

СОБРАНИЕ СОЧИНЕНИЙ

*

Том первый

АЭРОДИНАМИКА

Б-251674

ПРОБЕЖНО
1884 г.

ИЗДАТЕЛЬСТВО
АКАДЕМИИ НАУК СССР

Москва 1951



1951 г.

Печатается по постановлению
Совета Министров СССР
от 23 апреля 1948 г.

Издание подготовлено комиссией
Отделения технических наук АН СССР
по разработке научного наследия и подготовке к изданию
трудов К. Э. Циолковского:
академик *Б. Н. Юрьев* (председатель), члены комиссии—
проф., доктор физ.-мат. наук *А. А. Космодемьянский*,
доктор техн. наук *В. А. Семенов*,
инженер *Б. Н. Воробьев* (ученый секретарь)

*
Ответственный редактор академик *Б. Н. Юрьев*

2-22184

ИЗДАТЕЛЬСТВО
АКАДЕМИИ НАУК СССР
Москва 1951



1951

ПРЕДИСЛОВИЕ

Имя знаменитого ученого К. Э. Циолковского хорошо известно у нас и за рубежом. Его оригинальные исследования, в которых он не только провидел, но теоретически обосновал возможность реактивных самолетов и ракет дальнего действия, представляют в наше время большой интерес для широких кругов авиационных работников. Он является творцом науки звездоплавания (космонавтики), занимающейся вопросами междупланетных сообщений, и вывел классические формулы полета ракеты.

Задолго до создания реальных воздушно-реактивных самолетов он дал их эскизы и разработал их теорию. Много занимался К. Э. Циолковский вопросами дирижаблестроения, предложил ряд оригинальных конструкций металлических дирижаблей и указал на экономичность больших воздушных кораблей. Циолковский был пионером и основоположником в области экспериментальной аэродинамики. Он построил в 1897 г. в г. Калуге одну из первых в мире аэродинамических труб и провел в ней в течение пяти лет систематические исследования различных моделей крыльев, дирижаблей, различных геометрических тел и т. д. Обработка экспериментальных данных и теоретические соображения позволили К. Э. Циолковскому установить ряд важнейших законов аэродинамики. Эту работу высоко оценил Н. Е. Жуковский.

В работе «Аэроплан, или птицеподобная (авиационная) летательная машина», 1894 г.* Циолковский впервые дал аэродинамический расчет аэроплана и предложил рациональную схему самолета, на много лет опередив техническую мысль других стран. Высказанные предложения легли в основу структуры современного самолета — моноплана с безрасчалочным крылом обтекаемой формы, колесным шасси и соосным вращением винтов. В этом же сочинении он впервые в мире предложил гироскопический автопилот с электрическим приводом для руля высоты.

Помимо научно-технических исследований, Циолковский написал ряд работ по вопросам естествознания. Большинство из них является выражением его материалистических взглядов на природу, на строение космоса, на будущее человечества.

* Журнал «Наука и жизнь», 1894, № 43—46.

Тяжела была в дореволюционное время жизнь Циолковского. Самоучка, полуглухой с детства, он должен был учиться самостоятельно, до всего доходя своим умом. Бедность преследовала его почти всю жизнь. Лишь при Советской власти он получил признание, был окружен заботой и вниманием.

Несмотря на то, что здоровье его было сильно подорвано невзгодами и тяготами дореволюционного периода, он работал с исключительным подъемом и продуктивностью. Если в течение 26 лет до революции ему удалось напечатать менее 50 работ (около 80 осталось в рукописях), то при Советской власти из-под его пера ежегодно выходило свыше 20 произведений, значительную часть которых он обрабатывал для печати. В 1934 г. вышло в свет 2 тома его «Избранных трудов» по цельнометаллическим дирижаблям и реактивным летательным аппаратам. Его труды были проникнуты бодрим духом и верой в светлое будущее человечества.

К. Э. Циолковский много и плодотворно работал на благо социалистической Родины, Советского государства, которое создало ему для этого все условия. В 1932 г., в день его 75-летия, Правительство удостоило его за научные труды и изобретения высокой награды — Орденом Трудового Красного Знамени.

Перед смертью он в письме на имя товарища И. В. Сталина завещал все свои труды «партии большевиков и Советской власти — подлинным руководителям человеческой культуры».

Великий вождь нашего народа И. В. Сталин в теплом ответном письме благодарил К. Э. за его труды на пользу нашей Родины.

Труды Циолковского издавались несколько раз, но далеко не в полном виде и в плохом оформлении.

В связи с передачей, по решению правительства, всего архива К. Э. Циолковского Академии Наук СССР, при Отделении технических наук АН образована Комиссия по разработке и подготовке к изданию его трудов. Она наметила следующее распределение материалов по томам: Том I. Аэродинамика. Том II. Реактивные летательные аппараты. Том III. Изобретения К. Э. Циолковского и труды его по разным вопросам. Том IV. Вопросы естествознания. Том V. Автобиография К. Э. Циолковского. Материалы для биографии. Переписка. Библиография.

Особым тиражом будет издан дополнительный том, который будет содержать популярные и научно-фантастические произведения К. Э. Циолковского. Издание будет включать некоторые еще не публиковавшиеся труды Циолковского.

Пусть это издание будет новым памятником деятельности нашего гениального ученого, предвидевшего и своими трудами способствовавшего развитию новой техники!

Академик Б. Юрьев

О РАБОТАХ К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО ПО АЭРОДИНАМИКЕ

Вопросы аэродинамики глубоко интересовали К. Э. Циолковского на протяжении всей его многосторонней научной жизни. Первая работа Циолковского, в которой он рассматривает проблемы аэродинамики («Теория и опыт аэростата, имеющего в горизонтальном направлении удлиненную форму»), относится к 1885 г., а его последняя работа по аэродинамике («Давление нормального потока на плоскость») — к 1934 г. В течение этих пятидесяти лет Циолковский многократно возвращался к вопросам аэродинамики и подолгу занимался ими.

Аэродинамика представляла для Циолковского не только теоретический интерес. В противоположность многим исследователям прошлого столетия, которые строили расчеты летательных аппаратов на догадках и гипотезах, великий русский ученый К. Э. Циолковский ясно понимал, что без достоверных знаний о сопротивлении воздушной среды, подъемной силе летательного аппарата и других характеристик силового взаимодействия летательного аппарата и среды невозможен прогресс ни в авиации, ни в воздухоплавании. Он неоднократно подчеркивал прикладное значение устанавливаемых им законов аэродинамики и сам дал прекрасные образцы их применения к расчету самолета и дирижабля.

В своей творческой работе в области аэродинамики Циолковский всегда ставил результаты теоретического исследования под контроль опыта. Вводя в теории то или иное допущение, он всякий раз делает оговорку о том, что считает это допущение и выводы из него верными лишь в тех пределах, в которых они оправдываются на опыте.

Циолковский был великим мастером экспериментального искусства. Он умел добиваться в опыте ясного ответа на поставленный вопрос наиболее простыми и общедоступными средствами. Вместе с тем, он был неутомим в опытах, исчерпывая в своем исследовании все возможные изменения входящих в опыт величин. Однако он никогда не оставлял опытные результаты в виде простого нагромождения фактов; он искал и с поразительной интуицией находил общие теоретические зависимости между наблюдаемыми величинами.

Таковы характерные черты аэродинамических исследований К. Э. Циолковского — одного из основоположников современной аэродинамики.

* * *

Первой работой Циолковского, полностью посвященной проблемам аэродинамики, является рукопись «К вопросу о летании посредством крыльев»; она была написана в 1890/91 г. В этой работе К. Э. изучает при помощи совершенно оригинальных, самобытных методов величину силы давления воздуха на плоскую пластинку.

В основу теоретической части исследования им положена следующая общая картина перемещения частиц жидкости при движении пластинки перпендикулярно своей плоскости: «Наибольшую скорость,— пишет К. Э.,— приобретают частицы, лежащие близ движущейся пластинки; при этом движение частиц спереди и сзади пластинки имеет одно и то же направление: передние частицы гонятся вперед, задние увлекаются по тому же направлению. Близлежащие частицы толкают далее лежащие; но так как пространство, или, так сказать, русло их постепенно расширяется, то скорость частиц тем более уменьшается, чем дальше они расположены от движущейся пластинки. Также и задние частицы увлекают части воздуха, за ними лежащие, и скорость уменьшается в таком же отношении. В конце концов линия движения передних и задних частиц составляет одну замкнутую кривую, так что передние частицы жидкости направляются по этим кривым за пластинку».

Эта картина движения значительно ближе к действительности, чем картина движения по господствовавшей в то время ньютоновской ударной теории. Приведенная цитата свидетельствует о замечательной ясности физических представлений Циолковского, положенных им в основу исследования.

Циолковский теоретически определяет величину силы давления жидкости на плоскую пластинку не только при ее движении перпендикулярно своей плоскости, но и при наличии двух одновременных движений: перпендикулярного своей плоскости и параллельного ей. Он выясняет в результате, что сила давления пропорциональна синусу угла атаки; как известно, при малых углах атаки это полностью соответствует действительности. Но, пожалуй, самый интересный и ценный результат, полученный Циолковским в этой первой его работе, заключается в выяснении влияния продолговатости пластинки (по теперешней терминологии — удлинения) на величину силы давления. Циолковский устанавливает теоретическим путем, что при прочих равных условиях сила давления потока на пластинку пропорциональна корню квадратному из ее продолговатости. Этот замечательный закон опережает приблизительно на тридцать лет дальнейшее развитие теории крыла. Циолковский первый

из всех исследователей в области аэродинамики указал на значение продолговатости крыльев для летательного аппарата, объяснил причину продолговатости крыльев птиц и насекомых и дал зависимость силы давления от продолговатости, качественно близкую к зависимости, устанавливаемой современной теорией крыла. Он прекрасно понимал огромное значение своего открытия для науки; в своих позднейших (февраль 1893 г.) замечаниях относительно работы «К вопросу о летании посредством крыльев» К. Э. Циолковский пишет: «Эта статья писана в таком духе, будто никто ничего в этом направлении до меня не сделал. И действительно, не имея в своей глуши библиотеки, я работал совершенно самостоятельно, если не считать самых элементарных научных данных. Потом профессор Жуковский указал мне на ряд исследований, содержащих выводы, сходные с моими.

Тем не менее, закон, выражающий зависимость силы давления жидкости от продолговатости крыла, составляет новость в науке». В значительно более позднем обзоре своих трудов, который Циолковский составил в 1932 г., он пишет о себе в третьем лице: «Он первый установил и подтвердил опытами закон сопротивления продолговатых пластинок». Однако приоритет Циолковского в решении этого важнейшего вопроса теории крыла был у нас незаслуженно, но основательно забыт. Следует надеяться, что в результате настоящего издания трудов Циолковского этой несправедливости будет положен конец.

Значительную часть работы «К вопросу о летании посредством крыльев» составляет опытная проверка теоретических выводов. Циолковский создает весьма простой и остроумный прибор, при помощи которого можно было определить силу давления потока на крыло (вместе с тем «доступный для моего кошелька», замечает К. Э.). В этом приборе укрепленные на оси крылья могут некоторое время вращаться посредством нитки, разматываемой тяжестью груза. Если во время этого вращения идти с прибором в руках, стараясь, чтобы направление движения было параллельно оси прибора, то вращение крыльев замедляется в зависимости от величины скорости поступательного движения. Наблюдая время разматывания нити, можно определить силу давления на крыло при разных углах атаки, скоростях потока и удлинениях крыла.

Этот прибор очень понравился профессору Н. Е. Жуковскому, который сам демонстрировал его на механической выставке в Москве в 1894 г. Впоследствии этот прибор был подарен Жуковским студенческому воздухоплавательному кружку при МВТУ и находится в музее, который был организован кружком в МВТУ. Проф. Жуковский, прочитав в рукописи работу «К вопросу о летании посредством крыльев», в целом высоко оценил ее. Он пишет (в отзыве, направленном проф. А. Г. Столетову): «Сочинение г. Циолковского производит приятное впечатление, так как автор, пользуясь малыми средствами анализа и дешевыми экспериментами,

пришел по большей части к верным результатам. ... Оригинальная метода исследования, рассуждения и остроумные опыты автора не лишены интереса и, во всяком случае, характеризуют его как талантливого исследователя... Рассуждения автора применительно к летанию птиц и насекомых верны и вполне совпадают с современными воззрениями на этот предмет».

Работа «К вопросу о летании посредством крыльев» в ее первоначальном виде не была напечатана. Сам К. Э. ее значительно сократил и переработал для печати. После этого она появилась в 1891 г. в IV томе Трудов Отделения физических наук Общества любителей естествознания под названием «Давление жидкости на равномерно движущуюся плоскость». Извлечение из той же работы «К вопросу о летании посредством крыльев», относящееся к полету птиц и насекомых, было значительно позднее (в 1912 г.) напечатано в журнале VII Воздухоплавательного отдела Русского технического общества «Техника воздухоплавания» за 1912 г., № 3, стр. 138—147 под названием «Устройство летательного аппарата насекомых и птиц и способы их полета». Как указывает сам К. Э. в примечании к этой статье, она не устарела и не противоречит позднейшим опытам и исследованиям. Он лишь немного ее дополнил. Обе эти работы — «Давление жидкости на равномерно движущуюся в ней плоскость» и «Устройство летательного аппарата насекомых и птиц» помещены в настоящем издании. Кроме того, здесь впервые печатается заметка К. Э. «Объяснение вихреобразных движений в воздухе и воде», также составляющая часть работы «К вопросу о летании посредством крыльев». В этой короткой, но принципиально весьма важной заметке К. Э. указывает, что наличие двух противоположных течений в жидкости (например, при обтекании кромок пластинки) является одной из причин образования вихрей. Как известно, это полностью соответствует и современным представлениям об условиях образования вихрей. В настоящем издании воспроизведены, таким образом, все основные части первой работы Циолковского по аэродинамике «К вопросу о летании посредством крыльев».

Основные выводы этой работы не остались у Циолковского без применения: для него всегда было характерным стремление двигаться вперед в области техники, освещая себе путь светом теории. В данном случае результаты аэродинамических исследований Циолковского помогли ему в разработке рациональной схемы летательного аппарата и в создании основ его аэродинамического расчета. Исследование Циолковского, посвященное этим вопросам, — «Аэроплан, или птицеподобная (авиационная) летательная машина» (1894) бесспорно составляет эпоху в развитии авиационной техники. Указав вначале на ошибочность пессимистической теории полета, согласно которой «гусь, держащийся на воздухе, должен выделять лошадиную энергию», Циолковский при помощи простых соображений и опытов устанавливает далее, что причиной ошибки является

недооценка роли поступательного движения. При махании крыльями и одновременном поступательном движении работа машущего крыла, необходимая для поддержания в воздухе, должна значительно уменьшиться. Наиболее важным разделом работы является глава II, названная автором «Очерк простейшей конструкции авиационного прибора». В противоположность многим заграничным авиационным конструкторам того времени, увлекавшимся, в результате механического подражания птицам, аппаратами с машущими крыльями, Циолковский указывает, что «подражание птице в техническом отношении весьма затруднительно вследствие сложности движения крыльев и хвоста, а также и вследствие сложности устройства этих органов». «Мы, — пишет Циолковский, — будем подражать птице только отчасти, насколько можем». Он выдвигает проект летательного аппарата, во всех своих основных чертах превосходящий современный моноплан со свободнонесущими крыльями. «Наш снаряд, — пишет Циолковский, — имеет форму застывшей парящей птицы, но вместо ее головы вообразим два гребных винта, вращающиеся в обратные стороны и дающие тягу в одном направлении... Мускулы животного мы заменим взрывными нейтральными двигателями. Они не требуют большого запаса топлива (бензин) и не нуждаются в тяжелых паровиках и больших запасах воды... Вместо хвоста устроим двойной руль — из вертикальной и горизонтальной плоскости». «Двойной руль, двойной винт и неподвижность крыльев, — разъясняет он далее, — придуманы нами не ради выгоды и экономии работы, а единственно — ради исполнимости конструкции». Особое внимание уделяет Циолковский конструкции крыльев. Им впервые предложено безрасчалочное свободнонесущее, равнопрочное крыло, состоящее из полых металлических трубок; впервые предусмотрен удобообтекаемый фюзеляж и указаны два возможных варианта соединения крыла с фюзеляжем: по схеме среднеплана и по схеме типа «чайка». Таким образом, Циолковскому принадлежит приоритет в создании и исследовании современной схемы моноплана со свободнонесущими крыльями.

Значительная часть работы посвящена «выводу законов полета» — по его выражению, а по нашей теперешней терминологии — аэродинамическому расчету самолета. Циолковский определяет потребную для поддержания самолета скорость, мощность двигателей и ряд других аэродинамических характеристик самолета. Этот раздел представляет собой первое по времени изложение элементов аэродинамического расчета самолета.

В этой же работе «Аэроплан, или птицеподобная (авиационная) летательная машина» Циолковский подробно разрабатывает вопросы управления самолетом в полете, взлета и посадки. В частности, им выдвинуты здесь идеи применения на самолете гироскопа и электромагнитного автоматического управления рулями. Несколько ранее (1893) им была дана схема автоматического электромагнитного управления для дирижабля.

Таким образом, именно Циолковский является основоположником авиационной электроавтоматики.

Сам Циолковский, оценивая впоследствии (1929) значение своих исследований по теории аэроплана, писал в предисловии к статье «Новый аэроплан»: «Первый труд мой, посвященный аэроплану, появился в журнале „Наука и жизнь“ в 1895 г.

До этого еще никто не разработал так подробно теорию аэроплана и с такими конкретными выводами, только теперь оправдавшимися».

Работы по теории аэроплана и дирижабля со всей очевидностью показали Циолковскому, что серьезным тормозом дальнейшего развития теории является почти полное отсутствие сколько-нибудь надежных, проверенных опытом данных о сопротивлении среды. Господствовавшие в то время среди воздухоплателей представления о силовом взаимодействии среды и летательного аппарата были в значительной своей части основаны лишь на умозрительных заключениях и мало достоверны. Так, например, один из авторитетных представителей VII (Воздухоплательного) отдела Русского технического общества — М. М. Поморцев полагал, как об этом пишет Циолковский, что форма кормовой части тела не играет роли в образовании силы сопротивления, что, далее, трением воздуха о поверхность тела можно пренебрегать даже для продолговатых тел. Разумеется, что все это совершенно неверно. Другой видный представитель воздухоплательной техники того времени Е. С. Федоров, полемизируя с К. Э. Циолковским по поводу его работы «К вопросу о летании посредством крыльев», указывал, что Циолковский, якобы, неправ, принимая понижение давления за пластинкой, движущейся перпендикулярно своей плоскости, равным повышению давления перед ней. «Принято считать,— писал Федоров, что понижение давления за пластинкой составляет 0,1 от избыточного давления перед нею». Однако выводы Циолковского оказались гораздо более близкими к действительности, чем общепринятая точка зрения.

Но, разумеется, Циолковский не мог бороться против всех этих неправильных представлений в области аэродинамики, не основываясь на экспериментально проверенных фактах. Его собственные опыты с вертушкой, о которых выше шла речь, позволили определить силу давления воздуха лишь на плоскую пластинку; все вопросы о влиянии кормовой части тела на его сопротивление, о величине силы трения воздуха и многие другие оставались невыясненными. Поэтому Циолковский настойчиво ищет путей экспериментального решения задач аэродинамики. Он конструирует (1894) прибор, который позволяет сопоставлять сопротивление любого тела с сопротивлением плоской пластинки. Этот прибор состоял из равноплечего рычага, на одном конце которого укреплялась испытываемая модель, а на другом — плоская пластинка, которая урезывалась до тех пор, пока при движении прибора в воздухе не наступало равновесие.

Опыты с этим прибором, результаты испытания тел вращения разной продолговатости и определения силы трения воздуха описаны Циолковским в его работе, относящейся к 1896 г. «Железный управляемый аэростат на 200 человек, длиною с большой морской пароход»; соответствующая глава из этой работы («Опыты и формулы, на основании которых я делаю свой расчет самостоятельной скорости аэростата») воспроизведена в настоящем издании. В этой же работе описан и другой прибор Циолковского, предназначенный для испытания на естественном ветре. Испытываемые модель и пластинка помещаются здесь внутри труб, которые устанавливаются своей осью вдоль направления ветра. Впервые публикуемая в настоящем издании фотография этого прибора и моделей к нему дает наглядное представление об огромном разнообразии геометрических форм, исследованных Циолковским при помощи естественного ветра.

Систематически занимаясь исследованием сопротивления среды сначала на приборах, в которых испытываемую модель надо было приводить в движение в спокойном воздухе, затем на приборах, использующих естественный ветер, Циолковский пришел к идее устройства аэродинамической трубы. Циолковский об изобретении им аэродинамической трубы пишет следующее: (статья «Самостоятельное горизонтальное движение управляемого аэростата» в журнале «Вестник опытной физики и элементарной математики», № 258 и 259, Одесса, 1897): «В последнее время, производя проверочные опыты, я придумал делать их по совершенно новому методу и при искусственном ветре (лопастная воздуходувка — род большой веялки) (подчеркнуто здесь и далее нами.— Н. Ф.). Пока мною производился только эксперимент с моделью в 42 см длины. Опыты подтвердили данные нами формулы, и для взятой модели я получил коэффициенты сопротивления, постепенно уменьшающиеся с увеличением быстроты искусственного воздушного потока. Новые методы позволяют производить исследования во всякое время и с достаточной точностью; они также весьма удобны и для демонстрации».

Кроме этого первого печатного упоминания о новом методе испытания моделей в условиях искусственного ветра, имеется ряд важных документов, освещающих картину создания К. Э. Циолковским первой в России аэродинамической трубы и устанавливающих неоспоримый приоритет его в этом деле. К числу этих документов относится публикуемое в настоящем томе первое описание Циолковским его аэродинамической трубы, посланное 12 октября 1897 г. при письме профессору А. Л. Гершуну (найдено в 1937 г. ивж. Б. Н. Воробьевым). Письмо это вместе с чертежами аэродинамической трубы и аэродинамических весов, а также с упоминавшейся ранее фотографией прибора для испытания на естественном ветре предназначалось для передачи в Комиссию Русского физико-химического общества, которая должна была рассмотреть проект опытов

Циолковского по изучению сопротивления воздуха. Письмо содержит, между прочим, краткую, но выразительную просьбу Циолковского: «Прежде всего покорнейше прошу гг. многоуважаемых членов Комиссии, дав свое мнение Обществу, не сообщать ничего и никому о моих работах и планах до окончания их и напечатания» (подчеркнуто автором.— *Н. Ф.*). Нравы капиталистического общества, повидимому, были очень хорошо знакомы Циолковскому.

В приложении к письму впервые даны описание и чертежи аэродинамической трубы, а также совершенно оригинальных, созданных Циолковским аэродинамических весов поплавкового типа, способа изготовления моделей и процесса опыта. Следует отметить высокую чувствительность и большую точность измерительного оборудования, которое изготовлялось Циолковским большей частью собственноручно; так, например, стрелка его поплавковых аэродинамических весов начинает отклоняться от исходного положения уже при действии на модель силы в один миллиграмм. Это обстоятельство позволило Циолковскому, несмотря на малые скорости потока, которыми он располагал (в первом варианте лопастное колесо воздуходувки приводилось во вращение от руки), и несмотря на малое сопротивление испытываемых моделей, измерить его с большой точностью и установить важнейшие законы сопротивления.

Комиссия Русского физико-химического общества признала весьма желательной постановку опытов Циолковским, однако, нашла, что просимая им сумма на финансирование опытов (100—200 руб.) чересчур мала, и на этом «основании» постановила совсем отказать ему в пособии. Циолковский продолжал вести работу на свои личные скудные средства, и без того сильно урезанные постройкой аэродинамической трубы и оборудования к ней. Результаты своего исследования Циолковский опубликовал в 1898 г. в исторической статье «Давление воздуха на поверхности, введенные в искусственный воздушный поток», которая положила начало современной экспериментальной аэродинамике. В этой работе Циолковский впервые в истории науки выполнил при помощи оригинальных приборов и оригинальной методики опыта систематическое экспериментальное исследование лобового сопротивления и подъемной силы тел разной геометрической формы, в том числе моделей крыльев и корпусов дирижаблей. Он впервые установил здесь ряд основных законов аэродинамики (влияние продолговатости тела вращения на его сопротивление, влияние удлинения крыла на его аэродинамические характеристики, зависимость силы трения от размеров поверхности тела и скорости потока и многие другие). Он впервые указал на значение аэродинамической трубы для решения проблем аэродинамики («прибор этот,— пишет он,— должен считаться необходимой принадлежностью каждого университета или физического кабинета»). Таким образом, К. Э. Циолковский с полным

правом может быть назван основоположником современной экспериментальной аэродинамики.

Свою работу «Давление воздуха на поверхности, введенные в искусственный воздушный поток» Циолковский заканчивает горячим призывом к дальнейшему движению вперед в области изучения законов аэродинамики: «...как важно, — пишет он, — точно формулировать законы сопротивления и трения! Какое громадное применение они имеют к теории аэростата и аэроплана! Да и есть ли области техники и науки, в которых законы сопротивления упругой среды не имели бы значения? Так пожелаем же горячо установления этих законов и поспособствуем, насколько от нас зависит, производству необходимых для того опытов».

Для того чтобы оценить научный подвиг самого Циолковского, который он совершил, выполняя эту работу, следует вспомнить, с каким тяжелым физическим трудом и утомительными вычислениями она была сопряжена. Аэродинамическая труба («лопастная воздуходувка» — по терминологии Циолковского) приводилась в действие гирей, которую для каждого опыта надо было поднимать к потолку. В течение короткого времени действия трубы нужно было сделать отсчет и затем самому же выполнить обработку опыта и построение графиков. Работа выполнялась ежедневно в течение четырех с лишним лет, во все свободное от учительской деятельности время.

Достоинство удивления, что несмотря на несовершенство аэродинамической трубы, малые скорости потока и утомительный труд, сопряженный с опытами, Циолковский сумел с поразительной точностью определить такую малую величину, какой является, например, сила трения воздуха о поверхность модели, и сумел установить основные закономерности, которым она следует.

Замечательное экспериментальное искусство Циолковского и его интуиция сказались и в обработке опытов. Выбрав степенные законы для зависимости силы трения от скорости потока и размеров модели, Циолковский отчетливо установил, что в формулу для коэффициента трения скорость и размер модели входят с одним и тем же показателем степени, как это и должно быть согласно теории динамического подобия. Следует в связи с этим отметить, что известный английский исследователь В. Фруд, который экспериментировал в несравненно лучших условиях, чем Циолковский, пришел к выводам относительно силы трения при движении в воде, противоречащим теории подобия.

Затраты на постройку аэродинамической трубы, приборов к ней и моделей для исследования исчерпали и без того скудные денежные средства Циолковского, и в 1899 г. он решил обратиться в Российскую Академию Наук за материальной помощью. Работа Циолковского, содержащая результаты его опытов по сопротивлению воздуха, была передана на заключение академику М. А. Рыкачеву. На заседании Физико-

математического отделения Академии академик Рыкачев дал весьма благоприятный отзыв об опытах Циолковского. В отзыве говорилось: «Опыты эти заслуживают полного внимания Академии как по идее, так и по разнообразию опытов. Несмотря на примитивные домашние средства, какими пользовался автор, он достиг определения скорости при различных грузах, приводивших в движение воздуходувку;... Автор определил зависимость сопротивления от скорости потока и от продолговатости формы. Весьма интересны опыты, производимые с целью определения влияния кормовой части;... насколько автору удалось получить надежные результаты, видно из того согласия, которое обнаружилось при испытании давления на плоскую пластинку;... изменения происходили почти совершенно точно так, как по теории можно было этого ожидать... По всем этим причинам производство опытов в более широких размерах и более точными приборами было бы крайне желательно, и я позволяю себе просить Отделение исполнить просьбу автора и оказать ему материальную поддержку из фонда, предназначенного на ученые потребности». Академия Наук, на основании доклада академика Рыкачева, решила поддержать Циолковского, и ему было ассигновано на производство опытов 470 руб. Циолковский приступил к постройке новой аэродинамической трубы, значительно больших размеров, чем первая. При постройке и наладке этой трубы им были предъявлены строгие требования к потоку, создаваемому вентилятором. Для того чтобы сделать лоток равномерным и имеющим везде одинаковое направление, Циолковский впервые применил здесь решетку, состоящую из ориентируемых перегородок. Почти весь 1900 год. Циолковский занимался постройкой новой аэродинамической трубы и оборудования к ней. В своей статье «Сопротивление воздуха и воздухоплавание» (1902 г.) он следующим образом описывает это: «Академия поручила рассмотрение моих работ академику М. А. Рыкачеву. Вследствие его благоприятного отзыва и ходатайства перед Академией, последняя решила выдать мне пособие (470 р.) на производство новых опытов, программа которых была также представлена мною в Академию. Это было в мае 1900 г. Я принялся тогда же за сооружение большой воздуходувной машины... дававшей поток в аршин высоты и ширины. Сделаны были и измерительные приборы,— и все это чуть не шесть раз переделывалось и перестраивалось, пока не получился воздушный поток, достаточно удовлетворительный.

К концу 1900 г. я мог начать клейку моделей и производство опытов. К концу следующего года (16 декабря 1901 г.) я уже выполнил часть предполагаемой программы и представил о сделанных опытах отчет в Академию. Этот отчет составлял только извлечение из моей рукописи и состоял из 80 писчих листов текста и 58 таблиц и чертежей».

Несмотря на то, что отчет получился весьма объемистый и содержал огромный экспериментальный материал и обобщающие его выводы, про-

грамма, намеченная Циолковским, была далека от завершения. «Работы еще очень много,— пишет К. Э. в той же статье «Сопrotивление воздуха и воздухоплавание»,— и бог весть, когда я ее окончу и решу те вопросы, которые мною подняты. По всей вероятности, придется предпринять новые труды, с лучшими приборами, для получения, в некоторых случаях, более точных результатов». Вопросы, поставленные Циолковским, были настолько широки и разнообразны, что требовали для своего разрешения создания специального аэродинамического института, что, впрочем, он и предлагал сделать в одном из писем в Президиум Академии Наук, которое осталось без ответа.

Отчет Циолковского Российской Академии Наук, предназначенный им для напечатания в трудах Академии, остался в дореволюционное время неизданным; он впервые воспроизводится в настоящем собрании сочинений Циолковского. Отчет не был напечатан в изданиях Академии, повидимому, из-за мелочной придирчивости, проявленной академиком Рыкачевым, к которому отчет был направлен для отзыва. Признавая в своем отзыве, что «опыты многочисленны, разнообразны, интересны и заслуживают внимания», академик Рыкачев вместе с тем предъявляет неумеренные, на наш взгляд, требования к автору отчета, выражая ему этим свое недоверие. Он пишет: «Для решения вопроса о помещении труда г-на Циолковского в изданиях Академии необходимо предварительно испросить от автора материал наблюдений в чистом виде, сгруппированный так, чтобы для каждого его вывода, данного в тексте, были приведены все наблюдения, из которых этот вывод сделан, с указанием, по крайней мере, дней, когда эти наблюдения произведены...; не должны быть пропущены и наблюдения, которые не приняты во внимание, с указанием причин. В сыром материале должны бы быть отмечены номера, под которыми каждый опыт переписан в таблицу». За этими номерами, которые не были отмечены, академик Рыкачев проглядел основное содержание работы и выводы из нее. Между тем в отчете были изложены следующие важнейшие соотношения, установленные Циолковским: экспериментально подтвержденная зависимость силы давления на пластинку от ее удлинения, зависимость силы давления на пластинку от угла атаки (в пределах от 0 до 90°), зависимость сопротивления цилиндра от его удлинения, угла наклона к потоку, размеров и скорости потока, зависимость подъемной силы и лобового сопротивления крыльев от их вогнутости и многие другие. В этом же отчете Циолковский, разрабатывая основы аэродинамического расчета самолета, устанавливает, что потребная мощность двигателей пропорциональна коэффициенту лобового сопротивления и обратно пропорциональна коэффициенту подъемной силы в степени с показателем $3/2$; в настоящее время соответствующая формула приводится во всех учебниках по аэродинамическому расчету. В этом же отчете Циолковский, основываясь на своих опытах с поверхностями, имеющими

большую длину вдоль потока, дал основные зависимости турбулентного трения. В этом отчете и в последующей своей работе «Сопrotивление воздуха и воздухоплавание», в которой даны наиболее важные выводы из отчета, Циолковский показывает, что коэффициент сопротивления всех тел зависит не только от их формы, но также от размеров тела и скорости потока. Он пишет в статье «Сопrotивление воздуха и воздухоплавание»: «До сих пор... всегда оказывалось, что коэффициент сопротивления зависит только от формы тела, но несколько не зависит от его размеров и скорости потока; иначе говоря, оказывалось, что сопротивление подобно изменяющихся тел пропорционально квадрату скорости потока и площади проекции тела на плоскость, перпендикулярную к потоку. Теперь мы видим, насколько эти выводы общепринятой теории неосновательны».

В той же статье «Сопrotивление воздуха и воздухоплавание» и в отчете Академии Наук Циолковский приходит к принципиально важному выводу о неправильности господствующих взглядов на природу сопротивления среды и способы теоретического определения величины сопротивления. Он формулирует этот вывод следующим образом: «Фундаментом для определения сопротивления какой-либо формы принималось давление на наклонную плоскость. Поверхность всякого тела можно представить себе состоящей из множества плоских граней. Произведя двойное интегрирование, получим полную силу давления на тело. Первое заблуждение состояло в том, что не принимали в расчет трения, так как всегда оказывалось, что с удлинением тела сопротивление среды уменьшается безгранично, что на опыте никогда не оправдывается... Далее, есть много формул, определяющих давление на наклонную элементарную площадку... Из последствий применения тех и других формул видно, что прием общепринятый вообще никуда не годен и составляет второе заблуждение: нужны новые взгляды на явление сопротивления и опыты, которые только и могут проверить верность этих новых взглядов». Таковы основные результаты работы Циолковского, выполненной им по заданию Академии Наук, оставшиеся непризнанными официальной наукой дореволюционного времени.

Дальнейшие труды Циолковского в области аэродинамики относятся к советскому периоду его жизни. Ряд вопросов аэродинамики затрагивается им в работе «Новый аэроплан», относящейся к 1929 г. Он выдвигает здесь идею безфюзеляжного аэроплана, прочность которого обеспечивается внутренним избыточным давлением. Отсутствие корпуса, стоек, колес, поплавков, расчалок и подкосов обуславливает при этом малое сопротивление аппарата.

Другая работа Циолковского, относящаяся к этому же периоду, называется «Давление на плоскость при ее нормальном движении в воздухе» (1930). Эта работа посвящена вопросу о давлении и температуре воздуха

при больших скоростях движения. Работа осталась незаконченной, как и ряд других лишь начатых фрагментов большого задуманного Циолковским труда «Основы построения газовых машин, моторов и летательных приборов».

* * *

Научное наследие Циолковского в области аэродинамики, как мы видим, велико и разнообразно. Его работы охватывают огромный круг вопросов, многие из которых были им впервые поставлены и решены. Он был подлинным пионером в аэродинамике, прокладывая в ней новые, оригинальные пути исследования. Но в царской самодержавной России правящие классы и тесно связанные с ними представители авиационной техники из VII отдела императорского Русского технического общества презирали и высмеивали, третировали и замалчивали работы замечательного русского ученого. Рабское преклонение перед границей было настолько привито этим кругам, они были так оторваны от русской национальной, народной почвы, что им казалось маловероятным осуществление пророческих слов гениального Ломоносова: «Может собственных Платонов и быстрых разумом Невтонов российская земля рождать». К самоучке-учителю, работавшему в провинциальной глуши над проблемами авиации и воздухоплавания, относились в этих официальных кругах с чванливым высокомерием, рассматривая его, в лучшем случае, как фантазера-изобретателя.

Только при Советской власти, с первых же месяцев ее установления, коренным образом изменилось отношение к великому ученому. Государственные учреждения, связанные с работой военного и гражданского воздушного флота, привлекали его к участию в своей деятельности; его научные труды стали систематически издаваться и получили широкое распространение. Животворная сила советского патриотизма дала Циолковскому новый жизненный импульс, который позволил ему преодолеть годы и физическое недомогание и плодотворно трудиться на благо своей Родины. Высоким патриотическим чувством проникнуты следующие строки из предсмертной статьи Циолковского «Полет в будущее», помещенной в Калужской газете «Коммуна». «Все, о чем я говорю, — слабая попытка предвидеть будущее авиации, воздухоплавания и ракетоплавания. В одном я твердо уверен — первенство будет принадлежать Советскому Союзу. Капиталистические страны также работают над этими вопросами, но капиталистические порядки мешают всему новому. Только в Советском Союзе мы имеем мощную авиационную промышленность, богатство научных учреждений, общественное внимание к вопросам воздухоплавания и необычайную любовь всех трудящихся к своей родине, обеспечивающую успех наших начинаний».



Высокое патриотическое чувство продиктовало Циолковскому и его предсмертное обращение к великому вождю народа товарищу Сталину: «Все свои труды по авиации, ракетоплаванью и межпланетным сообщениям, — писал он, — передаю партии большевиков и Советской власти — подлинным руководителям прогресса человеческой культуры. Уверен, что они успешно закончат эти труды».

Развитие авиационной науки в Советском Союзе и широкая популяризация идей Циолковского являются выполнением этого завещания великого русского ученого.

* * *

В работе над обширным архивным материалом, содержащим рукописи Циолковского по аэродинамике, а также в редактировании текста и составлении примечаний к нему была оказана неоценимая помощь ученым секретарем Комиссии по изданию трудов Циолковского инж. Б. Н. Воробьевым. Им же был составлен детальный библиографический обзор трудов Циолковского по аэродинамике, который позволил мне ориентироваться в богатейшем научном наследстве Циолковского. Пользуюсь случаем принести инж. Б. Н. Воробьеву мою глубокую признательность.

Н. Я. Фабрикант



АЭРОДИНАМИКА

ДАВЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ НА РАВНОМЕРНО ДВИЖУЩУЮСЯ В НЕЙ ПЛОСКОСТЬ*

Приношу живейшую благодарность А. Г. Столетову и Н. Е. Жуковскому, указавшим мне на значение моего труда среди других трудов такого же рода^{1**}.

К. Циолковский

Равномерное и прямолинейное движение плоской пластинки мы разложим на два слагающих движения, одно из которых — параллельное самой плоскости — мы будем называть, для краткости, параллельным, а другое, перпендикулярное к ней, — нормальным.

При установившемся нормальном движении сила давления жидкости на плоскую пластинку выражается формулой

$$F = \frac{K \cdot S \cdot d}{g} \cdot V_n^2 \quad (1)$$

в которой F означает силу давления; K — поправочный коэффициент, меньший единицы; S — площадь пластинки; d — объемный вес жидкости; g — ускорение силы тяжести; V_n — нормальную скорость пластинки; определение силы давления по этой формуле дает величины, весьма близкие к тем, которые получаются из опытов (ошибка не более $1/10$) при помощи вращательных приборов.

Но пока движение пластинки и окружающей ее среды еще не установилось, сила давления не может быть определяема формулой (1).

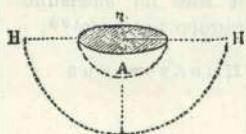
Определим сначала работу пластинки, необходимую для сообщения среде установившегося движения. Относительно характера этого движения жидкости мы должны принять какую-нибудь гипотезу, которую, разумеется, будем считать настолько вероятной, насколько выводы, вытекающие из нее, оправдаются опытом.

* Работа впервые напечатана в IV томе Трудов Отделения физических наук Общества любителей естествознания в 1891 г.

** Цифры означают ссылки на примечания, помещенные под теми же номерами в конце книги (стр. 265—268). (Ред.)

Вот одна из этих гипотез о движении несжимаемой среды в том случае, когда пластинка имеет форму круга (фиг. 1).

Наибольшую скорость приобретают частицы, лежащие близ движущейся пластинки, причем движение частиц спереди и сзади пластинки имеет одно и то же направление: передние частицы гонятся вперед, задние увлекаются по тому же направлению вследствие разрежения там воздуха. Мы допустим, что сфера жидкости, облегающая пластинку, как свой большой круг, имеет однообразную скорость, равную скорости пластинки; частицы этой сферы толкают и увлекают другие части жидкости, далее лежащие; но так как пространство, или, так сказать, русло их постепенно расширяется, то и скорость частиц жидкости тем более уменьшается, чем далее они расположены от движущейся пластинки.



Фиг. 1

На этом основании (фиг. 1), обозначая радиус пластинки через r , радиус какого-нибудь сферического слоя жидкости — через H , его скорость — через V , а скорость пластинки — через V_n , найдем

$$V = \frac{V_n \cdot \pi \cdot r^2}{2\pi \cdot H^2} = V_n \cdot \frac{r^2}{2H^2}, \quad (2)$$

ибо очевидно, что скорость слоя H во столько раз меньше скорости пластинки, во сколько поверхность слоя больше поверхности пластинки.

Что касается увлечения задних частей жидкости движением, подобным движению передних толкающих частиц, то в этом легко убедиться не только из опыта, но и теоретически. В самом деле, пусть пластинка сделала некоторое передвижение вперед; тогда, если бы жидкость не имела упругости и притом была бы помещена в среде, свободной от тяжести, — сзади плоскости, на величину ее передвижения, осталась бы брешь — пустота и увлечение жидкости пластинкой не существовало бы; но так как жидкость, в обыкновенных условиях, имеет тяжесть, не говоря уже об упругости, то она тотчас же и занимает образованную сзади пластинки пустоту. За первым задним слоем таким же образом увлекается следующий и т. д., совершенно подобно тому, как и передние слои жидкости толкают друг друга.

Дифференциал определяемой нами работы T движения жидкости равен

$$dT = dm \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (3)$$

где dm есть масса сферического слоя толщиной в dH ; но

$$dm = 4\pi \cdot H^2 \cdot dH \cdot \rho$$

и так как

$$V = V_n \cdot \frac{r^2}{2H^2},$$

К. Ціолковскій.

ДАВЛЕНІЕ ЖИДКОСТИ

Н А

РАВНОМѢРНО ДВИЖУЩУЮСЯ

ВЪ НЕЙ ПЛОСКОСТЬ.

Отдѣльный оттискъ изъ IV тома Трудовъ Отдѣленія Физическихъ Наукъ
Императорскаго Общества Любителей Естественнаго

МОСКВА.

Типографія М. Г. Волчанянова, Б Черныш пер, д. Пустошкина,
противъ Англійской церкви.

1891

то

$$dT = \frac{\pi \cdot d}{2g} \cdot V_n^2 \cdot \frac{r^4}{H^2} \cdot dH. \quad (4)$$

Интегрируя это уравнение, найдем

$$T = \frac{[-\pi \cdot d \cdot V_n^2 \cdot \frac{r^4}{H} + C, \quad (5)$$

где C есть постоянная интегрирования.

Если $H = r$, то работа T равна той, которая необходима, чтобы со-общить сфере A (фиг. 1) постоянную скорость V_n ; стало быть

$$\frac{3}{4} \pi \cdot r^3 \cdot d \cdot \frac{V_n^2}{2g} = \frac{-\pi \cdot d \cdot V_n^2}{2g} \cdot r^3 + C; \quad (6)$$

из двух последних уравнений получим

$$T = \frac{\pi \cdot d}{2g} r^3 \cdot V_n^2 \left(1 - \frac{r}{H}\right) + \frac{2\pi \cdot d}{3g} r^3 \cdot V_n^2. \quad (7)$$

Чтобы определить работу всей бесконечной окружающей плоскость жидкости, надо тут положить $H = \infty$; тогда найдем

$$T = \frac{7}{6} \cdot \frac{\pi \cdot d}{g} \cdot r^3 \cdot V_n^2. \quad (8)$$

Зная работу T и передвижение пластинки, можно узнать и среднее давление на нее.

Но прежде чем применять последнее уравнение к определению давления на плоскую пластинку при сложном ее движении (т. е. параллельном и нормальном), необходимо установить следующие положения:

а) Как теория, так и опыт показывают, что давление на пластинку при нормальном ее движении почти строго пропорционально ее площади, независимо от формы последней.

б) Точно так же теория и опыт показывают, что работа T в первый момент нормального движения пластинки выражается уравнением (8) независимо от формы пластинки, лишь бы она была не очень продолговата; на этих двух основаниях, теорию которых я тут выпускаю за недостатком места, формулу (8) можно применить и к прямоугольнику со сторонами a и b , не очень, однако, продолговатому; для этого заменим в ней $\pi \cdot r^2$ и r из выражений

$$\pi \cdot r^2 = S \quad \text{и} \quad \pi \cdot r^2 = a \cdot b, \quad \text{откуда} \quad r = \sqrt{\frac{ab}{\pi}};$$

тогда получим

$$T = \frac{7}{6} \cdot \frac{d}{g} \cdot S \sqrt{\frac{ab}{\pi}} \cdot V_n^2. \quad (9)$$

Определим теперь силу давления воздуха или, вообще, жидкости на прямоугольную пластинку, одна сторона a которой перпендикулярна направлению ее параллельного движения, а другая b параллельна ему.

Если бы пластинка имела только нормальную скорость V_n , то работа, затрачиваемая на приобретение этой скорости (в малый промежуток времени), выразилась бы уравнением (9). Но пластинка, кроме того, имея параллельную скорость V_p , прошла в единицу времени пространство V_n в направлении, перпендикулярном к прежнему, и потому ее секундная работа должна быть во столько раз больше работы по формуле (9), во сколько параллельная скорость V_p больше ширины b прямоугольника, по направлению которой совершается это движение. Действительно, при одной лишь нормальной скорости, прямоугольник сообщает известное движение воздуху близ площади величиною в $a \cdot b$; при поступательном же движении тот же прямоугольник в одну секунду сообщает движение воздуху близ поверхности длиною в V и шириною в a , т. е. площади, величиною в $V_p \cdot a$, которая больше предыдущей в

$$\frac{V_p \cdot a}{a \cdot b} = \frac{V_p}{b} \text{ раз.} \quad (10)$$

Каждой части этой воздушной полосы прямоугольник сообщил некоторое движение.

Итак, обозначая силу нормального давления на плоскую пластинку, происходящую от этой причины, через F , найдем, на основании формул (9) и (10), что секундная работа равна

$$F \cdot V_n = \frac{7 \cdot d}{6 \cdot g} \cdot S \cdot V_n^2 \sqrt{\frac{ab}{\pi}} \cdot \frac{V_p}{b}; \quad (11)$$

откуда

$$F = \frac{7 \cdot d \cdot S}{6 V \pi g} \cdot \sqrt{\frac{a}{b}} \cdot V_n \cdot V_p. \quad (12)$$

Вводя во вторую часть этого уравнения множителем поправочный коэффициент K , ввиду неполной строгости вывода (10) и ограниченности положения (10), и прибавляя к силе давления (12) силу давления (1), происходящую только от нормального установившегося движения, получим

$$F = K \cdot \frac{S \cdot d}{g} \cdot V_n^2 \left\{ 1 + \frac{7 \cdot K}{6 V \pi} \cdot \sqrt{\frac{a}{b}} \cdot \left(\frac{V_p}{V_n} \right) \right\}. \quad (13)$$

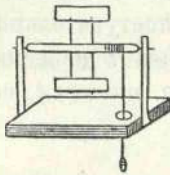
Прежде чем указывать на значение этой формулы в науке, я считаю необходимым проверить ее посредством опытов.

Прибор, которым мы намерены произвести эту проверку, состоит из небольшого станка с вращающейся на нем горизонтальной осью. В перпендикулярном направлении к оси укреплены на ней две тонкие проволоки, на концы которых можно надевать разной величины и продолго-

ватости прямоугольные пластинки из плотной бумаги, так что ось тогда получает два прямоугольных и симметрично расположенных крыла (фиг. 2), лежащих в одной с ней плоскости. Ось и крылья могут некоторое время вращаться посредством намотанной на ось нитки, разматываемой тяжестью груза.

На этом приборе легко видеть, как увеличивается сопротивление воздуха при увеличении параллельной скорости крыла, которая, действуя на тонкие ребра крыла, повидимому, не должна бы оказывать никакого влияния на скорость вращения крылатки.

Для этого я беру ее в руки и пускаю в действие груз — крылья вертятся с известною скоростью; если теперь, во время этого вращения, я начинаю идти с прибором в руках, стараясь, чтобы мое движение было параллельно оси прибора, то вращение, очевидно, замедляется и даже почти останавливается, если скорость поступательного движения увеличить (груз был в 2 г, ширина крыльев — около 4 см, длина — около 5 см; таково же и ближайшее расстояние их до оси).



Фиг. 2

Но для производства точных опытов нужно составить несколько вспомогательных формул применительно к нашему прибору (фиг. 2).

Обозначая силу давления воздуха на одно крыло через F , расстояние центра давления до оси — через R , радиус оси — через r и груз — через P , найдем условие равномерного движения крыльев

$$2 \cdot F \cdot R = rP. \quad (14)$$

Если крылья в течение времени t сделали n полных оборотов, причём нить размоталась на длину L , то

$$2\pi \cdot R \cdot n = V_n \cdot t \quad (15)$$

и

$$2\pi \cdot r \cdot n = L. \quad (16)$$

Выключая из уравнения (14) R и r посредством этих равенств и F — посредством уравнения (13), получим

$$\frac{4S \cdot \pi \cdot d}{g \cdot t} \cdot R^2 \cdot n \left\{ \frac{2\pi \cdot R \cdot n}{t} + \frac{7 \cdot K}{6 \sqrt{V \pi}} \sqrt{\frac{a}{b}} \cdot V_p \right\} = \frac{P \cdot L}{2\pi \cdot n}. \quad (17)$$

Зная, что $S = ab$, и решая это уравнение относительно t , найдем время развертывания нити длиной L под влиянием различных грузов:

$$\left. \begin{aligned} t = & \frac{14 \cdot dn^2 \cdot R^2}{3 \cdot P \cdot L \cdot g} \cdot \sqrt{\pi^3 \cdot a^3 \cdot b} \cdot V_p \cdot K + \\ & + \sqrt{\pi^3 \cdot a^3 \cdot b} \cdot \sqrt{\frac{196 \cdot d^2 \cdot n^4 \cdot R^4}{9 \cdot P^2 \cdot L^2 \cdot g^2} \cdot V_p^2 K^2 + \frac{16 \cdot d \cdot n^3 \cdot R^3}{P \cdot L \cdot g \cdot a^2}} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Применим эту формулу для поверхностей не очень продолговатых, когда коэффициент K можно принять равным единице; положим, например:

$$a = 5 \text{ см}, b = 5 \text{ см}, d = 0,0013, n = 10, R = 10 \text{ см},$$

$$V_p = 100 \frac{\text{см}}{\text{сек}}, L_p = 21 \text{ см}, g = 980 \text{ см/сек}^2 \quad (19)$$

и вычислим ряд времен в зависимости от ряда принятых грузов P .

Придавая затем крыльям прибора (фиг. 2), удовлетворяющего условиям (19), вращение, посредством того же ряда грузов, приводя в то же время прибор в поступательное движение со скоростью 100 см/сек по направлению оси вращения крыльев и замечая время разворачивания нити, — получим также ряд времен, но путем опыта; то и другое вместе составит следующую таблицу (20):

P	t вычисл.	t опытн.
1	90,6	91
2	47,2	47
3	34,8	35
4	27,6	28
5	23,0	23
6	20,1	20
7	18,0	18
8	16,3	16
9	15,0	15
10	13,9	14
20	8,6	9

Первый вертикальный столбец ее показывает грузы в граммах, второй — время по вычислению, третий — время из опыта. Мы видим из нее, что часть нашей теории оправдывается достаточно.

Остается проверить влияние на силу давления F продолговатости $\frac{a}{b}$ крыла, выражаемое уравнением (13).

Из формулы (18), представляющей последствия этого закона, можно заметить, что время разворачивания нити прибора, при постоянном грузе P и для поверхностей мало продолговатых, когда $K = 1$, пропорционально квадратному корню из ширины b крыла, или, при постоянной длине a его, обратно пропорционально квадратному корню из продолговатости $\frac{a}{b}$ крыла. Этим выводом из уравнения (18) мы воспользуемся для проверки формулы (13) в отношении продолговатости пластинки. Для этого я вырезывал пластинки разной продолговатости и последовательно надевал их на спицы прибора. Из многих опытов привожу одну таблицу (21).

b	$1\frac{1}{4}$	$2\frac{1}{2}$	5	10	15	20
$\frac{a}{b}$	4	2	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$
$t_{\text{опытн.}}$	13	24	35	53	67	80
$t_{\text{вычисл.}}$	$17\frac{1}{2}$	25	35	50	60	70

(21)

Первая горизонтальная строка ее показывает ширину b пластинки (или длину по направлению оси) в сантиметрах, при неизменных размерах по направлению перпендикулярному (5 см); вторая указывает продолговатость $\frac{a}{b}$ вращающихся прямоугольников; третья — время t из опыта в секундах, при постоянном грузе P в 3 г и при прочем, по условиям (19); наконец, четвертая — время разворачивания нити по вычислению из формулы (18), предполагая, что $K = 1$. Из сравнения времен этой таблицы мы видим, что результаты опыта тем ближе к результатам теории, чем менее продолговатость пластинки, или — вернее — чем форма ее ближе к форме квадрата.

Подставляя в уравнение (17) последовательно размеры пластинки и соответствующие времена табл. (21), полученные из опыта, полагая постоянно $P = 3$ г, а прочее по условиям (19), найдем из этого уравнения (17) ряд величин для коэффициента K , который нетрудно тогда выразить известными способами эмпирической формулой. Формула эта оказывается весьма простого вида, именно:

$$K = \frac{9}{7 + 2 \cdot \left(\frac{a}{b}\right)}. \quad (22)$$

Вычисляя времена по уравнению (18) и полагая при этом K согласно (22), получим ряд времен: 13, 23, 35, 53, 68, 79, весьма близких к временам, полученным из опыта².

Не могу не привести тут один мой опыт, весьма ярко указывающий громадное влияние продолговатости на силу давления воздуха, или на время разворачивания нити. Канвою для этого опыта послужит нам формула (18) или формула (13), которые упрощаются, когда груз P не велик или когда скорость V_n вращательного движения не велика в сравнении со скоростью V_p поступательного движения прибора; тогда вместо уравнения (18) получим

$$t = \frac{28 \cdot d \cdot n^2 \cdot R^2}{3 \cdot P \cdot L \cdot g} \cdot a \cdot \sqrt{\pi^3 \cdot (a \cdot b)} \cdot V_p \cdot K. \quad (23)$$

Из последнего равенства видно, что, при постоянной площади $a \cdot b$ прямоугольника и при прочих одинаковых условиях, время развертывания нити пропорционально a , т. е. длине его по направлению, перпендикулярному к оси. Поэтому, если, например, дан прямоугольник, одна сторона которого вдвое более другой, и он в двух последовательных опытах расположен двумя способами — один раз длинною стороною поперек оси, а другой раз — длинною стороною вдоль ее, то и время развертывания в первом случае будет вдвое более, чем во втором, хотя бы центр давления и находился в обоих опытах на одном расстоянии R от оси.

И, действительно, теоретический вывод этот вполне оправдывается на опыте.

Итак, один и тот же прямоугольник площадью $a \cdot b$, под влиянием одного и того же груза, вращается с различной скоростью, смотря по расположению прямоугольника.

Из формулы (12) можно также видеть, что и сила давления в этих двух случаях разнится вдвое. В самом деле, в первом случае $\frac{a}{b} = 2$, во втором же $\frac{a}{b} = \frac{1}{2}$; отношение равно 4, а квадратный корень из него равен 2. Стало быть, F вдвое изменяется.

Рассматривая уравнение (13) и применяя к решению вопроса о максимуме силы давления F эмпирическое выражение (22) для K , найдем, что сила давления, при прочих одинаковых обстоятельствах и при постоянной площади $a \cdot b$, будет наибольшая, когда продолговатость прямоугольника равна $3^{1/2}$.

Уравнению (13) можно придать другой вид

$$F = K \frac{d}{g} \cdot S \cdot V^2 \cdot \sin^2 i \left\{ 1 + \frac{7 \cdot K}{6 V \pi} \sqrt{\frac{a}{b}} \operatorname{ctg} i \right\}, \quad (24)$$

и тогда оно будет выражать или силу давления ветра на неподвижный прямоугольник, или силу давления жидкости на движущийся в ней прямоугольник; в этом уравнении V означает скорость ветра или пластинки, одна сторона a которой перпендикулярна к скорости V , а i есть угол, составляемый направлением скорости с плоскостью пластинки.

Если угол i мал, то уравнение (24) обращается в следующее:

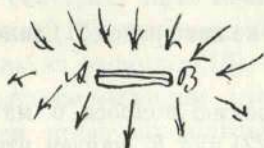
$$F = K \cdot \frac{d}{g} \cdot S \cdot V^2 \cdot \sin i \left\{ \frac{7K}{6 V \pi} \cdot \sqrt{\frac{a}{b}} \right\}; \quad (25)$$

из формулы этой видно, что при малости угла i сила давления пропорциональна синусу i , как это теперь принимают все авторы по сопротивлению.

ОБЪЯСНЕНИЕ ВИХРЕОБРАЗНЫХ ДВИЖЕНИЙ В ВОЗДУХЕ И ВОДЕ ^{3*}

С точки зрения гипотезы, высказанной мною о движении жидкости под влиянием нормального движения плоской пластинки, нетрудно понять причину образования вихрей.

На основании этой гипотезы движение воздуха под влиянием первого толчка можно изобразить чертежом (фиг. 1)**.



Фиг. 1

По краям пластинки *AB* встречаются два противоположных течения, которые и образуют круговое движение. Стоит только провести веслом по спокойной воде, как это делается при катании на лодке, чтобы убедиться в справедливости этого теоретического вывода.

И, наоборот, везде, где вода при своем течении встречает препятствия, — у мостов, при порогах и проч., неизбежно образуются воронкообразные углубления, указывающие на возникновение вихрей.†

Также воздух, встречая на своем пути здания, горы и крупные препятствия, должен образовать вихри, которые и наблюдаются преимущественно в таких местах. Могучие циклоны, смерчи зарождаются в горах и несутся общим течением воздуха далеко, далеко, пока не ослабеют. Кроме высказанной причины вихрей, конечно, могут быть другие.

По этим выводам судите сами, правдоподобна ли моя гипотеза.

* Печатается с рукописи, датированной автором 19 января 1892 г.

** Воспроизводимые в настоящем издании рисунки представляют собой, в значительной части, подлинные рисунки К. Э. Циолковского. (Ред.)

УСТРОЙСТВО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НАСЕКОМЫХ И ПТИЦ И СПОСОБЫ ИХ ПОЛЕТА *

I

АТМОСФЕРА СПОКОЙНА

Элементарный летательный прибор мы видим у насекомых, летающих посредством одной пары крыльев.

Каждое из этой пары есть более или менее удлинённая эллипсоидная пластинка.

Каким же образом совершается полет этим простым приспособлением? Каким образом тело насекомого движется вперед, поддерживается на воздухе, поворачивается, подымается и опускается?

Рассмотрим момент, когда крылья опускаются; тогда, понятно, на нижнюю поверхность их воздух производит давление, величина которого зависит от скорости их движения, т. е. или равное весу насекомого, или большее его, или меньшее. В первом случае насекомое не изменяет высоты своего положения, во втором — высота увеличится, в третьем — уменьшится.

При этом я полагаю, что плоскости крыльев параллельны горизонтальной оси их вращения, а вместе с тем и продольной горизонтальной оси насекомого (фиг. 1).

* Настоящая статья есть извлечение из моей рукописи: «К вопросу о лётании посредством крыльев». Профессором Столетовым она была передана проф. Жуковскому. Последний, дав о ней благоприятный отзыв, предложил сделать из нее извлечение, какое я сам хочу, для помещения в «Трудах Общества любителей естествознания».

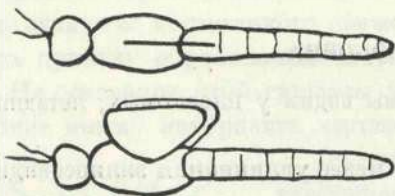
Я отделил тогда то, что считал наиболее важным, именно, вычисления и опыты по сопротивлению пластинок.

Хотя рукопись написана не позже 1890 г., т. е. 22 года тому назад, но, перечитывая ее, я не нашел, что она устарела и противоречила позднейшим опытам и исследованиям в том же направлении.

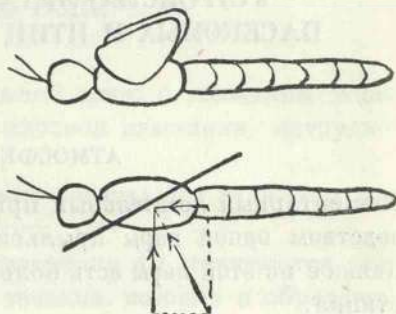
* Впервые напечатано в журнале «Техника воздухоплавания», № 3, 1912 г.; здесь воспроизводится с дополнениями автора, которые не вошли, по техническим причинам, в текст, напечатанный в указанном журнале. (Ред.).

При поднятии крыльев они должны принять вертикальное положение, чтобы воздух не представлял для них сопротивления и не производил давления сверху вниз.

Тогда, при колебательном движении крыльев, тело насекомого будет то подниматься, то опускаться. Если поднятие тела равно величине его последующего падения, то средняя высота полета насекомого остается неизменной. Ввиду чрезвычайной частоты колебания крыльев, дрожание корпуса насекомого почти незаметно. Этот случай полета довольно редок,



Фиг. 1



Фиг. 2

так как атмосфера почти не бывает в покое. Впрочем, поднятие животного может состояться и при уклонении крыльев от вертикального положения при их поднятии, так как давление снизу вверх может быть все-таки много больше обратного.

Но в таком случае насекомое не будет иметь горизонтального передвижения и, кроме того, работа его держания или стояния в воздухе без твердой опоры будет гораздо значительнее, чем при быстром поступательном движении.

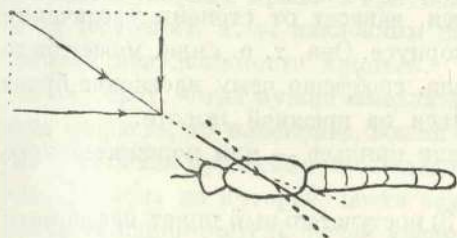
Чтобы это передвижение было, необходим наклон плоскости крыльев к их горизонтальной оси вращения. Тогда сила нормального давления воздуха на крылья разложится на две части (фиг. 2): одна — почти вертикальная — будет уравнивать тяжесть существа, другая — горизонтальная — будет толкать его вперед по горизонтальному направлению; она будет уравнивать давление воздуха на корпус и крылья насекомого.

Наклон, при котором на крылья действует сила, толкающая насекомое вперед, для краткости, буду называть положительным.

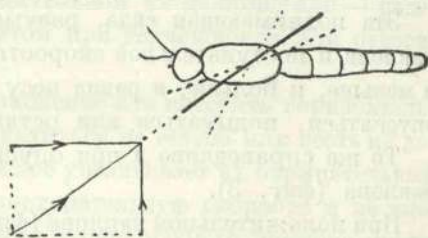
При отсутствии поступательного движения всякий, даже самый малый наклон передней части крыла, может быть назван положительным. Но при поступательном движении это не так (фиг. 3). Фиг. 3 изображает две составляющих относительной скорости воздуха, происходящих от поступательного движения насекомого и опускания крыла. Плоскость

крыла, располагаясь параллельно равнодействующей скорости, не дает еще толкающей вперед или назад силы, следовательно, не дает положительного наклона, хотя наклон этот может быть и очень велик, например 30° .

Изображенный на фигуре наклон можно назвать нулевым*. При всяком, даже самом незначительном уменьшении этого наклона он превращается в положительный, потому что относительный поток тогда устремится на нижнюю поверхность крыла.



Фиг. 3



Фиг. 4

Горизонтальность крыла есть другое предельное положение его, при котором толкающая вперед сила достигает предельно малой величины.

Ввиду того, что задняя часть крыльев летающих существ более тонка и гибка, она подымается кверху от давления воздуха при махании вниз, отчего и получается сам собою наклон положительный.

Положительный наклон не только толкает насекомое вперед, но и препятствует его падению (фиг. 3).

Если уклонение от нулевого наклона (фиг. 3) будет обратное, т. е. угол наклона увеличится, то относительный поток устремится на верхнюю поверхность крыла, на которую и произведет давление сверху вниз, что затормозит поступательное движение и лишит насекомое поддерживающей вертикальной силы — будет опускать его.

Теперь рассмотрим, что же будет при обратном движении крыльев, т. е. вверх. Тут может быть также три интересных случая (фиг. 4). Встречное относительное движение воздуха, слагающееся из поступательного движения корпуса и опускания крыла, совпадает с изменившею наклон плоскостью крыла. Тогда встречный поток будет** скользить вдоль крыла и давления на него производить не будет. Наклон этот обратен предыдущему, т. е., иначе говоря, переднее ребро крыла выше заднего. Несмотря

* Потому что он и не поддерживает веса тела, и не сообщает ему поступательного движения.

** Рассуждения о давлении встречного воздушного потока относятся к сечению крыла плоскостью, нормальной к продольной оси крыла и параллельной к длинной оси корпуса насекомого (см. фигуры).

на это, такой наклон, в отношении толкающей силы, тоже может быть назван нулевым. Вторым случаем получим, если увеличим сколько-нибудь этот нулевой наклон (фиг. 4). Тогда поток устремится на нижнюю поверхность крыла и не только будет поддерживать насекомое в воздухе, но и тормозить движение, так как горизонтальная составляющая будет направлена в сторону, противоположную поступательному движению корпуса. Такой наклон может быть назван отрицательным. Итак, и при поднятии крыльев им может быть придан наклон, при котором насекомое будет получать силу, поднимающую его.

Эта поднимающая сила, разумеется, зависит от степени увеличения наклона и поступательной скорости корпуса. Она, т. е. сила, может быть и меньше, и больше, и равна весу тела, сообразно чему насекомое будет опускаться, подниматься или оставаться на прежней высоте.

То же справедливо и при опускании крыльев — для положительного наклона (фиг. 3).

При положительном наклоне (фиг. 3) поступательный полет насекомого ускоряется, замедляется или остается неизменным, смотря по тому, будет ли сопротивление воздуха при таком движении меньше, больше или равно горизонтальной составляющей давления на крылья.

При отрицательном наклоне (фиг. 4) горизонтальная составляющая противодействует горизонтальному полету насекомого; так что полет поступательный во всяком случае замедляется. Тело животного поддерживается в воздухе, в краткий момент поднятия крыльев, заранее накопленную живую силу, заключенной в массе быстро движущегося существа; но замедление довольно мало ввиду значительной скорости поступательного движения и малости времени поднятия крыльев.

В общем, полет насекомого, таким образом, то ускоряется — при опускании крыльев, то замедляется — при их поднятии.

Описанный полет наиболее выгоден для животного, так как крылья будут тогда поддерживать тело не только при их опускании, но и при поднятии, что требует от насекомого меньшей мощности. Но и тогда механизм крыльев может быть довольно прост: пусть расправленные крылья, пока они еще не машут, имеют, по своему устройству, наклон отрицательный (фиг. 4); при поднятии их они будут уравнивать быстро движущееся тело; но в силу их гибкости, при быстром опускании, отрицательный их наклон превратится в положительный, и движение насекомого будет ускоряться благодаря положительной составляющей.

Насекомые, ввиду их примитивности и быстроты колебательного движения крыльев, могут обойтись и, вероятно, обходятся без отрицательного наклона: для полета довольно и одной гибкости крыльев.

Скорость разных частей колеблющегося крыла не одинакова. Это обстоятельство требует не совершенно плоской формы крыльев и не одинаковой гибкости всех частей их.

И при неподвижности крыльев относительно тела летящего насекомого, давление на них также может быть, смотря по величине отрицательного наклона, больше, меньше или равно тяжести существа. И потому вообще, каково ни будь состояние движения крыльев — колебательное или нет, при соблюдении известного наклона крыльев тело насекомого может держаться на одной высоте, подниматься или опускаться по желанию летающего создания, если только сохраняется достаточная горизонтальная скорость. В противном случае оно может приобрести эту скорость или сильными ударами крыльев при положительном их наклоне или — падением тела вниз, т. е. наклонным полетом при подвижности или относительной неподвижности крыльев.

Наоборот, когда нужно замедлить движение или потерять горизонтальную скорость, то насекомое, желая спуститься на землю или сесть на дерево, не махая крыльями, все более и более увеличивает их отрицательный наклон, пока не потеряет почти всю поступательную скорость и не уцепится за какой-нибудь сучок; увеличение отрицательного наклона крыла имеет целью компенсировать поддерживающую тяжесть тела силу, которая уменьшается от ослабления горизонтальной скорости. Разумеется, есть предел этого ослабления, за которым уже никакой наклон не поможет; поэтому спуск без легкого толчка невозможен.

Сказанное, впрочем, скорее, относится к птицам, у которых более сложный летательный аппарат. Наклон крыльев относительно тела насекомого едва ли может изменяться по их желанию. Но он все-таки может изменяться по отношению к горизонту, благодаря подвижности удлиненного брюшка. Последнее действует как совокупность двух рулей — горизонтального и вертикального.

Изгиб брюшка изменяет наклон крыльев к горизонту, поворачивает насекомое вправо или влево.

Продолговатость крыльев, замечаемая у всех летающих существ, увеличивает поддерживающую вертикальную силу, при той же площади крыльев.

Устройство крыльев птицы и механизм ее полета можно отождествить с устройством механизма насекомого, если только птица имеет быстрое поступательное движение, при котором все ее перья смыкаются в одно целое давлением воздуха на нижнюю поверхность крыла и составляют, таким образом, как бы одну элементарную пластинку. В этом случае мы найдем разницу лишь в том, что у птицы крыло, поворачиваясь относительно твердой передней части его действием мускулов, принимает необходимый наклон волею птицы и, вообще, более сложным способом, чем у насекомого.

Но другое дело при начале полета птицы, или когда она, при безветрии, желает неподвижно держаться в воздухе, что ей стоит громадных усилий и что, поэтому, она чаще делает при ветре. Тогда каждый элемент

крыла, каждое перо исполняет независимо свою функцию, точно так же как и крыло насекомого; птица превращается в многокрылое существо, например, десятикрылое, — смотря по числу перьев.

Именно когда крыло поднимается вверх, при неподвижности самой птицы и при безветрии, воздух давит на верхнюю поверхность крыла, и чтобы это давление не опускало птицу вниз, плоскость каждого пера ее имеет возможность, под влиянием этого давления, принять почти отвесное направление. Когда же крылья опускаются, все перья обратным давлением быстро поворачиваются и, задевая одно за другое краями, удерживаются в горизонтальном направлении, составляя одно целое — одну пластинку.

Кто наблюдал за птицами, когда они, летая в тихую погоду, держатся в воздухе у гнезда, тот мог видеть, как сквозят при этом крылья, пропускавая при поднятии их свет и воздух.

Выгнутость нижней поверхности крыла только очень немного усиливает давление на крылья при описанном сейчас состоянии полета и, следовательно, лишь немного уменьшает скорость колебания крыла и работу при поднятии на воздух. Важнее, что сложность крыла и его выпуклость способствуют удобному складыванию и плотному прилеганию его к телу птицы, которая пользуется крыльями как одеждой, согревающей тело, когда в нем потухает очаг, дающий птице энергию для полета. Но есть и еще причина кривизны крыльев, лежащая гораздо глубже.

Во время быстрого горизонтального полета полоса воздуха под и над крыльями приобретает их давлением известную скорость. Чтобы это приобретение, в краткое время прохождения воздуха под крылом, совершилось правильно и постепенно и чтобы давление воздуха на крыло было равномерно по всей его поверхности, оно имеет кривизну, без которой воздух не получил бы плавного, равномерно ускоренного движения и не дал бы *н а и б о л ь ш е г о* * давления на крылья. Кривизна эта подобна кривизне лопаток колеса у турбины, утилизирующей живую силу движения воды. У быстро летающих существ крылья не так выпуклы, как у медленно летающих. Но чем быстрее полет, тем должно быть острее тело и тем меньше боковая кривизна его; значит, у быстро летающих существ малая кривизна крыла соответствует малой боковой кривизне корпуса, что способствует, может быть, плотному прилеганию крыльев к бокам птицы и лучшему согреванию ее.

Независимость действия каждого крыла у птицы, т. е. самостоятельный наклон каждого крыла, и быстрота его колебаний легко устанавливают боковую стабилизацию. Для продольной стабилизации, конечно, служит хвост.

* Гораздо позже я и другие исследователи бесчисленными опытами подтвердили это.

Если аэропланы когда-нибудь заменятся орнитооперами, то разумное устройство их потребует от нас еще более тщательного изучения полета птиц и насекомых.

II

РАВНОМЕРНОЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ СРЕДЫ

До сих пор мы рассматривали полет в спокойной атмосфере.

Равномерный ток воздуха, все точки которого имеют прямолинейное равномерное движение по одному горизонтальному направлению, не может оказывать, несмотря ни на какие ухищрения, какого-либо влияния на движения крыльев и других органов, необходимые для полета. Все будет происходить совершенно так, как если бы воздух был абсолютно неподвижен. Та же будет энергия, необходимая для полета, та же будет и скорость поступательного движения, если относить ее к воздуху, а не к поверхности земли. В противном случае, скорость изменяет свое направление и величину. Это изменение скорости и направления потока чересчур известно, и мы не будем на нем останавливаться.

Выводя формулы для движения птицы, насекомого, аэроплана или аэростата, мы совершенно безошибочно можем применять их и для равномерного и горизонтально движущейся среды.

Действительно, все зависит от скорости относительной, а не от скорости абсолютной, которая никогда не может быть определена. Тут скорость среды относительно земли равна 30 м в секунду; в отношении солнца тот же воздух имеет скорость около 28 верст в секунду, в отношении звезд — опять получим другое число и так далее, потому что вселенная безгранична. Если бы в расчеты о полете или других явлениях входила абсолютная скорость среды, то механика не имела бы приложения, так как абсолютная скорость никогда не может быть известна.

Понятно, никакой пользы и никакой работы, для поддержания на воздухе или для других целей, не может извлечь естественный или искусственный летательный или другой какой-нибудь снаряд из движущейся горизонтально равномерно и прямолинейно, хотя бы и с бесконечной скоростью, массы, состоящей из воздуха, воды или чего-либо другого, — это совершенно безразлично*. Только скорость в отношении к земле будет иная.

Так, птицы пользуются быстрым попутным ветром при своих перелетах, но только в отношении быстроты; энергия же, выделяемая ими в единицу времени, а также движения крыльев, хвоста — не изменяются ни на каплю.

* Не выбрасываю этих рассуждений, так как и теперь не редкость встретить даже в литературе смутное понимание закона относительного движения.

Если, например, птица в неподвижном воздухе пролетает в час 50 верст, то при попутном ветре такой же скорости она пролетит в тот же час 100 верст, затратив ту же работу и совершая буквально те же манипуляции. Только в этом смысле равномерным движением среды может пользоваться птица или аэроплан. При ветре облегчается и первый подъем с земли.

III

НЕПРАВИЛЬНОЕ ТЕЧЕНИЕ ВОЗДУХА

Другое дело — неравномерный воздушный поток, каков он и есть на самом деле. Этим неравномерным током, этими порывами ветра пользуются птицы, чтобы летать без расхода энергии — может воспользоваться ими и летательный снаряд для уменьшения работы своих двигателей.

Очень понятно, почему восходящий поток * может поддерживать в воздухе, без затраты работы, какое-либо тело. Теми же свойствами обладает и наклонный восходящий поток. Такой же поток неизбежен, когда среда двигается по наклонной к горизонту поверхности земли или когда встречает более или менее крупную гору.

Причиной поднятия тела может служить и вертикальное колебательное движение воздуха; но чаще встречается горизонтальное колебательное движение среды, так как этому роду движения меньше препятствий, чем движениям вертикальным.

Мы часто видим, как ястреб, почти без работы, без махания крыльями, держится на воздухе, поднимаясь винтообразно и уносясь при этом общим воздушным течением. Причиной парения птицы может служить именно горизонтальное колебательное движение воздуха.

Редко можно наблюдать такой ветер, который бы дул попеременно то с одной, то с другой стороны и менял бы это направление каждые несколько минут. Чаще мы замечаем, что скорость ветра то усиливается на известную величину a против средней скорости b , то ослабляется на ту же величину (a) сравнительно с нормальной скоростью b .

Мы принимаем этот простейший случай колебательного движения. На самом деле не только меняются a и b , но также и направление ветра. Упрощаем явление для первых соображений.

Положим теперь, что ястреб брошен по одному направлению с ветром со средней его скоростью b . Тогда птице будет казаться, что воздух дует ей попеременно — то в голову, то в хвост, со скоростью a ; и относительно ястреба движение будет действительно таково. Но будем помнить, что все зависит от относительной, а не абсолютной скорости.

Что же делает ястреб? Он всегда подставляет нижнюю поверхность крыльев противному ветру, вследствие чего каждый порыв ветра подымает его на некоторую высоту, в зависимости от силы порыва a . Он при-

* Например, центральная восходящая часть циклона или вихря.

нужден описывать круги, поднимаясь или опускаясь, смотря по силе порывов, и даже помогая иногда работе воздуха взмахами крыльев в критические моменты. Каждый полукруг его движения соответствует перемене относительного направления воздушного тока на обратный a ; круг соответствует полному циклу колебания атмосферы. Эта винтовая траектория уносится вместе с ястребом общим течением воздуха со скоростью b .

Очень может быть, что описанное явление в природе гораздо сложнее, — я хотел лишь показать возможность парить, при известных условиях, исключительно силою неправильного ветра.

Приведенный пример, разумеется, можно отнести и к разумно управляемому или надлежаще устроенному летательному аппарату.

Многие птицы парят, другие только более или менее пользуются неправильными течениями воздуха, т. е. облегчают себе задачу летания. Едва ли насекомые способны, по несложному устройству своего летательного снаряда, к тем движениям крыльями, которые обуславливают парение.

Но очень не трудно вообразить себе прибор, который без связи с землей будет держаться и летать в воздухе силою его горизонтального колебательного движения.

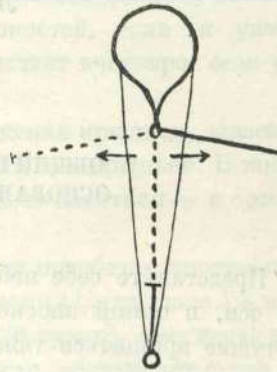
Представим себе уравновешенное каким-нибудь способом (хоть легким газом) подобие воздушного ареометра с приделанным к нему крылом (фиг. 5).

Этот снаряд всегда имеет вертикальное положение. Крыло тоже имеет отвесное направление, но до тех пор, пока не подует боковой ветер. Тогда оно, вращаясь вокруг горизонтальной оси, принимает слегка наклонное к горизонту положение. Давление воздуха, происходящее от бокового порыва ветра, заставит при этом прибор некоторое время подыматься.

Но вот задул противоположный боковой ветер, пластинка, т. е. крыло, под влиянием нового течения, от вертикального положения опять перейдет к слегка наклонному, опять произойдет восхождение аппарата и т. д.

Если бы он имел тяжесть, то поднятие могло бы урегулироваться или, я хочу сказать, уничтожиться опусканием силою тяжести, и прибор оставался бы на одной высоте.

Устройство подобного снаряда, его полезность, поднимаемый им груз и другие вычисления, к нему относящиеся, должны основываться на тщательном изучении неправильного движения ветра, т. е. его скорости и направления в зависимости от времени. Раз дан какой-нибудь род такого изученного движения, мы можем проектировать прибор, держащийся в воздухе без всякой связи с землей и дающий те или другие преимущества.



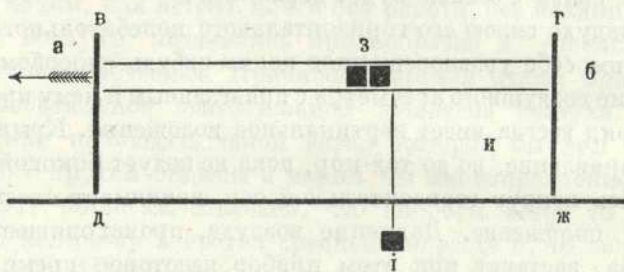
Фиг. 5

АЭРОПЛАН, ИЛИ ПТИЦЕПОДОБНАЯ (АВИАЦИОННАЯ) ЛЕТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА*

I

ОБЩИЙ ВЗГЛЯД НА ЛЕТАНИЕ КРЫЛЬЯМИ, ОСНОВАННЫЙ НА ПРОСТЕЙШИХ ОПЫТАХ И СООБРАЖЕНИЯХ**

Представьте себе небольшой станок (фиг. 1) с горизонтальной осью; на оси, в одной плоскости с ней, укреплены симметрично два крыла, могущие вращаться тяжестью груза, привязанного к намотанной на ось нитке.



Фиг. 1. *аб*—ось, на которую намотана нитка *зи*, увлекаемая вниз грузом *и*; *вд* — *гж* — стойки, в которые вставлена ось. Стрелка показывает направление движения

Возьмем этот прибор в руки и будем внимательно следить за скоростью разматывания нитки или движением крыльев.

Пока еще нить не распустилась вся, понесем прибор по направлению его оси, и мы тотчас же заметим ослабление скорости вращения крыльев.

* Работа впервые была напечатана в № 43—46 журнала «Наука и жизнь» (Москва) за 1894 г. В 1895 г. была издана отдельным отиском с того же набора в виде книги.

** Эта работа была написана еще в феврале 1894 г.; главные же выводы сделаны еще раньше (1890 г.). (Примечание К. Э. Циолковского.)

Если мы побежим, то крылья прибора будут вертеться чрезвычайно медленно. Вообще, чем быстрее движение их по направлению оси, тем медленнее ее вращение.

Из этого видно, что сопротивление воздуха маханию крыльев увеличивается при участии поступательного движения их.

Вот я беру большие легкие крылья, устроенные наподобие птичьих: при поднятии их, они свободно пропускают воздух, при опускании он производит на них некоторое давление — снизу вверх — и уменьшает, таким образом, вес моего тела. Оставаясь неподвижным, я махаю ими, как птица; чем быстрее я это делаю, тем давление на них воздуха больше. Так, по известным законам сопротивления жидкостей, если я удвою скорость махания, то давление на крылья возрастает вчетверо, если утрою, то — вдевятикратное и т. д.

Отсюда ясно, что, при известной быстроте движения крыльев, давление на них снизу будет равняться весу моего тела плюс вес крыльев. В таком случае, я уже перестаю давить на почву, перестаю ее касаться — и с этого момента начинается мой полет.

Однако нетрудные расчеты показывают, что при подобных простейших условиях, при поверхности крыльев в 11 кв. метров ($2\frac{1}{2}$ кв. саж.) и при весе их, вместе с человеческим телом, в 100 кг (6 пудов), секундная работа, потребная для уравнивания силы тяжести, составляет около 10 паровых лошадей (750 килограммометров), т. е. человек должен предъявить энергию, по крайней мере, в 75 раз большую, чем какая ему обыкновенно свойственна (по Лебону, средняя работа здорового человека даже в 4 раза меньше, чем мы предполагаем).

Все это хорошо известно, и еще очень давно ученые доказывали, что держащийся на воздухе, при описанных условиях, гусь должен выделять лошадиную энергию*. Но, положим, что я именно обладаю такой исполненной силой, которая позволяет мне, посредством махания крыльев, висеть неподвижно в воздухе. При этом моя работа, конечно, будет пропорциональна сопротивлению, испытываемому крыльями, и скорости их движения. Первая величина неизменна, потому что всегда равняется весу тела (считая тут и вес крыльев). Таким образом, моя работа будет исключительно зависеть от быстроты махания. Но, на основании предыдущего опыта (фиг. 1), если бы я, махая крыльями, вздумал, в то же время, бежать, то скорость махания, при том же давлении на них, уменьшилась бы. Во столько же раз уменьшилась бы и работа, потребная для летания⁴.

Побеги я чрезвычайно быстро, начини я полет с крыши курьерского поезда или во время сильного противного ветра, — и необходимая для летания энергия, может быть, сравнялась бы с той, которую я в действительности имею. Она могла бы быть и меньше ее: все зависело бы от

* Такой взгляд на условия полета родил пессимизм в авиации.

быстроты поступательного движения. Приводимые опыты с вертушкой (фиг. 1) не подлежат сомнению; снаряд этот демонстрировался публично и находился недавно, по инициативе проф. Н. Е. Жуковского, на механической выставке в Москве (январь, 1894 г.). Кроме того, есть другие снаряды и опыты (Марей, Лиллиенталь и др.), правда, более сложные, но подтверждающие ту же истину — именно: с увеличением поступательной скорости летательных машин работа, потребная для поддержания их в воздухе, уменьшается тем более, чем быстрее движение; мало того, экспериментально и теоретически выводят, что уменьшение это, при скоростях значительных, почти пропорционально скорости поступательного движения.

Жаль только, что быстрое движение в жидких телах, даже таких малоплотных, как воздух, весьма затруднительно, потому что требует работы, пропорциональной кубу скорости. Например, при увеличении скорости в 4 раза, работа рассеяния воздуха возрастает в 64 раза (4^3), между тем как работа поддержания авиационного снаряда на воздухе уменьшается только в 4 раза.

Сопротивление среды, будучи при малых скоростях едва заметно и пренебрегаемо, становится невыносимым бременем при очень быстром поступательном движении.

Эти выводы должны несколько охладить наш пыл и увлечение авиационными приборами. Тем не менее невозможно удержаться, чтобы не сделать точных расчетов для определения степени выгоды и условий полета.

Вопрос о летании посредством крыльев — вопрос модный. Со всех сторон раздаются возгласы о «новой» теории парения, основанной на инерции среды, т. е., в данном случае, воздуха. Летание птиц уже приписывается не столько силе их мускулов, сколько инерции среды, проще — увеличенному сопротивлению воздуха, возникающему благодаря скорости поступательного движения летающих существ. В чем же тут «суть» и как объяснить простым сравнением опыт с «вертушкой» (фиг. 1) и аналогичными аппаратами (Марей, Максим и другие)?

Представьте себе, что вы стоите на вязкой почве, вроде «вара» (черная смола, при известной температуре — тело полутвердое), покрытой маслом, вследствие чего ваши подошвы к ней прилипать не могут.

Чем долее вы на ней стоите, тем сильнее в нее погружаетесь. Если вы ходите или бегаєте по такой почве, то ваши сапоги оставляют на ней следы тем менее глубокие, чем быстрее вы двигаетесь. Ясно, что и работа вашего движения будет уменьшаться пропорционально его скорости, потому что, по мере увеличения скорости, вам приходится выкарабкиваться из ям, все менее и менее глубоких. Как бы ни была мягка или легка почва, при движении, достаточно быстром, ее инерция воспрепятствует погружению в нее вашего тела, и вы движетесь тогда как бы при опоре, совершенно твердой. Мы пришли бы к тем же выводам, если бы, вместо простого бега,

вздумали передвигаться на вязкой почве с помощью велосипеда или какого-нибудь другого прибора. Мне случалось кататься осенью на коньках по только что застывшему и очень тонкому льду; он не ломался и даже не трещал, пока я бежал стремительно, но стоило мне только замедлить движение или остановиться — и он давал трещины, в которые втекала вода, окружая коньки.

II

ОЧЕРК ПРОСТЕЙШЕЙ КОНСТРУКЦИИ АВИАЦИОННОГО ПРИБОРА

Прежде всего выберем систему летательного снаряда и примем определенные основания, удобные для вычислений. Естественнее всего и лучше всего подражать, по возможности, птице как механизму, наиболее совершенному в отношении быстроты полета и управляемости его. Первые мои вычисления и относились к такому птицеподобному снаряду, махающему крыльями. Эти вычисления весьма интересны в применении к выяснению явления летания животных; но для нас они, в виду нашей цели, непригодны, ибо подражание птице, в техническом отношении, весьма затруднительно вследствие сложности движения крыльев и хвоста, а также и вследствие сложности устройства этих органов*.

Мы будем подражать птице только отчасти, насколько можем.

Вообразим себе парящую птицу, т. е. летающую без махания крыльями.

Иногда птица парит, благодаря приобретенной ранее скорости; например, когда она хочет остановиться — сесть на дерево или спуститься на землю, то некоторое время она не махает крыльями, потому что ей нужно потерять свою поступательную скорость, за счет которой и совершается несколько секунд парение.

Иногда она парит, благодаря медленному падению в наклонном положении, иногда — благодаря порывам ветра; в первом случае парение совершается силой тяжести, во втором — энергией движущегося с переменной скоростью воздуха.

Так, недавно парил со своими искусственными крыльями известный исследователь Лилиенталь, которого однажды порыв ветра поднял на несколько метров кверху, что хотя и замедлило его падение, но было весьма рискованно, так как грозило перекувырнуть экспериментатора (кстати, считаю долгом выразить глубокое мое соболезнование по поводу проникшего в печать известия о несчастии с ним во время полета).

Иногда парение птиц, благодаря непрекращающимся порывам ветра — громадным волнам воздуха, бывает неопределенно долго. Это

* Однако Труве удалось устроить модель, махающую крыльями и пролетающую таким способом несколько сажен.

явление сложное, и мы тут не будем входить в разъяснение его причин; заметим только, что вообще парение, в равномерном потоке атмосферы, требует постоянной тяги, без которой оно не может быть продолжительно. У птиц эта тяга получается вследствие ударов крыльев о воздух. Но что, если таких ударов не будет, т. е. если наша птица застыла в своем парении! чем мы его поддержим?

Пусть наш снаряд имеет форму застывшей парящей птицы, но, вместо головы ее, вообразим два гребных винта, вращающихся в обратные стороны и дающих тягу в одном направлении, совпадающем с полетом снаряда. Эта тяга винтов могла бы поддерживать поступательную его скорость и он мог бы, при этих условиях, находиться на одной высоте или даже подниматься. Винты вращаются в разные стороны ради того, чтобы они не стремились поворачивать нашу искусственную птицу вокруг продольной ее оси⁵. Мускулы животного мы заменим взрывными нейтральными двигателями. Они не требуют большого запаса топлива (бензин) и не нуждаются в тяжелых паровиках и больших запасах воды⁶; охлаждение же рабочих цилиндров можно производить и воздухом, что уже и применялось на практике*.

Вместо хвоста устроим двойной руль — из вертикальной и горизонтальной плоскости. Первая будет управлять наклоном снаряда к горизонту, вторая — направлением его к меридиану. Первая, по преимуществу, будет удерживать продольную ось снаряда в горизонтальном направлении, другая, по преимуществу, не будет позволять ему сворачивать в сторону. Желательно, чтобы оба руля действовали автоматически, как это теперь собираются устраивать для пароходов.

Двойной руль, двойной винт и неподвижность крыльев придуманы нами не ради выгоды и экономии работы, а единственно ради исполнимости конструкции; все эти отклонения от естественных органов летания только увеличивают расход потребной для него энергии и принимаются нами по горькой необходимости⁷.

Не считайте, однако, это очень печальным, потому что и локомотив не есть точная копия лошади, а пароход — рыбы.

Тем не менее, в описанном виде, наш снаряд будет сильно напоминать устройство летающего жесткокрылого насекомого, например, майского жука, или хруща.

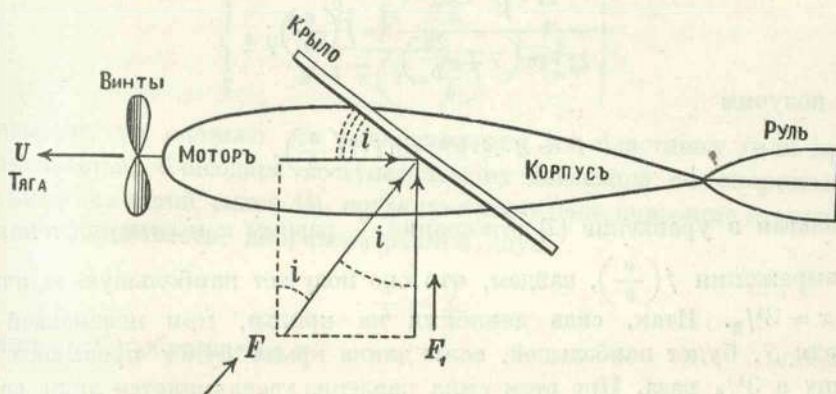
Во время полета его жесткие наружные крылья распростерты и неподвижны, как и у нашего подобия птицы. Другие же тонкие, полупрозрачные крылья насекомого своим маханием поддерживают тягу и соответствуют махающим лопастям наших гребных винтов. Рулем насекомому служит самое его членистое и изгибающееся тельце.

* Правда, употребляя на паровики весьма тонкие трубки, как в системе Серполе, теоретически, можно строить чрезвычайно энергичные паровые двигатели.

III

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА И ВЫВОД ЗАКОНОВ ПОЛЕТА, ПРЕНЕБРЕГАЯ СОПРОТИВЛЕНИЕМ СРЕДЫ ПОСТУПАТЕЛЬНОМУ ДВИЖЕНИЮ СНАРЯДА*

Найдем сначала некоторые законы летания авиационного прибора, причем, ради удобства вычисления, еще более упростим его схему (фиг. 2).



Фиг. 2

При быстром движении снаряда в горизонтальном направлении и при небольшом угле наклона крыльев к горизонту i , приблизительно имеем*

$$F = \frac{d}{g} \cdot S \cdot V^2 \cdot \sin i \cdot \frac{21 \cdot \sqrt{\frac{a}{b}}}{2 \cdot V \pi \left(7 + \frac{2a}{b}\right)}. \quad (1)$$

Здесь F есть нормальная к крылу сила давления встречного воздуха, которую, вследствие малости угла i , можно принять равной вертикальной слагающей F_1 этой силы (фиг. 2); она удерживает снаряд от падения и равна весу снаряда со всем содержимым; d есть объемный вес воздуха; g — ускорение силы земного тяготения; S — есть площадь одного из крыльев, которые предполагаются равными, прямоугольными и симметрично расположенными; a и b — длина и ширина каждого из них; V есть горизонтальная поступательная скорость снаряда по направлению длины его или по направлению ширины крыла; i — угол наклона крыльев к горизонту; он не велик; π есть отношение длины окружности к ее диаметру. Из формулы мы видим, что давление на крылья встречного воздуха пропорционально синусу угла отклонения их от направления воздушного потока. Этот закон подтверждается многими учеными и открыт

* См. IV том Трудов Отделения физических наук Имп. Общества любителей естествознания, М., 1891; формулы (22) и (25) статьи «Давление жидкости на движущуюся в ней плоскость».

сравнительно недавно (Duchmin, 1842; Otto Liliental, 1889; Marey, 1890; упомянутые ученые вывели его опытным путем; теоретически он подтверждается лордом Рэлеем в 1876 г.). Из формулы мы также видим, что сила давления F на крылья зависит не только от величины их поверхности, но и от продолговатости $\frac{a}{b}$ их. Положим в уравнении (1):

$$\frac{21 \cdot \sqrt{\frac{a}{b}}}{2g \sqrt{\pi} \left(7 + \frac{2a}{b}\right)} = f\left(\frac{a}{b}\right); \quad (2)$$

тогда получим

$$F = d \cdot S \cdot V^2 \cdot \sin i \cdot f\left(\frac{a}{b}\right). \quad (3)$$

Полагая в уравнении (2) отношение $\frac{a}{b}$ равным x и отыскивая максимум выражения $f\left(\frac{a}{b}\right)$, найдем, что оно получает наибольшую величину при $x = 3\frac{1}{2}$. Итак, сила давления на крылья, при неизменной их площади S , будет наибольшей, если длина крыла будет превышать его ширину в $3\frac{1}{2}$ раза. При этом сила давления увеличивается лишь на $\frac{1}{5}$ сравнительно с силой давления на крылья квадратные, где

$$\frac{a}{b} = 1.$$

При величине продолговатости в (2), равной

$$\frac{a}{b} = 2,$$

сила F увеличивается в 1,16 раза, т. е. почти настолько же ($\frac{1}{8}$). Из этого следует, что продолговатость крыльев выгодно увеличивать только очень умеренно, раза в 2—не более.

Из уравнения (1) не совсем ясно видны те благоприятные основания, которые мы принимаем для наших расчетов о птицеподобных летательных машинах. Поэтому считаю не лишним привести тут другие формулы, по существу тождественные с приведенными, которые составляют их следствие или частный случай.

Вот уравнение *

$$F = \frac{S \cdot d}{g} \cdot V_n^2 \left\{ 1 + \frac{21 \cdot \sqrt{\frac{a}{b}}}{2 \cdot \sqrt{\pi} \left(7 + \frac{2a}{b}\right)} \cdot \left(\frac{V_p}{V_n}\right) \right\}, \quad (4)$$

где V_n есть нормальная скорость махания пластинки; это движение перпендикулярно к поверхности крыла; V_p есть скорость, параллельная

* См. там же: формулы (13) и (22).

плоскости крыла. Если скорость, параллельная плоскости крыла, отсутствует ($V_p = 0$), то сила давления на крыло становится равной

$$F = \frac{S \cdot d}{g} \cdot V_n^2. \quad (5)$$

Отсюда видно, что множитель в скобках [в уравнении (4)], равный

$$\left\{ 1 + \frac{21 \cdot \sqrt{\frac{a}{b}}}{2 \cdot \sqrt{\pi} \left(7 + \frac{2a}{b}\right)} \cdot \left(\frac{V_p}{V_n}\right) \right\}, \quad (6)$$

показывает, во сколько раз сила давления на пластинку (или крыло) увеличивается, благодаря поступательному движению со скоростью V_p , сравнительно с той силой (4), когда поступательное движение отсутствует. При продолговатости, например, равной двум

$$\frac{a}{b} = 2,$$

множитель (6) обращается в

$$\left\{ 1 + 0,75 \left(\frac{V_p}{V_n}\right) \right\}, \quad (7)$$

из чего следует, что сила давления F чрезвычайно быстро увеличивается с увеличением скорости поступательного движения пластинки. Приведем пример: пусть, стоя неподвижно, я махаю крыльями со скоростью 10 сантиметров в 1 секунду; от этого получается на них известное давление воздуха; теперь положим, что, махая крыльями, как птица, я в то же время бегу вперед со скоростью 10 метров в секунду (1000 см/сек); тогда скорость поступательного движения V_p будет больше скорости махания во 100 раз ($V_p : V_n = 100$); и этого достаточно, чтобы сила давления на крылья, по формуле (7), возросла в 77 раз.

Это ли не благоприятные условия для полета!? Множитель (6) показывает, что, по мере увеличения скорости моего бега, воздух как бы густеет, превращаясь, повидимому, в массу, все более и более плотную. В пределе, т. е. при бесконечной поступательной скорости, легкий газ как бы превращается для летательных снарядов в совершенно неподвижный, прямой и поразительно скользкий стальной путь. Если пренебречь трением крыльев о воздух (другого сопротивления встречному воздуху они не представляют, будучи, теоретически, бесконечно тонки и плоски) и сопротивлением последнего моему телу или снаряду, то ничто не помешало бы ему двигаться вперед с произвольно большой скоростью, причем работа такого движения, в пределе, становится нулем: проще сказать, очень быстрое передвижение по воздуху было бы самым удобным и дешевым средством сообщения.

Повторю еще, что уравнение (1), которое послужит базисом для наших вычислений условий полета, есть только частный случай уравнения (3), давшего нам столь обольстительные результаты. Преобразуя это уравнение (3), можем получить совершенно те же благоприятные выводы.

После этого маленького отступления, будем снова продолжать наш путь к составлению формул, определяющих законы и условия полета. Одна из важнейших задач — узнать энергию моторов, при которой снаряд известного веса и устройства носится в воздухе. Очевидно, вес P_v такого снаряда (фиг. 2), при его равномерном и горизонтальном поступательном движении, должен быть равен сумме давлений на оба крыла (фиг. 2), т. е.

$$2 \cdot F_i = P_v \quad (8)$$

или приблизительно, когда угол i мал,

$$2 \cdot F = P_v. \quad (9)$$

Но вес P_v воздушного корабля складывается из многих величин, именно: вес крыльев $2P_a$; вес корпуса снаряда и его оболочки P_c ; вес пассажиров P_p ; вес двигателей P_m , который состоит из двух слагаемых: первое P_1 идет на предохранение снаряда от падения, т. е. на борьбу с тяжестью, второе P_2 на одоление трения и сопротивления воздуха⁹; так что имеем

$$P_m = P_1 + P_2; \quad (10)$$

далее — вес бензина P_b или другого топлива, иначе сказать, вес материального запаса потенциальной энергии для выделения ее, при посредстве моторов, по мере надобности; наконец, еще особый груз P — вес мелких аксессуаров снаряда и разных непредвиденных вещей.

Итак, получим

$$P_v = 2P_a + P_c + P_p + P + P_1 + P_2 + P_b. \quad (11)$$

Хотя двигатель и один, но он мысленно разделяется на два: первый, весом P_1 , препятствует снаряду опускаться, второй, весом P_2 , рассекая окружающую среду, пролагает дорогу.

Разделяя обе части предыдущего уравнения на вес всего снаряда P_v , получим

$$1 = \frac{2P_a}{P_v} + \frac{P_c}{P_v} + \frac{P_p}{P_v} + \frac{P}{P_v} + \frac{P_1}{P_v} + \frac{P_2}{P_v} + \frac{P_b}{P_v}. \quad (12)$$

Понятно, каждое из отношений второй части этого уравнения меньше единицы; мы назовем их коэффициентами C : крыльев C_a , корпуса C_c , пассажиров C_p , груз C , двигателей C_1 и C_2 и топлива C_b ; так что напишем:

$$1 = 2 \cdot C_a + C_c + C_p + C + C_1 + C_2 + C_b, \quad (13)$$

где

$$C_a = \frac{P_a}{P_v}; \quad (14)$$

$$C_c = \frac{P_c}{P_v}; \quad (15)$$

$$C_p = \frac{P_p}{P_v}; \quad (16)$$

$$C = \frac{P}{P_v}; \quad (17)$$

$$C_1 + C_2 = C_m; \quad (18)$$

$$C_1 = \frac{P_1}{P_v}; \quad (19)$$

$$C_2 = \frac{P_2}{P_v}; \quad (20)$$

$$C_b = \frac{P_b}{P_v}. \quad (21)$$

Вообразим в воздушном корабле два двигателя; обозначим мощность первого через T_1 , мощность второго — через T_2 и общую их мощность — через T_m ; тогда

$$T_1 + T_2 = T_m. \quad (22)$$

Приведя в движение винты, двигатели развивают горизонтальную тягу f двух видов: f_1 не дает снаряду падать, а f_2 одолевает инерцию воздуха и его трение о крылья и корпус снаряда (фиг. 2). Величина тяги 2-го вида зависит исключительно от скорости снаряда, его устройства и величины поверхности крыльев; тяга же 1-го вида — от веса корабля и от угла наклона i крыльев к горизонту (фиг. 2); конечно,

$$f = f_1 + f_2. \quad (23)$$

Имея пока в виду тягу 1-го вида и рассматривая фиг. 2, найдем для нее следующее выражение при условии постоянной скорости снаряда и неизменной высоты его над уровнем моря:

$$f_1 = 2 \cdot F \cdot \sin i. \quad (24)$$

Если угол i мал, то, по уравнению (9), вместо последнего уравнения (24), получим

$$f_1 = P_v \cdot \sin i. \quad (25)$$

С другой стороны, имеем

$$f_1 \cdot V = T_1 \cdot C_h; \quad (26)$$

здесь C_h , или коэффициент винта, показывает, какая часть полной мощности двигателя 1-го вида T_1 утилизируется, благодаря употреблению

гребного винта. Заметим, что C_h тем ближе к единице, чем поверхность винта больше; впрочем, вследствие трения винтовых лопастей о среду, C_h не превышает $3/4$. Последним уравнением мы выражаем секундную работу тяги 1-го вида f_1 при горизонтальной скорости снаряда, равной V .

Выражая еще, что мощность мотора T_1 пропорциональна его весу P_1 и удельной энергии E , напишем

$$T_1 = E \cdot P_1. \quad (27)$$

Здесь энергия E есть работа, приходящаяся на единицу веса мотора в единицу времени, или частное от деления мощности мотора (вместе с генератором его, например паровиком — у паровых двигателей) на вес его.

Из трех последних уравнений и уравнения (19), исключая последовательно f_1 , T_1 и P_1 , получим

$$V \cdot \sin i = C_1 \cdot E \cdot C_h. \quad (28)$$

Полагая в уравнении (3)

$$F = \frac{P_v}{2}$$

согласно уравнению (9) и исключая затем, посредством этого уравнения, $\sin i$ из последней формулы (28), получим

$$E = \frac{P_v}{2 \cdot d \cdot S \cdot V \cdot C_1 \cdot f \left(\frac{a}{b} \right) C_h}. \quad (29)$$

Эта формула содержит выражение энергии E , потребной от двигателей летательного снаряда для поддержания его в воздухе на одной высоте и при поступательной скорости V . Если эта скорость не велика, например не превышает скорости птиц, и крылья его также не особенно велики, а стало быть и трение их о встречный воздух, то мощностью T_2 второго двигателя как величиной, сравнительно небольшой, можно пренебречь, и тогда полную мощность двигателей T_m узнаем по уравнениям (18) и (26); именно, получим

$$T_m = T_1 = E \cdot C_1 \cdot P_v. \quad (30)$$

Энергия E моторов, необходимая для летания, вообще, громадно-необычна, и потому разберем, при каких условиях она имеет наименьшую величину. Из уравнения (29) видно, что удельная энергия E двигателей обратно пропорциональна поступательной скорости V снаряда, т. е. чем больше его скорость, тем меньше энергия; отсюда следует, что нужно придавать снаряду возможно более острую и плавную форму (как у птиц и рыб) и не давать крыльям очень больших размеров, чтобы не увеличивать чрезмерно трения и сопротивления среды; далее, надо отделить возможно большую часть полной подъемной силы снаряда и на двигатель

другого рода, назначенный для рассечения воздуха. Формула (28) подтверждает уже высказанные нами отчасти мысли о возбуждаемых на первых порах мечтаниях о легкости летания. В самом деле, она показывает, что, при очень большой скорости поступательного движения снаряда V , энергия E , а стало быть и работа его двигателей [уравнение (30)], чрезвычайно мала; при бесконечной горизонтальной скорости она есть нуль, т. е. воздух представляет для крыльев опору, совершенно неподвижную, как, например, железнодорожные рельсы. Труд же рассечения воздуха маленьким и острым снарядом нам кажется таким пустяшным! Горизонтальная скорость представляется нашему воображению чуть не беспредельной! Таким образом и работа летания невольно приравнивается к движению снаряда по твердому и очень гладкому грунту.

Следующий важный вывод из уравнения (29) состоит в том, что энергия E прямо пропорциональна отношению $P_v : S$, т. е. отношению веса снаряда к площади его крыла; так что, если вес снаряда будет возрастать пропорционально возрастанию площади крыльев, то энергия не потребует большая. Короче — энергия не зависит от массы снаряда, если только площадь крыльев будет пропорциональна его весу. Выходит, повидимому, что все равно — выстроить летательную машину для подъема одного человека или тысячи их. Когда мы познакомимся с теорией крыльев, то увидим, что такое обольстительное заключение страшно ограничено.

Далее из формулы (29) видно, что энергия E обратно пропорциональна площади крыльев. Поэтому, в известной степени, полезно отделить возможно больший коэффициент на крылья (C_a).

Энергия обратно пропорциональна объемному весу воздушной среды d , т. е. с возрастанием высоты полета энергия, потребная от моторов авиационных летательных приборов, становится больше.

Энергия E обратно пропорциональна весу машин или коэффициенту их C_1 . Значит, чем большую часть полной подъемной силы мы отделим на двигатель, тем меньше может быть его энергия.

Энергия обратна пропорциональна величине функции $f\left(\frac{a}{b}\right)$. Эта функция продолговатости $\frac{a}{b}$ крыльев имеет максимум при продолговатости крыла в $3^{1/2}$. Но продолговатое крыло, при одной и той же площади, тяжелее квадратного, и потому, принимая в соображение еще другие условия, на практике можем принять отношение $\frac{a}{b}$ не большим двух.

При этом

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = f(2) = 0,76 : g,$$

при квадрате же,

$$f(1) = 0,66 : g,$$

т. е. только на $\frac{1}{6} - \frac{1}{7}$ меньше.

Все приводимые выводы, конечно, только приближительны. Действительно, разбираемые величины еще находятся в зависимости друг от друга. Так, например, когда снаряд подымается в разреженные слои атмосферы, энергия должна возрасти; но скорость снаряда в разреженной среде увеличится вследствие уменьшения сопротивления ее, и энергия, от этой причины, может ослабнуть. Также летательные снаряды больших размеров сравнительно легче рассекают воздух и потому имеют большую поступательную скорость V , вследствие чего энергия двигателей [по уравнению (29)] уменьшается.

Итак, мы достаточно ясно видим, что вопрос об определении энергии авиационного прибора и законов его летания — вопрос весьма сложный и требует еще много работы. Пока же мы только грубо нащупали почву и, имея о ней уже некоторое понятие, смелее двинемся вперед.

IV

ТЕОРИЯ КРЕПОСТИ КРЫЛЬЕВ АВИАЦИОННОГО ПРИБОРА

Форму крыла и его положение относительно корпуса снаряда мы должны копировать с птиц. Пока, для простоты вычислений, положим, что поверхность крыла имеет прямоугольную форму, горизонтальное положение и длинная сторона крыла a нормальна к продольной оси корпуса.

Предполагая, что крыло устроено из равноплотного материала, найдем следующее условие равного сопротивления его излому: толщина h какой-нибудь части крыла прямо пропорциональна удалению ее от тонких концевых частей крыла.

Доказывать эту теорему мы считаем излишним. Крыло, устроенное ради экономии его веса по этому закону, имеет такое поперечное сечение, какое представлено на фиг. 3 или, вернее, такое, как на фиг. 4¹⁰.

Заметим, что при выводе предыдущей теоремы мы пренебрегаем собственным весом крыла как величиной сравнительно небольшой по сравнению с силой давления, которая действует на крыло [уравнение (9)].

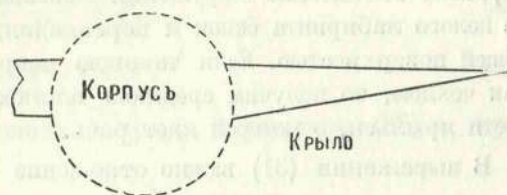
Сопротивление излому у места прикрепления крыла, где оно имеет толщину h , выражается, при действии силы на среднюю часть крыла (или на центр воздушного давления встречного потока), следующей величиной:

$$\frac{I \cdot h^2 \cdot K \cdot D}{3L \cdot m \cdot D_1} \quad (31)$$

Формулу эту также, по ее элементарности, доказывать не будем; из нее ясно, что сопротивление излому крыла пропорционально ширине I его, квадрату толщины h^2 , крепости вещества крыла и уплотнению $\frac{D}{D_1}$ его

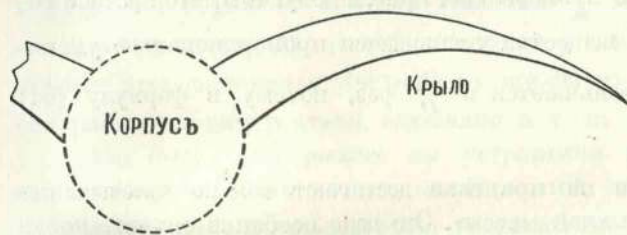
(D есть натуральная плотность вещества, D_1 — средняя плотность того же вещества, подвергнутого искусственно сжатию или разрежению; это мы сейчас выясним); далее, сопротивление излому крыла обратно пропорционально желаемой прочности m его, для чего коэффициент разрыва K уменьшается в m раз, и — длине L крыла.

Выберем самый лучший материал, например, сталь плотности D_1 и крепости K ; коэффициент разрыва для лучших сортов ее (K) не более 100 кг на кв. мм сечения. Если сделать из нее сплошное крыло, то вес его будет велик, а сопротивление



Фиг. 3

излому очень мало. Как же быть? Если бы мы могли разрезать вещество по произволу, пропорционально уменьшая его сопротивление разрыву, то вес такого малоплотного крыла был бы меньше, а крепость больше. Это следует из последней формулы; в самом деле, оставляя поверхность



Фиг. 4

крыла неизменной так же, как и его вес, но разрезая материал вдвое, получим возможность толщину его h увеличить также вдвое, отчего сопротивление излому по формуле увеличится в 4 раза; от уменьшения же плотности

D оно уменьшается только в 2 раза; так что, в общем, сопротивление излому возрастает вдвое. На первый взгляд изменение плотности вещества, по крайней мере в широких пределах, кажется совершенно невысказанным, и действительно, плотность стали, посредством ее обработки, можно изменить только чрезвычайно мало. Более значительно ее можно уменьшить при сплавлении стали с другими малоплотными материалами, например с алюминием, но всего этого недостаточно.

Употребим другой прием: изменим не физическую плотность, а среднюю общую плотность крыла, составляя его из плотных мелких частей с возможно большими промежутками между ними. Если бы мы, например, устроили крылья из полых металлических трубок, покрытых общей поверхностью, то средняя плотность таких крыльев была бы гораздо меньше плотности стали. Есть множество способов уменьшать среднюю плотность строительных материалов, которыми и пользуются люди на практике.

Природа также этим не пренебрегает; так, кости многих животных или пусты (т. е. наполнены воздухом, как у птиц), или составлены из множества перекрещивающихся между собою палочек или пластинок, покрытых общей костяною поверхностью (череп человека и других животных, головки крупных ручных и ножных костей). Наши большие мосты и разные гигантские сооружения новейшего времени также составлены из целого лабиринта балок и перекладин, хотя и не всегда покрытых общей поверхностью. Если таковую покрыть, например, башню Эйфеля как чехлом, то получим среднюю плотность башни, аналогичную плотности крыльев, о которой идет речь.

В выражении (31) важно отношение $\frac{K}{D_1}$, т. е. крепость вещества, приходящаяся на единицу его плотности D_1 . Если мы возьмем длинный ряд веществ, употребляемых в индустрии, и будем определять для них отношение $\frac{K}{D_1}$, то не найдем выгоднее и крепче сплавов алюминия (кобальт, никель и другие дорогие и малоупотребительные материалы я не имею в виду). Не входя в технические подробности этих сплавов, берем их для наших крыльев и оставляем за собою возможность уменьшать среднюю плотность D произвольно, причем допустим, что прочное сопротивление разрыву $\frac{K}{m}$ вещества уменьшается пропорционально уменьшению плотности. Она уменьшается в $\frac{D_1}{D}$ раз, почему в формулу (31) входит множитель $\frac{D}{D_1}$.

Уменьшения плотности на практике достигают только чрезвычайно искусным построением «рыхлой массы». Это дело особенно трудно, когда элементы ее должны быть очень мелки. Таковы крылья снаряда. Незначительное изменение плотности, конечно, не хитрость, но не легко разредить вещество в 100—1000 раз.

Безопасное сопротивление излому крыла должно быть равно силе давления F на него встречного воздушного потока, т. е. половине веса снаряда P_v . Итак, на основании (31) напишем

$$\frac{I \cdot h^2 \cdot K \cdot D}{3 \cdot L \cdot m \cdot D_1} = \frac{P_v}{2}. \quad (32)$$

Вес крыла P_a как треугольной призмы (фиг. 5), очевидно, равен

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I \cdot h \cdot D. \quad (33)$$

Мы видели, что наиболее выгодное отношение длины L крыла к его ширине I не превышает двух

$$\frac{a}{b} = \frac{L}{I} = 2.$$

Поэтому имеем еще уравнение

$$L = 2I. \quad (34)$$

Исключая L из уравнений (32) и (33), найдем

$$\frac{h^2 \cdot K \cdot D}{3 \cdot m \cdot D_1} = P_v, \quad (35)$$

$$P_a = I^2 \cdot h \cdot D. \quad (36)$$

Исключая теперь из (35) толщину h крыла посредством (36) и определяя вес крыла P_a , получим

$$P_a = I^2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot D_1}{K} \cdot P_v \cdot D \cdot m}. \quad (37)$$

Из формулы этой видно, что вес крыла P_a , при одном и том же весе снаряда P_v , прямо пропорционален I^2 , т. е. площади крыла, так как $S = L \cdot I$, или, по уравнению (34), $S = 2 \cdot I^2$.

Также видно из формулы (37), что вес крыла обратно пропорционален квадратному корню из крепости вещества $\frac{K}{m}$ и прямо пропорционален квадратному корню из средней плотности рыхлой массы крыльев D или обратно пропорционален квадратному корню из разрежения $\frac{D_1}{D}$ данного материала, например стали, алюминия и т. п.

Стало быть, чем рыхлее мы устраиваем крылья, тем вес их, для одного и того же снаряда и одной и той же площади их, меньше. Но, разумеется, есть предел этому разрежению: именно дробь $\frac{h}{I}$ не должна быть близка к единице, иначе крылья обратятся в шарообразные массы и, представляя, во время поступательного движения, большое сопротивление встречному воздуху, будут крайне плохо исполнять свое назначение — держать снаряд в воздухе. Приходит даже в голову, и не без основания, наполнять их рыхлую массу водородом; тогда, пожалуй, окажутся излишними и внутренние перегородки крыльев, но в таком случае наш авиационный прибор превращается уже в аэростат.

Преобразуем уравнение (37). Мы видели, что энергия снаряда остается неизменной, если вес его возрастает пропорционально поверхности его крыльев, т. е. если отношение $\frac{P_v}{S}$ сохраняется постоянным. Положим

$$\frac{P_v}{S} = A,$$

или, так как $S = 2I^2$, то

$$\frac{P_v}{2I^2} = A.$$

Исключая, посредством этого уравнения I^2 из равенства (37) и затем, из него же, P_a или вес крыла, который, по уравнению (14), составляет некоторую часть C_a веса снаряда P_v , найдем

$$C_a = \sqrt{\frac{3 \cdot m \cdot P_v \cdot D_1 \cdot D}{4 \cdot A^2 \cdot K}}. \quad (38)$$

Отсюда видно, что коэффициент C_a крыла возрастает пропорционально квадратному корню из полного веса авиационного аппарата P_v . Поясню этот вывод: обладая определенной наибольшей энергией E двигателей, построим ряд летательных снарядов разных масс. Все снаряды наши будут летать, если площадь их крыльев будет соответствовать их весу [уравнение (29)]. Но при этом сравнительный вес крыльев

$$C_a = \frac{P_a}{P_v}$$

будет возрастать все более, по мере увеличения самого снаряда. Короче — у маленьких аппаратов сравнительный вес крыльев мал, у больших он велик и поглощает самый снаряд. Например, если вес снаряда последовательно возрастает в 4, 9, 16, 25, 36 раз, то сравнительный вес крыльев этих снарядов будет последовательно возрастать в 2, 3, 4, 5, 6 раз; абсолютный же вес крыльев выразится числами: $8P_a$, $27P_a$, $64P_a$, $125P_a$, $216P_a$, где P_a — абсолютный вес крыльев первого наименьшего снаряда.

Этот вывод из уравнения (38) предполагает неизменной среднюю плотность D крыльев. При изменении ее, относительный вес крыла C_a может оставаться постоянным. Для этого нужно, чтобы произведение $P_v \cdot D$ в формуле (38) сохранялось неизменным. Положив

$$P_v \cdot D = B, \quad (39)$$

увидим, что средняя плотность D крыльев обратно пропорциональна весу снаряда P_v ; при этом относительный вес крыла C_a для больших и малых авиационных аппаратов будет один и тот же.

Таким образом, требуется разрыхление крыльев тем большее, чем больше вес снаряда, крылья которого, при известной величине его, должны превратиться в комообразные, плохо действующие и невозможные на практике массы.

Итак, при возрастании веса снаряда, происходит одно из двух: или крылья поглощают все большую и большую часть C_a его полного веса, когда плотность D их не изменяется, или они превращаются в рыхлую массу, не рассекающую воздух и не исполняющую своего назначения, когда плотность D их может уменьшаться пропорционально увеличению веса снаряда.

И то и другое показывает, что размеры летательных аппаратов ограничены.

С помощью последних уравнений мы можем получить и более определенные выводы.

Вычислим размеры и площадь крыла, сделанного из лучшей стали. В уравнении (13) положим все коэффициенты равными между собой, кроме запасного коэффициента C , который, допустим, вдвое больше других, т. е.

$$C = 2 \cdot C_a \text{ и } 1 = 9 \cdot C_a,$$

а так как один из коэффициентов, именно пассажирский C_p , не может быть меньше 50 кг (3 пуда — вес худощавого человека, небольшого роста), то

$$P_a = 50 \text{ кг, а } P_v = 450 \text{ кг (27 пудов);}$$

кроме того, положим в уравнении (37)

$$D_1 = 7; m = 5; K = 700\,000 \text{ кг / дециметр}^2$$

или 70 кг на мм² сечения; $D = 7$ (т. е. крыло из сплошной стали, без пустот); тогда вычислим ширину I крыла в 0,85 м а, следовательно, длину — в 1,7 м. Маловато! Но из формулы мы видим, что ширина I крыла пропорциональна корню четвертой степени из $\frac{1}{D}$. Поэтому, если разредить среднюю плотность D крыла, например, в 16 раз, составив его из полых трубок, перекладин и тому подобного, то ширина I крыла и длина L его увеличатся в 2 раза, площадь от 1,4 м² дойдет до 5,8 м². Не будет ли, однако, такое крыло чересчур «пухло», т. е. не примет ли оно комообразного вида? Из уравнения (36) найдем

$$\frac{h}{I} = \frac{P_a}{I^3 D}, \quad (40)$$

или выражение для «пухлости» крыла, которое показывает, какую часть составляет толщина h крыла по отношению к ширине I его. Полагая тут, согласно последним условиям и вычислениям,

$$P_a = 50 \text{ кг; } I = 1,7 \text{ м; } D = \frac{7}{16}$$

(близко к плотности сухого елового дерева), вычислим

$$\frac{h}{I} = \frac{1}{44};$$

это совсем не «пухло». Если бы еще уменьшили среднюю плотность D крыла в 16 раз (таких физически малоплотных тел мы не знаем), то размеры его еще увеличились бы в 2 раза, «пухлость же» выразилась бы дробью $\frac{1}{22}$; площадь крыла составила бы 32 м²

$$I = 3,4 \text{ м; } L = 6,8 \text{ м.}$$

Относительно «пухлости» $\frac{h}{I}$ можем дать и общие законы. Из уравнения (37) найдем

$$I = \sqrt[4]{\frac{P_a^2 \cdot K}{3 \cdot D \cdot D_1 \cdot P_v \cdot m^2}}; \quad (41)$$

исключая теперь I из формулы (40), получим

$$\frac{h}{I} = \sqrt[4]{\frac{27 \cdot m^3 \cdot D_1^3 \cdot P_v^3}{D \cdot K^3 \cdot P_a^2}}; \quad (42)$$

значит, «пухлость» $\frac{h}{I}$ крыла обратно пропорциональна корню четвертой степени из средней его плотности D .

Определим наибольшую величину I и площадь S крыла, предполагая наибольшую возможную «пухлость» крыла $\frac{h}{I}$ и прочность материала. Для этого сначала исключим из уравнений (40) и (42) P_a посредством формулы

$$C_a = \frac{P_a}{P_v};$$

затем узнаем отношение $\frac{P_v}{D}$, которое исключим из уравнения (40); после всего этого, найдем

$$I = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h}{I}\right) \cdot \frac{C_a \cdot K}{D_1 \cdot m}. \quad (43)$$

Отсюда видим, что размер I крыла пропорционален его «пухлости» $\frac{h}{I}$ *, крепости материала в обыкновенном плотном его виде $\frac{K}{m}$ и коэффициенту крыла C_a .

Положим, например:

$$\frac{h}{I} = \frac{1}{20} \text{ (пухлость)}; \quad \frac{K}{D_1} = 100000;$$

$C_a = 1/9$ и $m = 5$ (прочность); тогда вычислим: $I = 3,6$ м; $L = 7,4$ м; $S = 26,64$ м².

Построим мысленно множество летательных машин самого разнообразного веса P_v ; наибольший размер I крыла, по формуле (43), не зависит от веса снаряда, и потому всем им мы придадим крылья одного и того же размера I и формы, хотя и разной плотности, а потому и веса. Вес их будет пропорционален весу снаряда.

Тогда на основании уравнения (29) можем заключить: энергия E двигателей, потребная для летания посредством крыльев, при прочих одинаковых условиях, пропорциональна весу P_v снаряда. При этом

* Этим подтверждается предыдущий вывод о том, что «пухлость» пропорциональна размеру крыльев I .

выводе не принимается во внимание чрезвычайно различная поступательная скорость V снарядов; в самом деле, скорость больших тяжелых снарядов будет гораздо больше, и потому энергия не будет так быстро возрастать с весом снаряда, как мы нашли.

Зная площадь крыльев для данного авиационного аппарата, мы могли бы, по уравнению (29), определить и абсолютную величину энергии E двигателей, при данном весе снаряда и разных его коэффициентах; но затруднение в том, что нам неизвестна еще величина их, как и величина поступательной скорости аппарата.

К решению этих задач мы сейчас и приступим.

V

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ПОСТУПАТЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ АЭРОПЛАНА И ЭНЕРГИЯ ЕГО МОТОРОВ

Из уравнения (29) следует: чем быстрее поступательное движение летательного снаряда, тем энергия E двигателей первого рода (необходимая для поддержания снаряда на весу) меньше. Но при этом движении воздушный поток производит давление также и на корпус снаряда и на его крылья, оказывающие сопротивление среде и при нулевом значении угла наклона к горизонту. Чтобы одолеть эту новую сумму давлений на корпус и крылья, нужна еще тяга второго рода f_2 и еще двигатели, создающие такую тягу.

Мы видели [уравнение (43)], что для больших снарядов крылья обязательно довольно «пухлы» ($\frac{h}{l}$ не менее $1/20$), т. е. толщина h их составляет порядочную часть их ширины и длины; так что они испытывают при движении не только трение о воздух, но и сопротивление иного рода, зависящее от степени их «пухлости» и инерции воздуха. Какая «пухлость» для крыльев наиболее выгодна и какая относительная их площадь наиболее практична — решить мы не беремся.

Подражая летающим существам, можем сказать: крыло не должно быть очень «пухло» и величина его поверхности не должна очень отличаться от величины поверхности самого корпуса снаряда.

Если крылья не очень «пухлы»,

$$\frac{h}{l} < \frac{1}{20},$$

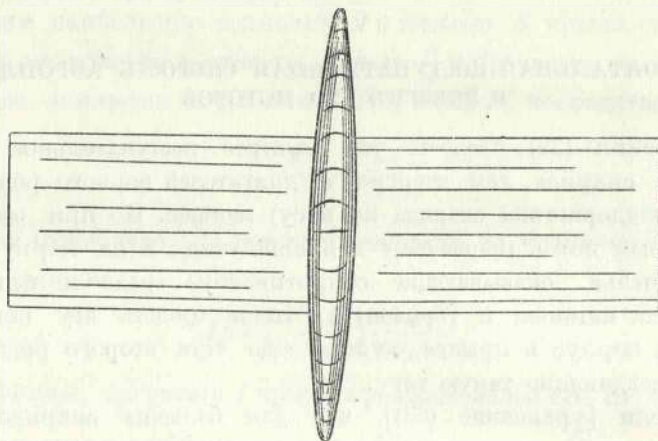
и поверхность их равна поверхности корпуса, то, очевидно, сопротивление их встречному воздушному потоку приблизительно равно сопротивлению корпуса — во всяком случае, не более последнего. Для проектируемых нами снарядов мы так и положим: определим давление на корпус и увеличим его в несколько раз $(n + 1)$, сообразно тому, во сколько раз полное сопротивление корпуса и крыльев более сопротивления одного

корпуса. Так, если поверхность крыльев в 2 раза (n) более поверхности корпуса, то положим, что и сопротивление их во столько же раз больше сопротивления корпуса; полное же сопротивление ($n + 1$) будет в 3 раза больше.

Сила давления воздуха на круглую пластинку (радиуса r), при прямой и нормальном ее движении со скоростью V , приблизительно равна

$$\frac{\pi \cdot r^2 \cdot d}{g} \cdot V^2, \quad (44)$$

где d есть объемный вес воздуха, g — ускорение силы тяжести, а r — радиус среднего сечения снаряда. Сила давления на корпус, благодаря его



Фиг. 5

птицеподобной форме (только еще раза в 3 более острой), в несколько раз (U раз) меньше, чем следует по формуле (44); так что оно будет равно

$$\frac{\pi \cdot r^2 \cdot d \cdot V^2}{g \cdot U}; \quad (45)$$

здесь U есть утилизация формы корпуса.

Но сопротивление крыльев увеличивает это давление в ($n + 1$) раз, потому что поверхность и сопротивление одних крыльев в n раз больше поверхности и сопротивления корпуса (фиг. 5).

Итак, сопротивление снаряда, не зависящее от наклона крыльев, или тяга второго рода f_2 , равна

$$f_2 = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot d \cdot V^2 (n + 1)}{g \cdot U}. \quad (46)$$

Работа T_2 второго рода, совершаемая снарядом, при рассечении им воздуха, в единицу времени, выражается формулой

$$T_2 = f_2 \cdot V. \quad (47)$$

Но так как гребной винт не имеет неподвижной опоры, как, например, колеса локомотива, то часть полной работы двигателей второго рода T_2 бесплодно пропадает и только остальная ее часть (определяемая коэффициентом C_h) идет на проложение пути для снаряда; поэтому имеем

$$T_2 \cdot C_h = f_2 \cdot V. \quad (48)$$

Исключая отсюда f_2 посредством уравнения (46) и определяя из полученного уравнения T_2 , найдем

$$T_2 = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot d \cdot (n+1) \cdot V^3}{g \cdot C_h \cdot U}, \quad (49)$$

или выражение для мощности двигателей второго рода. Здесь можно положить

$$T_2 = E \cdot P_2, \quad (50)$$

ибо работа мотора выражается произведением его удельной энергии E на вес P_2 ; исключая затем из полученного уравнения P_2 при помощи (20), найдем

$$E \cdot P_2 \cdot C_2 = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot d \cdot (n+1) \cdot V^3}{g \cdot C_h \cdot U},$$

откуда

$$V = \sqrt[3]{\frac{g \cdot C_h \cdot U \cdot E \cdot C_2 \cdot P_2}{\pi \cdot r^2 \cdot d \cdot (n+1)}}. \quad (51)$$

По этой формуле мы не можем определить поступательную скорость V снаряда, потому что нам неизвестна энергия E его моторов. Но мы определим E , если исключим V из уравнения (29). Сделав это, найдем:

$$E = \frac{V P_2 \cdot r \cdot \sqrt[4]{n \cdot (n+1)}}{C_h \cdot V \bar{d} \cdot \sqrt{8 \cdot g \cdot S^3 \cdot U (C_1^3 C_2) \cdot \left[f\left(\frac{a}{b}\right) \right]^3}}. \quad (52)$$

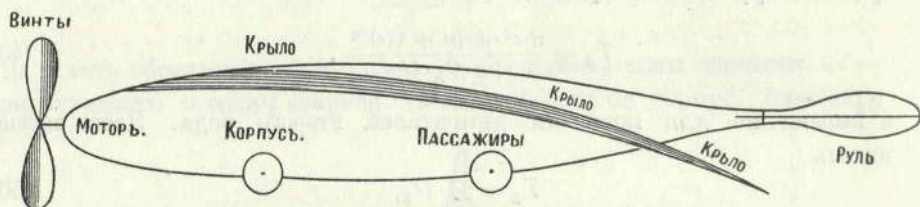
Не забудем, что тут $f\left(\frac{a}{b}\right)$ выражается уравнением

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = \frac{21 \sqrt{\frac{a}{b}}}{2g V \pi \left(7 + \frac{2a}{b}\right)},$$

где $\frac{a}{b}$ есть отношение длины L крыла к его ширине I .

Очевидно, корпус снаряда, поднимающего человека, не может быть очень маленьким: в ширину и высоту ($2r$), по крайней мере, 1 м, а в длину 10 м. Только при такой продолговатости, в соединении с плавной формой рыбы, он легко рассекает воздух и движется быстро. Если, при той же площади среднего поперечного сечения корпуса, сдавив его с боков и подняв кверху, сделать его эллиптическим, то помещение в корпусе

сделается довольно свободным даже для 8—10 человек. Удвоив все размеры, найдем, что помещение в 10 сажен (20 м) длины и одну сажень (2 м) ширины и высоты с удобством вместит до 40 путешественников (фиг. 6). Итак вес снаряда P_v , при одних и тех же размерах корпуса r , есть величина переменная, и в этом случае, применяя последнее уравнение, можем сказать, что энергия моторов E должна быть пропорциональна квадратному корню из веса всего снаряда со всем содержимым, т. е. P_r .



Фиг. 6. Продольное вертикальное сечение

Формулу (52) мы вывели при условии, что сопротивление и площадь крыльев в n раз больше площади или сопротивления корпуса встречному воздушному потоку. Но поверхность корпуса, принимая ее полученной от вращения дуги параболы, взятой близ ее вершины, вокруг хорды, равна приблизительно

$$\frac{2}{3} \pi (2r) \cdot (20r) = \frac{80}{3} \pi \cdot r^2, \quad (53)$$

или, еще менее точно — $80 r^2$; следовательно, площадь крыльев ($2S$) выражается формулой

$$2S = 80 r^2,$$

откуда

$$n = \frac{S}{40 \cdot r^2}. \quad (54)$$

Мы предполагали равенство друг другу всех коэффициентов C , почему и в уравнении (52) коэффициенты двигателей первого и второго рода C_1 и C_2 можно предположить равными; но будет ли это выгодно? Энергия моторов обратится в минимум, когда произведение $C_1^3 \cdot C_2$ в уравнении (52) обратится в максимум. Оставляя сумму коэффициентов неизменной, равной

$$\frac{1}{9} + \frac{1}{9} = \frac{2}{9},$$

напишем

$$C_m = C_1 \cdot C_2.$$

Нам надо отыскать максимум функции

$$F = C_1^3 \cdot C_2, \quad (55)$$

в которой мы исключим C_2 посредством уравнения (18); затем производную полученной функции приравняем нулю; тогда найдем

$$\frac{dF}{dC_1} = 3 \cdot C_m \cdot C_1^2 - 4C_1^3 = 0; \quad (56)$$

решая это уравнение, получим

$$C_1 = \frac{3}{4} \cdot C_m \text{ и } C_2 = \frac{1}{4} C_m. \quad (57)$$

Итак, чтобы ограничиться наименьшей энергией E моторов, необходимо общий вес P_m их распределить на 2 части, одна из которых, предназначенная на рассечение среды корпусом и крыльями, должна быть в 3 раза больше другой, предназначенной собственно для поддержания снаряда на весу. Короче — работа двигателей 1-го рода должна быть втрое больше работы двигателей 2-го рода, или для поддержания определенной, наиболее выгодной скорости авиационного аппарата назначается лишь $\frac{1}{4}$ доля полной работы моторов.

Теперь мы можем разобрать подробно значение всех величин, входящих в уравнение (52), а также и вычислить величину энергии, потребной для полета.

Вес снаряда P_r должен быть не менее 450 килограммов (27 пудов); но вес этот может возрастать до известного предела, при котором средняя плотность крыльев равна плотности стали или другого вещества; при этом возрастании все коэффициенты также возрастают пропорционально, и тогда энергия E будет пропорциональна квадратному корню из веса. Если, например, ряд аэропланов поднимают последовательно 1, 4, 9 и 16 человек, то энергия моторов последовательно возрастает так: 1, 2, 3 и 4.

Диаметр среднего поперечного сечения корпуса ($2r$) не должен быть меньше 1 м; если площадь этого круга, не изменяя ее величины, несколько сдавить с боков — сделать продолговатой, эллиптической, то сопротивление ее воздуху почти не нарушится, между тем как высота полученной камеры будет достаточна для удобного сидения (около 2 аршин).

Коэффициент винта C_h имеет величину, не превышающую $\frac{3}{4}$.

Энергия E зависит также от объемного веса d среды. Именно, энергия двигателей снаряда, поднимающегося на высоту, увеличивается пропорционально квадратному корню из разрежения $\frac{1}{d}$ высших слоев атмосферы. Так, на высоте 10 верст, где воздух вчетверо реже, от снаряда, при том же его весе, требуется вдвое бóльшая затрата энергии; на высоте 5 верст — раза в полтора; на высоте одной версты и менее изменение энергии весьма незначительно; настолько же незначительно оно и при метеорологических колебаниях плотности.

Площадь одного крыла (S) выражается формулой $S = 2I^2$, и так как по уравнению (43) имеем

$$I = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h}{l}\right) \cdot \frac{C_a \cdot K}{D_1 \cdot m},$$

то площадь S равна

$$S = \frac{2}{9} \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^2 \cdot \frac{C_a^2 \cdot K^2}{D_1^2 m^2}. \quad (58)$$

Коэффициент n зависит от S и, стало быть, есть величина столь же постоянная.

Коэффициент U есть коэффициент утилизации продолговатой формы корпуса. При хорошей форме корпуса и продолговатости его в 10, U близко к 50.

Произведение $(C_1^3 \cdot C_2)$ под знаком радикала в уравнении (52), на основании формулы (57), равно

$$C_1^3 \cdot C_2 = \frac{27}{256} \cdot C_m^4, \quad (59)$$

следовательно, энергия E обратно пропорциональна коэффициенту C_m моторов.

Теперь мы имеем все данные, чтобы вычислить величину энергии E , потребной для полета. Положим:

$$P_v = 450 \text{ кг (27 пудов); } 2r = 1 \text{ м;}$$

$$U = 50; \quad d = 0,0013; \quad \frac{a}{b} = 2;$$

$$g = 9,8 \text{ м/сек}^2; \quad S = 27 \text{ м}^2; \quad C_m = \frac{2}{9}; \quad C_h = \frac{3}{4}.$$

Тогда вычислим $E = 18,6$ м/сек, т. е. в среднем, двигатель (вместе с генератором силы) на каждый килограмм своего веса должен в 1 секунду давать работу в $18\frac{1}{2}$ кгм, или он должен поднимать самого себя на $18\frac{1}{2}$ м в каждую секунду. Это соответствует работе $2\frac{1}{2}$ паровых лошадей на каждые 10 кгм веса машины, или около 1 лошадиной силы на 10 фунтов веса.

Я долго не верил этому выводу и все искал в своих формулах ошибок, но, к сожалению, не отыскал их. По прилагаемому чертежу (фиг. 7) можно видеть относительные размеры крыльев снаряда. Истинная длина его 10 метров, ширина, с распростертыми крыльями — около 15 м; $\frac{2}{9}$ полной подъемной силы авиационного снаряда поглощаются весом крыльев, столько же берут моторы (6 пудов); остаются $\frac{5}{9}$ подъемной силы (15 пудов), которые распределяются на корпус (3 пуда), топливо (3 пуда), пассажира (3 пуда), разные принадлежности аэроплана (3 пуда), и, наконец, запасные 3 пуда. Требуемая для полета и подъема одного человека энергия моторов, хотя и меньше энергии, будто бы достигнутой Максимом, тем не менее она в 18,6 раза более энергии наилучших

газовых и керосиновых двигателей Яковлева, в 40 раз более бензиновых или керосиновых двигателей Отто и в 186 раз более энергии обыкновенных небольших паровых машин.

Кстати приведем и другие вычисления для того же снаряда. Так, по формуле (36) можем узнать среднюю плотность крыльев; она оказывается равной $\frac{2}{99}$, или около 1,50 плотности воды; стало быть, средняя плотность крыла должна быть в 20 раз меньше плотности сухого елового дерева (0,4). Трудненько сделать такое крыло.

Но если бы вес снаряда и всех его частей был в несколько раз больше, то плотность крыла должна бы увеличиваться во столько же раз, хотя размер его при этом не мог бы увеличиться. Действительно, исключив из уравнения (42) вес крыла P_a посредством уравнения (14), найдем

$$\frac{P_v}{D} = \left(\frac{h}{l}\right)^4 \cdot \frac{K^3 \cdot C_a^2}{27 D^3 \cdot m^3}, \quad (60)$$

т. е. плотность D крыла должна возрастать пропорционально весу P_v снаряда, чтобы не изменились «пухлость» $\frac{h}{l}$ крыла и отношение его веса к весу снаряда. Вычислим теперь поступательную скорость нашего снаряда, поднимающего одного человека, а вмещающего не более четырех. Для этого воспользуемся уравнениями (51) и (57), из которых найдем: $V = 35,4$ м/сек, или 128 км в 1 час. Скорость не дурна! В 3 часа можно пролететь из Москвы в Нижний-Новгород.

Объем корпуса снаряда таков, что он может свободно вместить до 4 человек. Поэтому мы приводим тут данные относительно этого снаряда, поднимающего последовательно одного, двух и четырех человек. Размеры его неизменны: длина корпуса 10 м, средняя ширина 1 м (высота средней части — около 2 аршин, ширина — около 1 аршина); ширина крыла 3,67 м, длина — 7,34 м, поверхность его 27 м², поверхность двух крыльев 54 м², объем корпуса не менее 4 м³.

Число пассажиров	Вес снаряда, кг	Вес мотора, кг	Энергия мотора кгм/сек.*	Мощность мотора, л. с.	Скорость, м/сек.	Вес двух крыльев, кг	Вес 1 м ² крыла	Средняя плотность крыла	Время полета, часы
2	900	200	26,2	52,5	49,9	200	3	$\frac{1}{50}$	6
1	450	100	18,6	18,6	35,4	100	1,8	$\frac{1}{25}$	4
4	1800	400	37,2	148,8	70,8	400	7,2	$\frac{1}{12\frac{1}{2}}$	3

* На 1 кг веса двигателя.

Коэффициенты также неизменны, но абсолютные массы моторов, крыльев, корпуса и т. д. возрастают пропорционально числу пассажиров — и эта пропорциональность есть прямое и неизбежное последствие увеличения числа пассажиров.

Отсюда мы видим, что вес крыльев равен весу моторов и простирается от 3 до 24 пудов. Энергия моторов, в 1 секунду, на килограмм двигателя — до 37 кгм. Эта энергия (для поднятия 4-х человек) в 37 раз более энергии двигателей Яковлева, на 4 пуда веса которых, при благоприятных условиях, приходится одна паровая лошадиная сила. Мощность моторов доходит до 149 л.с.; на человека, средним числом, расходуется около 40 л.с. Крыло легкое, и каждый квадратный метр его весит, средним числом, от 2 до 7 кг; средняя плотность от $\frac{1}{50}$ до $\frac{1}{12}$ плотности воды, т. е. в 20,5 раза легче елового дерева. Насколько осуществимо такое крыло на практике — предоставляю судить читателю. Я лично думаю, что такое крыло возможно построить, хотя и с большим трудом. Время безостановочного полета снаряда простирается от 3 до 6 часов. В основание мы принимаем бензиновые двигатели, требующие только $\frac{1}{2}$ кг бензина на 1 л. с.; если двигатель паровой, то требуется значительный запас воды, который сокращает время полета в несколько раз; запас бензина мы полагали вдвое меньшим, чем вес двигателей; коэффициент разрыва стали принимали в 70 кг на мм² сечения; прочность — равной 5.

Приводимые результаты не кажутся нам особенно удовлетворительными в отношении исполнимости; натянем струнку до последней степени: положим, что поверхность крыльев имеет гораздо большую величину.

Из формулы (43) мы видим, что размер крыла пропорционален $\frac{K}{m}$, т. е. пропорционален крепости вещества и обратно пропорционален желаемой прочности крыльев. Если бы мы могли увеличить крепость K вещества вдвое, или если бы мы рискнули уменьшить прочность крыльев m во столько же раз, то размеры их могли бы быть в 2 раза больше, а площадь — в 4 раза. Низводя прочность до $2\frac{1}{2}$ (недопустимый на практике коэффициент), доведем поверхность двух крыльев до 216 м². Такова, по известиям, была поверхность крыльев у летательной машины Максима. Меня удивляет, как ему удалось устроить крылья таких огромных размеров; вероятно, они снабжены были разными мачтами и тяжами, как крылья Лилиенталя, и потому должны представлять встречному воздушному потоку большое сопротивление. От этого скорость снаряда не может быть наибольшей, а следовательно, и энергия E — наименьшей.

Как бы там ни было, допустим, что и наш снаряд имеет такие крылья, притом, плавной формы и без всяких наружных выдающихся частей, сопротивление которых мы и не будем, значит, иметь в виду. По уравнениям (52) и (54), если одновременно расширим вдвое и помещение

корпуса, т. е. увеличим r вдвое или объем снаряда в 8 раз, то n останется неизменным, энергия же E двигателей уменьшится в 3 раза. Обширное помещение корпуса даст нам возможность приспособить его для полетов многих лиц — именно до 64.

Вот общие данные для таких снарядов, подобно устроенных, только разной плотности и веса. Высота и ширина корпуса в средней части $2r = 2$ м, длина его — 20 м, поверхность — около 80 кв. м, объем — не менее 32 м³ (вес различен); поверхность двух крыльев равна 216 м², их средняя «пухлость» $\frac{h}{l} = 1/20$, длина 14,68 м, ширина 7,34 м, прочность их $2^{1/2}$.

Пусть для восьми снарядов число пассажиров последовательно будет: 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 и 64; вес каждого пассажира, с запасным грузом, мы принимаем по 100 кг, так что вес их последовательно будет: 100, 400, 900, 1600, 2500, 3600, 4900 и 6400 килограммов, т. е. до 6 $1/2$ тонн. Теми же числами выразятся веса моторов у разных снарядов; теми же числами выразятся и массы корпусов с необходимыми принадлежностями для них и для пассажиров; таков же будет, последовательно, и вес двух крыльев. Вес бензина для работы моторов также положим пропорциональным числу пассажиров; он выразится вдвое меньшими числами. Итак, мы определили полный вес снарядов, который последовательно будет: 450, 4050, 7200, 11 250, 16 200, 22 050 и 28 800 кг, т. е. от $1/2$ до 28 т, или от 27 пудов до 1728 с лишком.

Энергию моторов E вычислим последовательно: 9,3; 18,6; 27,9; 37,2; 55,8; 65,1; 74,4 килограммометров в секунду. Стало быть, энергия возрастает пропорционально квадратному корню из числа пассажиров; для последнего снаряда она в 8 раз больше, чем для первого. Эти же числа показывают, сколько лошадиных сил приходится на одного пассажира воздушного корабля; так, для пассажира восьмого корабля должна работать машина в 74 л. с. Отсюда видно, как трудно устраивать корабли, поднимающие значительное число воздушных путешественников. Между тем как самый громадный теоретический аэростат, при условиях гораздо менее натянутых, подымает до 600 пассажиров, требуя на каждого не более 1 л. с. и двигаясь со скоростью 62 км/час. Итак, про отношение наибольшего аэростата к аэроплану № 8 можем сказать так: во сто раз больше пассажиров и во сто раз меньшая энергия двигателей; во сто раз большая возможность исполнения и во сто раз меньшие расходы на путешествие. (См. Циолковский, «Аэростат металлический, управляемый», вып. 1 и 2.)

Мы скоро увидим, что наши, как будто чудовищные, выводы вполне подтверждаются данными об опытах Максима и Лилиентала.

Абсолютная мощность восьми авиационных аппаратов последовательно будет (в лошадиных силах): 9,3 74,4; 251,1; 595,2; 1164,5; 2008,6; 3190,9

и 4761,6; ясно, что мощность двигателей возрастает быстрее веса снаряда: она пропорциональна весу снаряда, умноженному на квадратный корень из него. Скорости аэропланов последовательно будут: 64, 128, 192, 256, 320, 384, 448 и 512 км в час; начинаясь от величины довольно незначительной, равной скорости больших аэростатов, она достигает поразительной величины — 500 верст в 1 час. Но такая скорость необходима и наиболее выгодна; если бы мы ее вздумали уменьшить, то энергию моторов пришлось бы еще увеличить, и проект авиационного аппарата оказался бы менее осуществимым. На эту ужасную скорость тратится, однако, только $\frac{1}{4}$ доля полной силы двигателей, остальные $\frac{3}{4}$ идут исключительно на поддержание снаряда в воздухе, т. е. на борьбу с тяжестью. Закон скоростей явен: скорость пропорциональна квадратному корню из веса снаряда или числа пассажиров.

Средняя плотность D крыльев для разных снарядов последовательно выразится числами: $\frac{1}{400}$; $\frac{4}{400}$; $\frac{9}{400}$; $\frac{16}{400}$; $\frac{25}{400}$; $\frac{36}{400}$; $\frac{49}{400}$; $\frac{64}{400}$; значит, от $\frac{1}{400}$ до $\frac{1}{6}$ * плотности воды; для самого тяжелого снаряда (из приводимых) она в $2\frac{1}{2}$ раза менее плотности сухого елового дерева. Отсюда видно, как трудно строить крылья с большой поверхностью и малого веса. Квадратный метр их, средним числом последовательно будет весить (в килограммах): $\frac{1}{2}$; 2; $4\frac{1}{2}$; 8; $12\frac{1}{2}$; 18, $24\frac{1}{2}$ и 32, на самом деле — еще немного менее; заметим, что крыло должно выдерживать немалую силу давления, почти равную половине веса снаряда; центр этого давления приблизительно совпадает с геометрическим центром крыла. На каждый квадратный метр поверхности крыла приходится, средним числом, давление встречного воздуха, в 8 раз превышающее приведенные величины веса.

Запас бензина позволяет аэроплану пройти значительное пространство без возобновления запаса топлива. Это пространство для всех аэропланов одно и то же; полагая, как и прежде, для аэропланов вдвое меньших размеров по $\frac{1}{2}$ кг бензина на силу в 1 час (что очень мало), найдем, что наибольший рейс составляет около 700 км; но время его совершения для всех снарядов различно, именно — обратно их скоростям; так что времена эти будут последовательно равны: 11; $5\frac{1}{2}$; $3\frac{2}{3}$; $2\frac{3}{4}$; $2\frac{1}{5}$; $1\frac{5}{6}$; $1\frac{4}{7}$; $1\frac{3}{11}$ часа.

Ввиду большой энергии моторов весьма вероятно, что утилизация тепла далеко не такая идеальная, как мы предполагаем, так что как пространство в 700 км, так и времена полетов должны сократиться на практике в 2—3 раза.

Подтвердим теперь наши выводы опытами Максима. Его летательный снаряд весил вместе с двумя пассажирами и запасами топлива и воды

* Благодаря выпуклой поверхности крыльев средняя плотность их может быть значительно больше, что утешительно.

2725 кг; отсюда видно, что вес его заключается между двумя нашими снарядами, поднимающими 4 и 9 человек. Поверхность крыльев аппарата Максима, также и устройство его, весьма близко подходили к тому, что мы предполагали и для наших аэропланов (фиг. 2). Поэтому мощность его двигателей должна заключаться между 74 и 251 лошадиными силами. Мощность моторов снаряда Максима, как известно, заключалась между 90 и 225 л. с. Мы уже видим, что выводы наши несколько правдоподобны. Делая более точные расчеты по имеющимся формулам и законам, найдем, что снаряд, подобный снаряду Максима, с крыльями в 216 м², весящий, как и он, 2725 кг, должен обладать двигателем в 137 л. с. Не близко ли это к выводам Максима! Скорость его снаряда доходит до 150 км/час, что опять не противоречит нашим расчетам (от 128 до 192 км/час). Впрочем, пролетая свои 100 м, едва ли он имел такие скорости ввиду несовершенства в устройстве его крыльев. Относительно будущности авиационного аппарата и его значения для жизни сам Максим сознается, что применимость его специальная, исключительно для военных целей, но никак не для перевозки грузов и пассажиров, т. е. знаменитый изобретатель высказывает те же мысли, которые мы высказали год с лишком тому назад об аэропланах («Аэростат», вып. 2, 1893 г., стр., 83).

Но замечательна энергия, которой добился от своих моторов Максим! Его двигатель (вместе с генератором мощности, конечно) весил около 420 кг. Мощность же его была от 90 до 225 л. с.; таким образом, энергия E в 1 секунду, на 1 кг веса двигателя, заключалась между 21,4 и 53,5 кг. Применяя такую энергию к нашим авиационным аппаратам с поверхностью крыльев в 216 м², найдем, что этой энергии достаточно для поднятия снаряда с экипажем от 5 до 35 человек.

Кстати подтвердим наши выводы и при посредстве другого знаменитого исследователя — Отто Лилиенталя, так ужасно пострадавшего недавно за науку.

Из уравнения (4) находим

$$V_n = \sqrt{\frac{21^2 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) \cdot V_p}{4\pi \left(7 + \frac{2a}{b}\right)^2} + \frac{F \cdot g}{S \cdot d}} - \frac{21 \sqrt{\frac{a}{b}} \cdot V_p}{2V\pi \left(7 + \frac{2a}{b}\right)}.$$

По этой формуле можем вычислить скорость вертикального падения парашюта Лилиенталя. Известно, что последний, на своем снаряде, спускался по воздуху в наклонном направлении с холма высотой в 80 м; время спуска было около 40 секунд; ветер дул ему навстречу со скоростью 7 м в секунду, причем он пролетел 320 м в горизонтальном направлении. Скорость поступательная составляла около 8 м/сек, скорость падения — 2 м/сек.

Стало быть, в предыдущей формуле мы положим

$$V_p = 7 + 8 = 15 \text{ м/сек,}$$

т. е. относительную скорость (по отношению к воздуху) мы составляем из суммы скоростей снаряда (относительно земли) и ветра; F или вес аппарата вместе с воздухоплатателем, как известно, равнялся около 90 кг; поверхность S крыльев — 14 м²; $\frac{a}{b} = 1$; тогда вычислим: $V_n = 3,5$ м, между тем как скорость падения была (при ветре) около 2 м/сек. В первый момент это противоречие поставило меня в тупик. Но оно легко объясняется восходящим потоком воздуха благодаря наклону холма, с которого (против ветра) летел экспериментатор.

Действительно, тангенс угла наклона холма к горизонту составлял не менее $\frac{1}{4}$, так что воздух, ударяясь в гору, приобретал восходящую скорость, примерно в $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{5}$ скорости ветра; этот восходящий поток и подымал крылья, ослабляя почти вдвое скорость их падения.

IV

ЕЩЕ НЕКОТОРЫЕ ЧЕРТЫ УСТРОЙСТВА АЭРОПЛАНА; ПРИВЕДЕНИЕ ЕГО В ДЕЙСТВИЕ

Если судить по энергии существующих двигателей, то следовало бы отказаться от мечтаний летать посредством птицеподобных снарядов (вернее — насекомоподобных, потому что, как мы указывали, наш аэроплан напоминает более всего летающее жесткокрылое насекомое, например божью коровку). Однако у меня есть теоретические основания верить в возможность построения чрезвычайно легких и в то же время сильных бензиновых или нефтяных двигателей, вполне удовлетворяющих задаче летания. Вот почему я не отказываюсь от дальнейшей разработки этого интересного вопроса.

Будем надеяться, что рано или поздно он будет решен в благоприятном смысле.

Считаю не лишним сообщить тут весьма краткие дополнительные сведения о летательной машине.

Ранее мы дали только ее схему ради облегчения расчетов (гл. III, фиг. 2); но как действительно устроен летательный снаряд, как он приводится в действие, как опускается на землю и как сохраняет равновесие — об этом мы умолчали. Чтобы иметь возможность быть кратким, предлагаю прежде всего внимательно рассмотреть чертежи (фиг. 6 и 7).

Фиг. 6 представляет вид снаряда сбоку; следующий чертеж есть поперечное (к корпусу) и вертикальное его сечение.

Из фигур этих явствует, что крылья стюдь не имеют формы прямоугольных пластинок: они более похожи на птичьи, только неподвижны относи-

тельно корпуса (т. е. не махают подобно птичьим). Форма везде закругленная; сечения крыльев, во всех направлениях, ограничены плавными линиями, благодаря чему крылья легко рассекают воздух; давление на всю их нижнюю поверхность довольно равномерно. Во время полета передняя часть корпуса несколько приподнята — он как бы восходит на гору; такой наклон немного облегчает работу моторов. Во все эти подробности и многие другие мы входить не будем по ограниченному объему настоящей статьи.

Мы видим еще колеса, выдвигающиеся вниз корпуса. Цель их сейчас объясню.

Снаряд поднимается на воздух лишь при известной поступательной скорости. Как же придать ему ее? Винт быстро вертится, образуя довольно сильную тягу, но снаряд стоит неподвижно, если колеса заторможены; его удерживает тяжесть и образующееся от нее трение. Облегчая его в несколько сот раз употреблением колес и гладкой горизонтальной дороги, в виде



Фиг. 7

чугунной платформы или рельс, мы увидим, что наш снаряд быстро покатился на своих колесах, увлекаемый действием гребных винтов (подобно пароходу); по мере увеличения его скорости сила давления на крылья со стороны встречного воздушного потока будет возрастать, напротив — давление снаряда на платформу будет уменьшаться, и весьма скоро настанет момент, когда колеса снаряда не будут касаться платформы и летательная машина, при могучем действии моторов, плавно подымется на воздух.

Колеса нужны и при спуске снаряда на землю. Спуститься, где попало, он не может; нужна гладкая и довольно обширная платформа, торможением о которую он может безопасно потерять свою поступательную скорость. Отсюда видны еще некоторые затруднения к употреблению аэроплана. Может быть, зимою он в состоянии безопасно спуститься на ровную поверхность снежного поля, а летом — на гладкую поверхность воды — реки или озера.

Иные птицы, например стрижи, приобретают надлежащую горизонтальную скорость падением с высоты; для искусственного снаряда подражание в этом отношении довольно рискованно, если не скатываться для этого с нарочно устроенной горки, что несколько не устраняет затруднения.

Во время ветра подъем значительно облегчается, если снаряд привести в движение против направления ветра. Птицы без малейших усилий поднимаются иногда, расправляя крылья на ветер. Потом, понятно, они должны махать ими, чтобы не ослабить относительную поступательную скорость

корпуса. При неравномерном воздушном потоке как птицы, так и снаряды, известным образом устроенные, теоретически, могут держаться в воздухе почти исключительно его порывами. Равномерное же движение атмосферы, хотя бы и быстрое, не уменьшает работы моторов, т. е. дует ли ветер попутный или противный, слабый или сильный, часовой расход энергии двигателей от этого не изменяется нисколько. Только попутный ветер ускоряет перемещение, противный — его замедляет. Впрочем, сомнительно, чтобы порывистый ветер (неравномерный поток) на практике мог значительно облегчить работу двигателей больших искусственных летательных снарядов, поднимающих людей. Птицы с этой целью совершают сложные эволюции, которым наш просто устроенный снаряд едва ли может подражать. Да, притом, и птица в этом случае становится игрушкой ветра. Она, правда, может подыматься и опускаться по желанию, высматривать добычу, но она принуждена в то же время делать круги, пассивно уносясь общим воздушным течением.

Опыты Лилиенталя показывают, что сохранение горизонтальности продольной оси летящего снаряда далеко не так трудно, как это можно предполагать. Тем не менее и Лилиенталь, управляющий так ловко рулем своего снаряда, должен был сознаться, что внезапный порыв ветра (ускоренное движение воздуха), поднявший его неожиданно во время спуска (ибо он, летая, спускался по наклонной линии) на несколько метров высоты, не был для него безопасен*. Поэтому простое управление рулем, подобным птичьему, не только требует навыка и непрерывного внимания, но и недостаточно надежно. Необходим автоматический регулятор. Действие его не может быть основано исключительно на законах тяжести (двухколенная трубка с ртутью и тому подобное) как действие регулятора горизонтальности, предложенного мною для управляемого аэростата («Аэростат», вып. 2-й, стр. 47). В самом деле, когда аэроплан наклоняется, он приобретает по направлению наклона ускоренное движение (как катящийся с горки), в силу чего влияние тяжести осложняется и ртуть в двухколенной трубке не действует, т. е. сохраняет некоторое время свой наклонный уровень вместе со снарядом. На аэростате же, от его наклона, ускоренного движения не происходит, и потому регулятор работает исправно, приводя в действие электрический ток и восстанавливая равновесие воздушного корабля. Мне кажется, для аэроплана следует употребить, как регулятор горизонтальности, маленький быстро вращающийся диск, укрепленный на осях таким образом, чтобы его плоскость могла всегда сохранять одно положение, несмотря на вращение и наклонение снаряда. При быстром непрерывно поддерживаемом вращении диска (гироскоп), его плоскость будет неподвижна относительно снаряда, пока сам он не

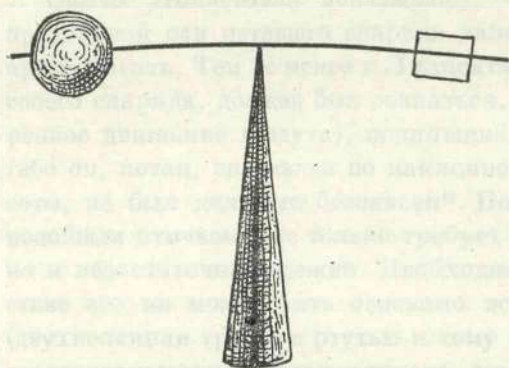
* Как слышно, недавно знаменитый воздухоплаватель и исследователь упал во время одного из таких полетов с высоты и сломал себе ногу.

изменяет своего направления, но стоит только снаряду изменить это направление, как относительное положение вращающегося диска окажется измененным. Понятно, такое изменение может служить причиной замыкания или размыкания электрического тока, действующего на электромагнит и руль, который и заставляет чуть уклонившийся снаряд прийти снова в горизонтальное положение¹¹.



ПЕРВЫЕ ОПЫТЫ К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО
ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ ВОЗДУХА (1895 — 1896)
ДО СООРУЖЕНИЯ ИМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ*

1. Фиг. 8 покажет вам прибор, при помощи которого я определил сопротивление воздуха продолговатым телам (в роде нашего аэростата) при движении их со скоростью одного метра в секунду.



Фиг. 8

2. Испытываемые тела ограничивались поверхностями вращения, полученными от движения дуги окружности вокруг ее хорды. Диаметр среднего поперечного сечения всех тел имел около 10 см, а площадь поперечного сечения от 80 до 82 см².

3. На один конец стального стержня (фиг. 8) надевалась испытываемая форма (я делал их из бумаги), а на другой — небольшая пластинка. Направление движения прибора совпадало с направлением оси испытываемой продолговатой формы и было нормально к направлению горизонтального стержня и отвесной пластинки. Перед началом поступательного движения старались стержень удержать от малейшего вращения на острие. При многократных опытах пластинка урезывалась или менялась до тех пор, пока давление на нее встречного воздушного потока не равнялось продольному давлению на форму. Это было тогда, когда поступательное движение не заставляло вращаться стержень (центр давлений был на равном расстоянии от острия).

* Настоящая статья представляет собой главу из работы К. Э. Циолковского «Железный управляемый аэростат на 200 человек, длиною с большой морской паровой», которая была издана им в Калуге в 1896 г. В этой главе, носящей название: «Опыты и формулы, на основании которых я делаю свой расчет о самостоятельной скорости аэростата», изложены первые опыты К. Э. Циолковского по аэродинамике, относящиеся к 1895—1896 гг. — (Ред.).

В таком случае, отношение площади пластинки к площади наибольшего поперечного сечения формы я называю коэффициентом сопротивления испытываемой формы.

Вот еще данные об этих формах и результаты опытов с ними:

4. Длина формы	21	32	42	52	62 см
5. Поверхность ее	440	670	880	1080	1300 см ²
6. Площадь пластинки	222	18	19	21	24 см ²
7. Коэффициент сопротивле- ния	0,272	0,222	0,235	0,259	0,296

Последняя строка получена от деления площадей равного сопротивления (6)* на площадь наибольшего поперечного сечения, т. е. на 80 или 82 (2).

8. Рассматривая коэффициенты сопротивления, видим, что наименьшее сопротивление оказывается у формы, длина которой почти в три раза больше высоты. Итак, с увеличением продолговатости, или остроты тела, его сопротивление сначала уменьшается, а затем возрастает. Это будет понятно, если мы допустим существование трения воздуха о тело.

9. Тот же прибор не только доказал существование трения, но и дал возможность определить его коэффициент. Для этого продолговатая форма снималась, а на место ее укреплялось подобие флага или флюгера, расположенного всегда по направлению движения.

10. При движении со скоростью одного метра в секунду, отношение площади пластинки равного сопротивления к двойной площади большей трущейся плоскости (принимались в расчет обе ее стороны) равнялось $\frac{1}{58}$.

11. Умножая поверхность (5) каждого испытываемого тела на полученный коэффициент трения ($\frac{1}{58}$) и вычитая эту величину трения из площадей равного сопротивления (6), найдем следующие числа:

12.	14,41	6,45	3,83	2,21	1,59 см ²
-----	-------	------	------	------	----------------------

Из этой строки выводим приблизительно верный закон:

13. Сила, необходимая для раздвигания воздуха (не считая трения), обратно пропорциональна квадрату продолговатости тела.

14. Дальнейшие опыты (9) с аппаратом убедили меня, что коэффициент трения обратно пропорционален скорости движения трущейся поверхности, т. е. выражается формулой $\frac{1}{58V}$, где V есть скорость поверхности в метрах в секунду.

* Числа в скобках обозначают ссылки на соответствующие номера в тексте.
(Ред.)

15. Зная закон (13), определяющий силу раздвигания воздуха, или сопротивление от инерции, и закон трения (14), нетрудно уже чисто эмпирически составить и формулу общего сопротивления воздуха телам принятой нами простейшей формы (2). Таким образом, получим:

$$\frac{Kd\pi b^2}{2g} V^2 \left\{ \frac{18}{23} \left(\frac{b}{a} \right)^2 + \frac{a}{\frac{3}{8} 58bKV} \right\}.$$

Тут K есть отношение истинного сопротивления плоскости к теоретическому $\frac{d\pi b^2}{2g} V^2$; по опытам Кальете и Колардо (заслуживающим особенного внимания, потому что движение пластинки было прямолинейно), $K = 1,06$; a и b суть полудлина и полувысота аэростата; V — скорость его движения; g — ускорение силы земного тяготения; остальные числа получены из описанных опытов.

По формуле этой я вычислял продольную силу давления на аэростат воздушного потока.

16. Множитель в скобках $\frac{18}{23} \left(\frac{b}{a} \right)^2 + \frac{a}{\frac{3}{8} 58bKV}$ есть полный коэффициент сопротивления.

17. Например, полагая продолговатость равной 7 ($\frac{a}{b} = 7$; такова продолговатость проектируемого нами аэростата), вычислим следующие коэффициенты сопротивления для разных скоростей:

Скорость в метрах в секунду	Скорость в километрах в час	Коэффициент сопротивле- ния
1	3,6	1/3,1
2	7,2	1/6,0
3	10,8	1/8,5
4	14,4	1/10,9
5	18,0	1/13,0
6	21,6	1/15,0
8	28,8	1/18,5
10	36,0	1/21,5
12	43,2	1/24,2
24	86,4	1/34,9

18. Определяя известным образом продолговатость аэростата, соответствующую наименьшему сопротивлению, получим формулу

$$\frac{a}{b} = \sqrt[3]{36V}.$$

19. По ней вычислим наивыгоднейшую продолговатость при различных скоростях V и соответствующие наименьшие коэффициенты сопротивления:

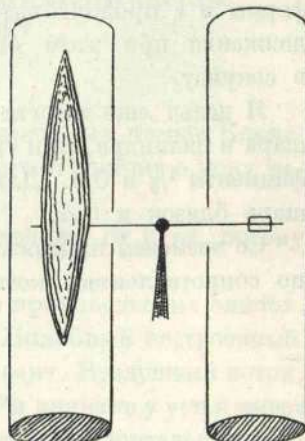
Скорость аэростата	1	2	4	8	10	12	м/сек.
Продолговатость	3,3	4,16	5,24	6,6	7,11	7,56	
Коэффициент сопротивления	0,217	0,135	0,085	0,054	0,046	0,041	

20. По формулам увидим, что при наименьшем коэффициенте сопротивления сила трения равна удвоенному сопротивлению от инерции воздуха. Стало быть, трение воздуха играет даже более значительную роль, чем его инерция.

21. В силу найденных законов, мои прежние вычисления («Аэростат», вып. 2, стр. 73—75) относительно сопротивления воздуха, при медленном движении аэростата (например, при вождении его людьми), неверны.

Что же касается самостоятельного движения воздушного корабля со значительной скоростью (от 20—40 верст в час), то в этом случае я вполне прав.

22. Для непосредственного определения коэффициентов сопротивления продолговатых тел (2), при больших скоростях движения, я устроил прибор (фиг. 9), состоящий из двух горизонтальных труб, укрепленных на треножнике; они имели в длину около 75 см и отверстия около 25 см. В одной из них помещалась на стержне (фиг. 8 и 9) испытываемая форма, а в другой—пластинка; стержень, конечно, проходил в трубы через особые отверстия, и средняя часть его, как всегда, вращалась свободно на острие. Трубы выносились на крышу и ставились по направлению ветра. Я становился сбоку и смотрел в промежуток между двумя трубами на стержень, чтобы заметить, на какую его половину давление воздуха было больше, т. е. какая его половина перетягивала.



Фиг. 9

Мною испытывалась форма в 62 см длины (4). Скорость ветра, в месте наблюдения, постоянно и быстро изменялась, переходя от 0 до 5 метров в секунду. Я употреблял последовательно, в роли пластинок равного сопротивления (6), медные монеты с площадями в 11,6, 8 и 6,2 см². Когда скорость ветра мала, перетягивает форма, но лишь скорость ветра достигает 2—3 метров в секунду — перевес на стороне пластинки (площадь равна 11,6; соответствующий коэффициент равен $\frac{1}{7}$). При скорости около 4 м в секунду перетягивает площадь в 8 см²; соответствующий коэффициент равен $\frac{1}{10}$. При скорости, большей 5 м в секунду, перетя-

гивает даже монета с площадью в $6,2 \text{ см}^2$; соответствующий коэффициент будет $\frac{1}{13}$.

Нетрудно видеть, что все эти опыты приблизительно согласуются с нашими формулами, основанными на других опытных данных.

Коэффициенты сопротивления продолговатых тел, при малых скоростях движения, поражают своей значительной величиной (см. 7). Так, для тела с продолговатостью 5,2 и при секундной скорости его движения в 1 метр коэффициент сопротивления составляет 0,259, или около $\frac{1}{4}$. Но то же отчасти мы замечаем и при движении, с малой скоростью, продолговатых тел в воде. Так, опыты с деревянным телом, принятой нами формы и с продолговатостью 5, дали коэффициент около $\frac{1}{3}$; скорость движения при этом опыте не была определена, но была менее $\frac{1}{2}$ м в секунду.

Я делал еще многие опыты с поверхностями других форм. Так, для шара и цилиндра, при скорости около 1 метра в секунду, я получил коэффициенты $\frac{4}{9}$ и 0,6. Для больших скоростей коэффициент сопротивления шара близок к 0,4.

Со временем надеюсь напечатать подробное описание всех моих опытов по сопротивлению, которые я готов повторить публично.

ПЕРВОЕ ОПИСАНИЕ К. Э. ЦИОЛКОВСКИМ
ЕГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ, ПОСЛАННОЕ
12 ОКТЯБРЯ 1897 г. В РУССКОЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ
ОБЩЕСТВО В ПЕТЕРБУРГЕ*

Прежде всего покорнейше прошу гг. многоуважаемых членов Комиссии, дав свое мнение Обществу, не сообщать ничего и никому о моих работах и планах до окончания их и напечатания.

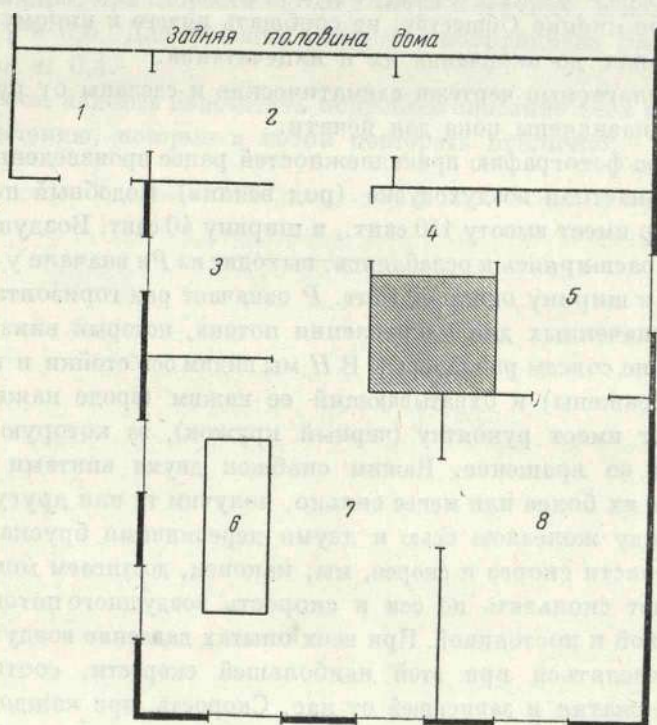
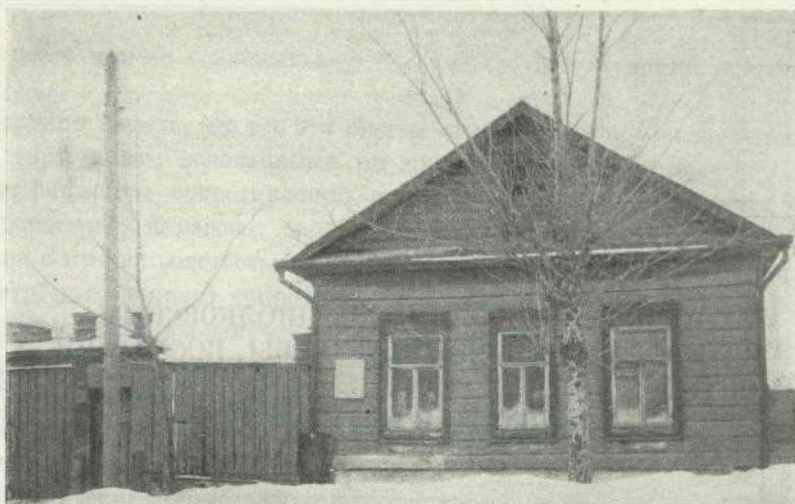
Все предлагаемые чертежи схематические и сделаны от руки, потому что не предназначены пока для печати.

Прилагаю фотографию принадлежностей ранее произведенных опытов. *HP* — лопастная воздуходувка (род веялки). Подобный построенный мною прибор имеет высоту 150 сант., а ширину 40 сант. Воздушный поток, постепенно расширяясь и ослабляясь, выходит из *P* и вначале у устья имеет в высоту и в ширину около 40 сант. *P* означает ряд горизонтальных пластинок, назначенных для выправления потока, который внизу отверстия *P* (без них) не совсем равномерен. В *H* мы видим ось стойки и подшипники ее (не изображены) и охватывающий ее нажим (вроде нажима Прони). Нажим этот имеет рукоятку (черный кружок), за которую лопасти *L* приводятся во вращение. Нажим снабжен двумя винтами с гайками. Завинчивая их более или менее сильно, получим ту или другую величину трения между железною осью и двумя деревянными брусками нажима. Вращая лопасти скорее и скорее, мы, наконец, достигаем момента, когда нажим будет скользить по оси и скорость воздушного потока делается максимальной и постоянной. При всех опытах давление воздуха на формы будет определяться при этой наибольшей скорости, соответствующей величине нажатия и зависящей от нас. Скорость, при каждом отдельном опыте, определяется по давлению воздушного потока на пластину,

* Письмо К. Э. Циолковского А. Л. Гершуну от 5 октября 1897 г. Калуга.

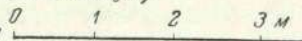
(Профессор А. Л. Гершун был в те годы членом Президиума Русского физико-химического общества, помещавшегося в Петербургском университете.)

Письмо хранится в Московском отделении Архива Академии Наук, фонд 555.



Ул. 1905г (б. Георгиевская ул)

Масштаб-1м=2,3 см

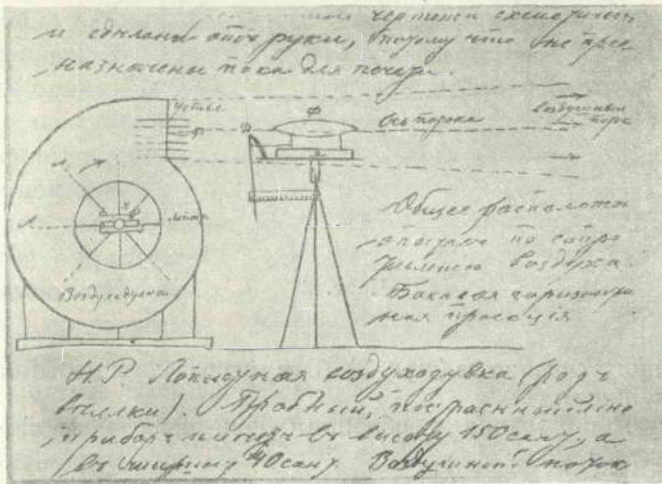


Общий вид дома и план квартиры в доме Сперанской на ул. 1905 года (б. Георгиевской) в Калуге, где Циолковский производил опыты с изобретенной им аэродинамической трубой (1896—1903 гг.).

1 — крыльцо; 2 — сени; 3 — прихожая; 4 — коридор; 5 — кухня; 6 — труба; 7 — зал, где производились опыты; 8 — спальня

согласно коэффициентам Кальете и Колардо (или по Ланглюю), зная барометрическое давление и температуру воздуха.

Я — прямоугольный жестяной ящик с водою, в которой плавает другой ящик, но меньших размеров. К последнему, на 4 столбиках (или другими способами), прикрепляется испытываемая форма, давление на которую мы хотим определить. На том же столике Я, на котором расположен ящик с водою, прикреплена стоечка, а на ней свободно ка-



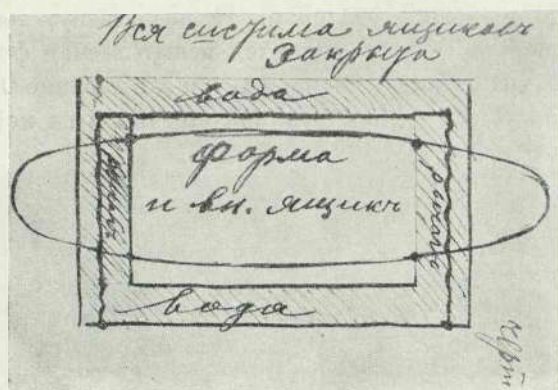
Черт. 1. Общее расположение опытов по сопротивлению воздуха.
Боковая горизонтальная проекция

чается маятник из длинной, тонкой железной проволоки. К проволоке привязана ниточка, за которую тянет плавающая форма, стремящаяся удалиться по направлению воздушного потока. От этого проволока уклоняется от вертикального положения более или менее сильно. Величина уклонения определяется, в опытах, тангенсом угла отклонения посредством линейки, разделенной на миллиметры. Сила давления потока будет пропорциональна числу делений,⁸ указываемых проволокой. Путем особого опыта заранее определяется, скольким миллиграммам соответствует уклонение проволоки на 1 мм. Таким образом, все уклонения и соответствующие давления воздушного потока можно выразить в миллиграммах.

Внутренний ящик снабжен двумя легкими рычагами, которые делают его движение почти строго параллельным направлению воздушного потока (черт. 2). Во время опыта наружный ящик закрывается крышкой, в которой проделаны узкие щели для свободного движения столбиков, поддерживающих форму.

Формы я устраивал чрезвычайно легкие, из бумаги. Если нужно устроить форму в виде поверхности вращения, то я сначала тщательно

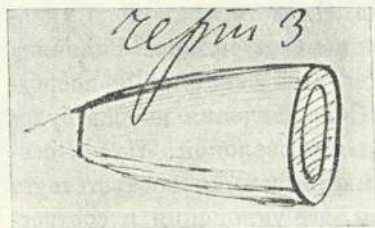
вычерчивал кривую главного продольного сечения формы. По этой кривой вытачивалась на токарном станке половинка формы, до наиболь-



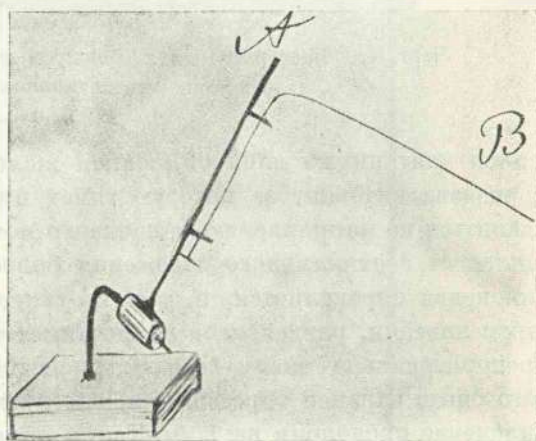
Черт. 2

шего поперечного сечения ее (черт. 3). (Это мне делали в местном железнодорожном училище).

Деревянную половинку я облеплял полосками мокрой бумаги и завертывал (забинтовывал) все крепко широкой тесьмой (пеленал, как ребенка). Дав хорошенько просохнуть бумаге,



Черт. 3



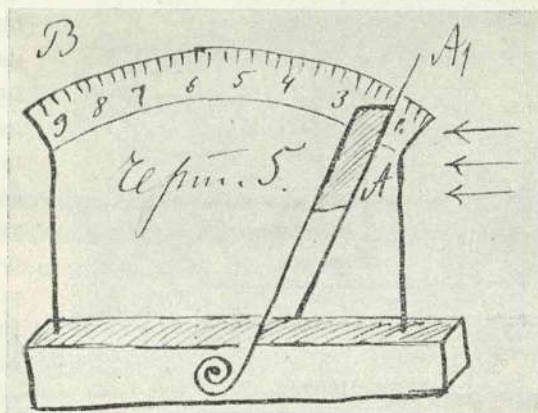
Черт. 4

я снимал тесьму и снимал осторожно бумагу, которая принимала выпуклый вид элементов деревянной болванки. Тогда оставалось только склеить кусочки бумаги на самой форме. После снятия бумажной оболочки, широкое ее отверстие снабжалось бумажным обручем (черт. 3). Если форма была очень продолговата, то несколько таких

обручей клеивалось внутрь бумажной поверхности. Так же готовилась и другая половина формы (иногда не равная первой). Обе половины слегка склеивались, и форма была готова.

Приступая к опытам, необходимо было убедиться в достаточной подвижности плавающего ящика и прикрепленной к нему формы. Для этого систему ящиков с водою я ставил на стол и замечал, какое давление на форму приводило ее в заметное движение. Вот прибор, производящий весьма малые давления на форму. Он состоит из стержня *A* (черт. 4), устанавливаемого более или менее близко к вертикали, и тонкой проволоки, изогнутой под прямым углом и вращающейся вокруг *A*.

Чем легче проволока *B*, чем отвеснее ось *A* и чем меньше уклоняется *B* от положения равновесия, тем с меньшей силою давит *B* на встретившееся препятствие; с помощью этого прибора легко производить давление в несколько миллиграммов. Форма начинает заметно двигаться уже при давлении 1 миллиграмма. А так как давление воздушного потока в опытах доходит до 5 и более граммов, то чувствительность моего прибора мне казалась вполне достаточной.



Черт. 5

Далее важно было исследовать искусственный воздушный поток (черт. 1). Надо было узнать скорость потока в разных расстояниях от устья и от средней горизонтальной его оси. Черт. 5 изображает прибор, указывающий непосредственно скорость воздушного потока. Он состоит из пластинки *A* на двух пружинных ножках, которая отклоняется более или менее от положения равновесия в зависимости от скорости ветра.

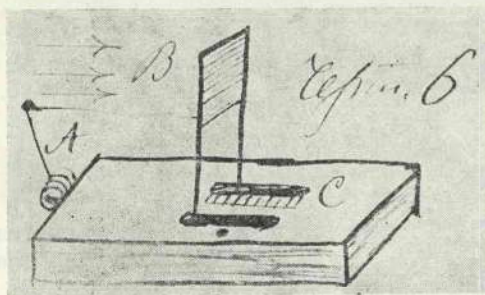
Колебание пластинки указывает на неравномерность его, порывистость. Деления *B* я получал так: сначала вычислял давления на пластинку *A* (по коэффициенту Кальете и Колардо) при разных скоростях ветра; затем производил эти самые давления на пластинку *A* посредством блока и грузов, отмечая на дуге *BA* показания стрелки и ставя соответствующие цифры скоростей.

К этому может служить и аппарат, подобный изображенному на черт. 2, только в меньшем размере; вместо формы на нем укрепляется вертикальная пластинка (черт. 6).

На B давит воздушный поток, заставляя B двигаться и уклонять пружину A пропорционально давлению ветра. Шкала не указывает точно ни скорости его, ни давления, а только постоянство его или неравенство в разных местах потока.

Показания этого прибора, благодаря воде, менее подвержены дрожанию.

Опыт располагается, как указано на черт. 1. Форму помещают в середине потока по его направлению и не очень близко к устью, чтобы не было большой разницы между скоростями воздуха у концов формы. Размер последней в особенности в вертикальном направлении должен быть невелик в сравнении с шириною или площадью поперечного сечения



Черт. 6

потока. В пробных опытах отношение наибольшей площади поперечного сечения (80 кв. см) испытываемой формы к площади поперечного сечения потока было не более $1/20$. Но желательно иметь гораздо меньшую величину. Теоретически поток должен бы быть безграничен. Впрочем, я на опытах (по разным методам) буду иметь случай показать, насколько мало изменяются коэффициенты сопротив-

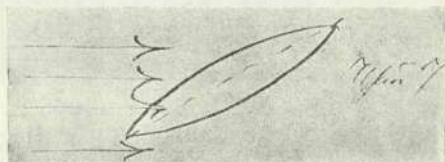
ления при замене ограниченного потока безграничным.

Опыт начинаю с малого нажатия винтов H (черт. 1), соответствующего малому трению оси и малой скорости потока. Все модели (формы) испытываются при одном положении гаек, при одной скорости искусственного ветра. Когда определено и записано давление на последнюю модель, вместо нее вставляется, нормально к потоку, пластинка известной площади. По давлению на нее, в связи с показанием барометра и термометра, определяем скорость потока. Центры форм и пластинки должны помещаться в одной точке потока. Давление на пластинку лучше определять в начале и конце серии опытов с тем, чтобы убедиться в неизменности скорости воздуха в продолжение всего опыта. Каждое из полученных чисел преобразуем в коэффициент сопротивления соответствующей формы, если сравним, посредством деления, давление на форму с давлением на площадь ее наибольшего сечения (она заранее вычисляется; давление же на пластинку, полученное ранее, даст возможность определить и давление на любую площадь при той же скорости движения).

Поворачивая на несколько оборотов гайки нажим H и увеличивая тем скорость искусственного воздушного потока, получим точно так же ряд других давлений, по которым узнаем ряд других коэффициентов

для тех же форм, но при другой скорости, вычисляемой, как указано, по коэффициентам Кальете и Колардо.

Производя еще ряд опытов с теми же формами при новом увеличении трения и, следов [ательно], при новой скорости, получим третью группу давления и коэффициентов. Таким образом, делая, напр[имер], наблюдения с двумя десятками форм при десяти различных скоростях, получим 200 чисел, выражающих давления на разные формы, при разных скоростях. Тогда остается выразить графически или посредством эмпирических уравнений зависимость между давлением и скоростью потока, а иногда—между давлением, скоростью потока и переменной формой тела. Во всяком случае, полученные мною коэффициенты сопротивления разных тел, помимо вывода каких бы то ни было законов сопротивления, могут иметь некоторую ценность как факт или как поверочный материал.



Черт. 7



Черт. 8

Предполагаю произвести опыты со следующими формами, при разных скоростях:

1) С телами разной продолговатости, полученными от вращения дуги круга ее хорды.

В группу этих наблюдений войдет и сферическая поверхность с ее частями.

Пока мною производились опыты с такого же рода поверхностями только при скорости в 1 м в секунду и на ветру. Последнего сорта опыты неудобны и трудны, не говоря уже о их неточности (посылаю в Комиссию печатное описание этих опытов).

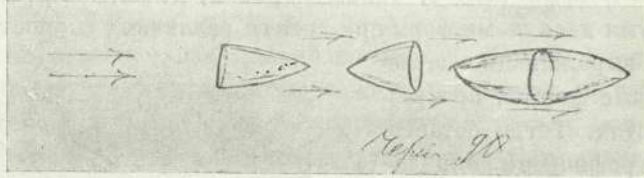
2) Интересно было бы определить также давление при наклонном положении продольной оси тех же форм к направлению потока, но для этого потребуются чересчур большие размеры воздуходувки.

3) С эллипсоидом вращения разной удлиненности (черт. 7).

4) С телами формы лепешки, рыбы, яйца (в статье будет дана их форма посредством чертежа или уравнения).

5) С разного рода цилиндрическими и коническими поверхностями (черт. 8).

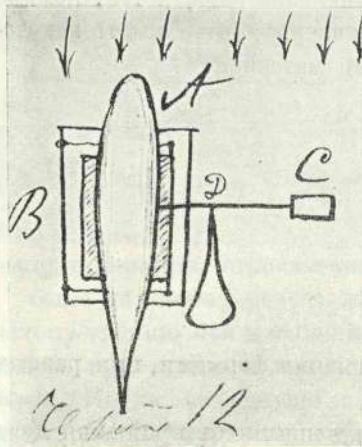
6) С многогранниками.



Черт. 9

7) Некоторые авторы по сопротивлению (г. Поморцев) пренебрегают значением кормовой части тела и трением воздуха (даже для продолговатых тел). Я сделаю опыты, которые выяснят этот спорный пункт.

8) С квадратной пластинкой, нормальной к направлению потока, но находящейся на разных расстояниях от горизонтальной плоскости (от столика) (черт. 10).



Черт. 12

9) С такой же пластинкой, но расположенной наклонно к направлению потока. Для этого ящик с водою и пластинкой располагается так, чтобы направление пластинки совпадало с направлением потока; это случится, когда указатель (динамометр, черт. 1) покажет нуль. Тогда, по заранее расчерченному кругу на столике, ящик вместе с пластинкой поворачивается последовательно на 5, 10, 15, 20 и т. д. градусов. (Проверка формул Дюшмена, Ланглея и лорда Рейля).

10) Опыт с удлиненной прямоугольной пластинкой, расположенной вдоль потока, немного наклонно к нему. Изменяется удлиненность или продолговатость пластинки. Выводится закон, выражающий значение продолговатости, помимо площади.

11) Опыт с такой же пластинкой, но длинная сторона которой расположена нормально к потоку. Закон тот же.

12) Давление на одно и несколько одинаковых тел, расположенных вдоль потока, одно за другим (черт. 11).

Примечание к вопросу: как легче летать, рассекая воздух, — одному аэростату или группе их, расположенной цепью.

6. Со квадратной пластинкой, нормаль-
ной к направлению порока, но нахо-
дящейся на различной высоте и не к



ср. горизонтальной плоскости (рис. 811)

7. Со такой-же пластинкой,
но к направлению порока.
Для этого нужно с одной стороны
красной пластинкой, другой же стороны
нормальной к направлению порока,
это будет направление порока,
это случится, когда ука-
зана в (данная высота — высота) и высота
длина. Тогда, по высоте пластинки
нормальной к пороку на одной стороне,
высота с пластинкой поворачивается
последовательно на 5, 10, 15, 20 и 7 д.
градусах (пластинка формула Дюваль, Ланге, и др. (рис. 812))

8. Отличается удлинением прямо-
угольной пластинкой, располо-
женной нормально к пороку,
малого наклона к пороку.
Изменяется удлинением, или градусом
высоты пластинки. Выводится
закон, выражающий зависимость
градуса высоты, по высоте пластинки
9. Отличается со такой-же пластин-
кой, но в направлении порока,
сторона которой расположена
нормально к пороку. Закон
такой-же.

10. Давление на одной стороне
когда она находится в том же, распо-
ложении к пороку, одно
за другим $\rightarrow \alpha \rightarrow \infty \rightarrow \infty$

Рис. 811

Замечу, что опыты с малопродолговатыми телами можно производить при одной или двух различных скоростях потока, потому что коэффициенты сопротивления малопродолговатых тел почти не зависят от скорости потока, лишь бы не была она меньше 1,2 м в сек.

Для того, чтобы показать опыт значительному числу лиц, интересно следующее его расположение (черт. 12): *A* есть испытываемая форма, малое сопротивление которой мы хотим наглядно показать публике; *B* — ящик с водою, описанный ранее (черт. 2); *D* — точка опоры рычага *BC*; *C* — пластинка, давление воздуха на которую стремится перетянуть форму *A*.

Вставив, например, пластинку, площадь которой составляет $\frac{1}{10}$ площади поперечного сечения, и приведя в действие воздуходувку (черт. 1) с крепко завинченным нажимом, увидим, что при постепенном увеличении скорости воздушного потока наступает момент равновесия, а затем и перетягивание пластинки. Отсюда выводим, что коэффициент сопротивления уменьшается с увеличением скорости потока, а в момент равновесия выражается числом $\frac{1}{10}$. Пробный опыт такого рода я уже производил.

12 октября 1897 г. Калуга,
Георгиевская ул., дом Сперанской

ДАВЛЕНИЕ ВОЗДУХА НА ПОВЕРХНОСТИ, ВВЕДЕННОЙ В ИСКУССТВЕННЫЙ ВОЗДУШНЫЙ ПОТОК*

ДЛЯ СПРАВОК ПРИ ЧТЕНИИ СТАТЬИ

Скорость вращения лопастей воздуходувки пропорциональна квадратному корню из величины груза (5 и 6)**.

Отклонение стрелки на 1 мм соответствует силе в 1/80 гр (около 12 дин). Сопротивление тела выражается в миллиметрах уклонения стрелки, т. е. в восьмидесятих долях грамма (24).

Показание стрелки, при начале каждого опыта, проверяется грузом (23 и 24).

Опыты по определению сопротивления производились при плотности воздуха, близкой к 0,0012 от плотности воды.

Сопротивление столбиков, перекладин и лент постоянно проверялось; большей частью оно было равно (25):

Груз = 1/2	1	2	4	8	16 ф.
Сопротивление =	3	6	11,5	21,5	42 82 мм

В статье приводятся сопротивления за вычетом сопротивлений стоек и прочего. Сопротивление одной и той же нормально расположенной пластинки пропорционально величине груза (26, 27 и 28).

Величина давления на 1 см², при разных грузах, равна:

Груз = 1/2	1	2	4	8	16 ф.
Давление = 0,325	0,65	1,3	2,6	5,2	10,4 мм.

Сила давления на 80 см² = 26, 52, 104, 208, 416, 832 (см. 38) мм.

Скорость потока пропорциональна квадратному корню из величины груза (29).

Отношение скоростей при разных грузах выражается числами (30):

1	1,4	2	2,8	4	5,7.
---	-----	---	-----	---	------

Абсолютные скорости (в метрах в секунду) при тех же грузах равны (35):

1/2	1	2	4	8	16 ф.
0,756	1,069	1,512	2,138	3,024	4,276 м/сек.

* Впервые напечатано в журнале «Вестник опытной физики и элементарной математики» в 1899 г.

** Числа в скобках обозначают ссылки на соответствующие номера в тексте.—
Ред.

Проекцией данного тела я называю в этой статье величину тени от тела на плоскость, перпендикулярную к направлению потока, предполагая, что параллельные лучи света идут по направлению ветра. Короче — это есть площадь проекции тела на плоскость, нормальную к потоку (102).

Сопrotивление проекции есть сила давления ветра на пластинку, перпендикулярную к направлению потока и имеющую площадь, равную площади проекции.

Коэффициент сопротивления — термин, часто употребляемый мною. Это есть отношение сопротивления тела к сопротивлению проекции при одной и той же скорости ветра. Он показывает, какую часть сопротивления проекции (проекция иногда есть площадь наибольшего поперечного сечения тела) составляет сопротивление тела, при одной и той же скорости движения. Утилизацией формы, или полезностью формы, я называю обратное отношение, т. е. отношение сопротивления проекции к сопротивлению тела при одной и той же скорости ветра. Она показывает, во сколько раз уменьшается сопротивление тела, благодаря его форме, сравнительно с сопротивлением проекции при одной и той же скорости движения. Утилизация формы обыкновенно больше единицы, коэффициент же сопротивления — наоборот — меньше единицы. Однако бывает и обратно.

На основании закона относительности движения, решительно все равно: движется ли тело в неподвижном воздухе или воздух движется навстречу неподвижному телу. Сопротивления тела в обоих случаях должны быть строго равны, при одинаковых условиях движения.

Коэффициент трения плоскости о воздух есть отношение абсолютной силы трения одной стороны трущейся поверхности к сопротивлению той же поверхности при движении ее в воздухе, с той же скоростью, по направлению нормали к ней.

Продолговатость есть отношение длины тела к среднему диаметру его наибольшего поперечного сечения (или к ширине).

Продолговатые кривые поверхности я устраивал чрезвычайно легкие — из бумаги. Если мне нужно было устроить форму в виде поверхности вращения, то я сначала тщательно вычерчивал кривую главного продольного сечения формы. По этой кривой вытачивалась на токарном станке, из дерева, половинка формы — до наибольшего поперечного сечения ее. Эту половинку я облеплял полосками мокрой бумаги и завертывал (забинтовывал) все крепко широкой тесьмой (пеленал, как ребенка). Дав хорошенько просохнуть бумаге, я свертывал тесьму и снимал осторожно бумагу, которая прекрасно принимала выпуклый вид элементов поверхности деревянной болванки. Тогда оставалось только склеить кусочки бумаги на самой форме. После снятия бумажной оболочки, широкое ее отверстие снабжалось бумажным обручем (из рисовальной бумаги). Так же готовилась и другая половина формы, иногда неравная и несходная с первой. В случае необходимости обе половины слегка склеивались.

Воздуходувка состояла из деревянной клетки, свинченной гайками. Внутри боковые стенки были обиты картоном, а кривая поверхность была устроена из белой жести. Ось и спицы крылатки — металлические, лопатки ее — из тонкого картона. Воздуходувку я не взвешивал, но думаю, что она весит не более 50 фунтов.

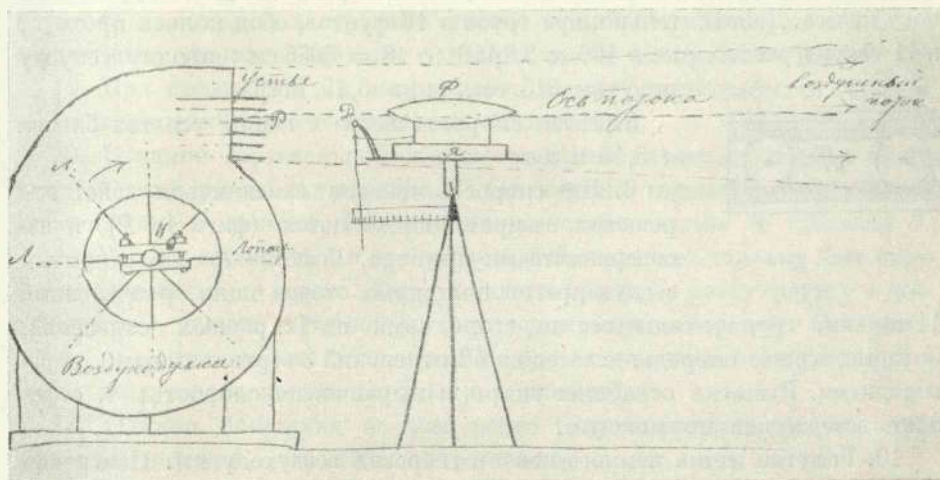
Большую часть форм для испытания их сопротивления я клеил из толстой рисовальной бумаги.

I

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА И ПРОИЗВОДСТВА ОПЫТОВ¹²

1. Искусственный воздушный поток производится посредством прибора, подобного веялке (фиг. 1).

2. *PB* — лопастная воздуходувка. Высота ее около 150 см, ширина — 45 см. Лопастей *L* приводятся во вращение посредством грузов, от $\frac{1}{2}$ фунта до 16 фунтов. Диаметр лопастного колеса, состоящего из 12 лопастей, равен 100 см. Груз действовал так: бечевка наматывалась на вал *B*, посредством неизображенной тут рукоятки и перекидывалась через неподвижный блок *B_n*, ввинченный в потолок, и привязывалась



Фиг. 1

к крючку, вбитому в потолок рядом с неподвижным блоком. К подвижному блоку *B_n* на 2 крюка навешивались разные грузы. Был еще добавочный грузик (в $\frac{1}{2}$ фунта — не более), который, противодействуя трению и уничтожая его при малых грузах, делал вращение более соответствующим силе главных грузов, о которых я только и буду упоминать.

3. К грузу *Г* привешивалась еще бечевка, касавшаяся всегда пола, ради того, чтобы её тяжесть в приборе производила постоянное действие.

4. Бечевка могла наматываться на вале не более 18 раз, а время наблюдения воздушного потока и производимых им давлений было не менее 11 секунд (при грузе в 16 фунтов).

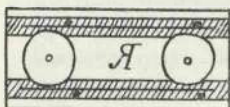
5. При добавочном грузе, наблюдая времена полного разматывания бечевки, увидим, что времена эти — почти строго — обратно пропорциональны корням квадратным из веса грузов. Так, наблюдая время

разматывания бечевки при грузе в $1\frac{1}{2}$ фунта, получим 62 секунды, т. е. время это, сравнительно с наименьшим (см. 4), увеличилось в $\frac{62}{11} = 5,64$ раза, тогда как, по закону обратной пропорциональности корню квадратному из веса груза, получим

$$\sqrt{16 : \frac{1}{2}} = \sqrt{32} = 5,66.$$

6. Отсюда можно заключить, что скорость воздушного потока пропорциональна квадратному корню из величины главного груза.

7. О максимальной же величине ее можно судить по диаметру лопастного колеса. Действительно, при грузе в 16 фунтов, обод колеса проходит в 11 секунд расстояние в $100 \times 3,1416 \times 18 = 5655$ см.; в одну секунду получим 515 см., или 5,15 метра.



Фиг. 2

8. Итак, скорость ветра в наших опытах близка к 5,15 м/сек.

9. Эта скорость должна замедлиться действием решетки, выправляющей поток (фиг. 1, *P*), и несовершенствами прибора. Решетка *P* есть открытый с двух противоположных сторон ящик, разделенный 11 тонкими горизонтальными перегородками на 12 равных отделений, которые, в свою очередь, делятся на 48 отделений 3 вертикальными перегородками. Решетка ослабляет вихри и выравнивает скорость, т. е. делает ветер менее порывистым.

10. Решетка лишь немного менее отверстия воздуходувки. Измерения решетки: в высоту и ширину—около 35 см, а по направлению потока—25 см.

11. Испытываемая форма *Ф* устанавливается на столбиках, прикрепленных к открытому жестяному ящику. Ящик же этот плавает в другом ящике *Я* с налитой в нем водою.

12. Этот последний *Я* закрывается составной крышкой с прорезами для свободного движения 4 столбиков с установленной на них формой *Ф*.

13. Между столбиками (фиг. 2), вдоль потока, прикреплены к ним две параллельные жестяные ленты; между ними, на крышке свободно вертятся на вертикально поставленных иголках два горизонтальных легких кружка. Диаметр их только чуть меньше расстояния между жестяными лентами. Назначение кружков—обеспечить свободное движение столбиков без трения о края прорезов. Когда движется форма, одна из лент чуть нажимает на колеса и катится по ним почти без трения.

14. Длина, ширина и высота наружного ящика в см: 30, 15 и 4. То же—внутреннего: 20, 10 и $2\frac{1}{2}$ см.

15. Ясно, что плавающий ящик может поднять, считая и его вес, до 500 г, т. е. более фунта.

16. Чувствительность этого прибора, даже нагруженного тяжелой формой, более чем достаточна; именно, плавающий ящик приходит в движение уже от горизонтальной силы в 1 миллиграмм (около одной дин). Надо только налить достаточно воды и устранить приставшие ко дну плавающего ящика пузыри воздуха.

17. Для этого нужно прижать ящик ко дну и немного потереть о него. Сделав это, мы, однако, не застрахуем себя навсегда от пузырей, потому что от согревания воды и других причин эти газовые пузыри постоянно выделяются и покрывают стенки сосудов. Пузыри воздуха уменьшают подвижность ящика, и потому время от времени следует устранять их, как указано.

18. Ящик A устанавливается горизонтально на столике T так, чтобы форма Φ находилась в середине потока и чтобы направление движения внутреннего ящика совпадало с направлением воздушного потока.

19. Под столиком T , в направлении потока, располагается горизонтальная линейка, разделенная на миллиметры.

20. В одной вертикальной плоскости с нею качается, подобно маятнику, легкий рычаг или стрелка C . Ось стрелки горизонтальна и неподвижна, как и линейка. Все это составляет одно целое со столиком T .

21. Весьма подвижный и легкий рычаг P соединяет стрелку C со столбиками плавающего ящика. Так что, когда приведем воздуходувку в действие, ветер, вместе с формой, заставит двигаться и стрелку. Она уклоняется от вертикального положения вправо и покажет величину силы давления воздушного потока на форму и столбики.

22. Однако показания ее тем менее будут пропорциональны силе давления воздуха, чем сильнее уклонение.

23. В этом мы легко убедимся, если заставим уклоняться стрелку не давлением воздуха, а силою веса груза. Для этого посредством легчайшего бумажного блока изменяем отвесную силу тяжести в горизонтальную. Один конец тончайшей нитки прицепляется к столбикам. Нить перекидывается через блок и к другому концу ее привешивается бумажная корзиночка. В нее мы кладем грузы, начиная с дециграмма. Сначала показания стрелки будут почти пропорциональны грузу, но затем стрелка показывает меньше, чем следует.

24. Я искривил стрелку, как показано на чертеже (фиг. 1), и достиг полной пропорциональности показаний. Мой прибор был устроен так, что отклонение стрелки C на 1 мм соответствовало силе в $\frac{1}{80}$ грамма (около 12 дин).

25. Сила давления (при шести разных грузах) на столбики, перекидывающие стрелку C и жестяные ленты выражается в мм следующей таблицей:

$\frac{1}{2}$	1	2	4	8	16 фунтов
3	6	11,5	21,5	42	82 мм

26. Эти сопротивления всегда нужно вычитать из сопротивлений испытуемых форм.

27. Для определения скорости потока укрепляем нормально к потоку на двух диагонально расположенных столбиках две почти квадратные пластинки с общей площадью в 14 см². Сила давления на них, за вычетом сопротивления столбиков (25), при тех же грузах, последовательно будет:

4,5 9 18 36,5 73 145 мм

28. Отсюда видим, что давление на пластинку пропорционально величине груза, что и понятно.

29. А так как известно, что давление на пластинку пропорционально квадрату скорости потока, или — скорость потока пропорциональна квадратному корню из давления на пластинку, то можем еще сказать, что эта скорость пропорциональна квадратному корню из величины груза G .

30. Таким образом, отношение скоростей потока для разных грузов последовательно будет:

1 $\sqrt{2}$ 2 $2 \cdot \sqrt{2}$ 4 $4\sqrt{2}$,

т. е. наивысшая скорость, при грузе в 16 фунтов, в 5,66 раза больше наименьшей скорости, при грузе в $\frac{1}{2}$ фунта.

31. Давление на нормальную к потоку пластинку не зависит, как показывают опыт и теория, от плотности окружающего воздуха (если груз остается тот же). Действительно, когда уменьшается плотность воздуха, увеличивается скорость потока и уменьшенное давление восстанавливается.

32. Итак, при всех показаниях барометра и термометра, ряд 27 должен остаться неизменным.

33. Однако абсолютная скорость потока изменяется, а вместе с тем изменяется и сопротивление продолговатых форм, где значительную роль играет трение воздуха.

34. Зная силу давления (24) на пластинку, легко вычислим и соответствующую скорость потока. Для этого в основание примем формулу Кальете и Колардо $0,071 \cdot V^2$, которая выражает в кг силу давления ветра на 1 м² пластинки при скорости V потока в метрах в секунду. Предполагается давление атмосферы в 1 кг на 1 см² и температура в 10°Ц, или постоянная плотность воздуха в 0,0012 от плотности воды.

35. По этой формуле получаем следующие скорости:

0,756 1,069 1,512 2,138 3,024 4,276 м/сек.

Следовательно, эти скорости лишь на $\frac{1}{5}$ меньше скорости на ободу лопастного колеса в воздуходувке (7).

36. Наш воздушный поток имеет ограниченную площадь поперечного сечения, именно около 1200 см^2 , значит больше, чем в аппарате Максима*. Чем обширнее сравнительно с моделью воздушный поток, тем ближе должна быть сила давления к теоретической.

37. Однако опыты для пластинок до 80 см^2 , даже до 100 см^2 , не обнаружили тут явственно выраженной разницы. На этом основании можем считать наш поток совершенно достаточным (как бы безграничным) для форм, площадь поперечного сечения которых не превышает 80 см^2 .

38. Ввиду того, что мы часто будем иметь дело с такой площадью, даем тут давление на пластинку в 80 см^2 , при разных скоростях потока (см. 35). Давление на 1 см^2 будет: 0,325, 0,65, 1,3, 2,6, 5,2, 10,4 (в мм).

II

СИЛА ДАВЛЕНИЯ НА ПЛОСКУЮ ПЛАСТИНКУ, НОРМАЛЬНУЮ К ПОТОКУ

39. Скорости потока, данные нами в (35), основаны были на опытах Кальете и Колардо. Мы приняли их опыты, потому, что они определяли давление на пластинку при прямолинейном ее движении, тогда как другие ученые определяли это давление при движении ее по окружности (на коловратных машинах). При движении же круговое давление будет тем более, чем менее радиус круга.

40. Насколько различны полученные разными учеными результаты относительно сопротивления, это можно видеть из следующих чисел, определяющих в килограммах силу давления ветра, движущегося со скоростью 1 м в секунду, на 1 м^2 нормально расположенной пластинки (при условии 34).

41. По Гупилю и Марсю: 0,130.

42. По международной шкале для силы ветра: 0,123.

43. По Пиоберу, Морену, Ренару и Ланглю: около 0,085.

44. По Кальете и Колардо: 0,071.

45. Теоретически Понселе получено выражение $\frac{d}{2g}$, где d есть вес единицы объема воздуха, а g — ускорение силы земного тяготения; по этой формуле вычисляем для метрической атмосферы (735,5 мм) и 10° Ц величину, равную 0,0612.

46. К этой теоретической величине наиболее подходят опыты Кальете и Колардо (0,072). Их коэффициент только на $\frac{1}{16}$ более коэффициента Понселе.

47. На нашем приборе неудобно определить непосредственно скорость

* Hiram Maxim. Natural and artificial flight. The Aeronautical Annual, 1896, Boston.

воздушного потока, но легко определить давление на пластинку, по которому мы, в связи с опытами Кальете и Колардо, и определили скорость. О вероятности полученного результата можно, однако, догадываться (35).

III

СИЛА ДАВЛЕНИЯ НА НАКЛОННУЮ ПЛОСКУЮ ПЛАСТИНКУ

48. Сила давления воздушного потока на пластинки, расположенные к его направлению под разными углами, также определялась разными учеными, путем теории и опыта, но и тут получилось не менее разногласия (41, 44, 45).

49. Обозначая через P_1 давление ветра на пластинку, расположенную нормально к потоку, а через P давление на ту же пластинку, но расположенную под углом i к направлению потока, получим:

50. По Ньютону $\frac{P}{P_1} = \sin^2 i$. Грубая неверность этой формулы теперь вполне выяснена на опытах и в теории.

51. По Ф. Р. Лесслю $\frac{P}{P_1} = \sin i^*$.

52. По теории лорда Рейля**:

$$\frac{P}{P_1} = \frac{(4 + \pi) \sin i}{4 + \pi \sin i}.$$

53. По опытам Ланглей*** на коловратных машинах:

$$\frac{P}{P_1} = \frac{2 \sin i}{1 + \sin^2 i}.$$

54. Я делал опыты с наклонной квадратной пластинкой площадью в 100 см².

Сначала я определил ряд горизонтальных сил давления при последовательном поворачивании пластинки вокруг горизонтальной оси на 5°. Поворачивание начиналось с нормального (к потоку) положения пластинки и продолжалось до угла наклона в 45°.

55. Далее положение столика (фиг. 1) и ящика изменялось на перпендикулярное; пластинка располагалась по направлению воздушного потока и поворачивалась вокруг вертикальной оси. За нулевое направление

* Все новейшие авторы по вопросам сопротивления согласны в том, что давление, при острых углах, пропорционально синусу угла наклона пластинки. К тому же пришли путем опыта Дюшмен (D u c h m i n. Recherches Experimentales sur les lois de la resistance des fluides. Paris, 1842) и Лилиенталь, недавно погибший. (O t t o L i l i e n t h a l. Der Vogelflug als Grundlage der Fliege-Kunst. Berlin, 1880).

** Lord R e y l e i g h. On the Resistance of Fluids. Philosophical Magazine, vol. II, 1876.

*** L a n g l e y. Experiment in Aerodynamics. 1891.

пластинки принималось то, при котором воздушный поток не производил давления на пластинку и не отклонял стрелку динамометра (фиг. 1).

56. Соединяя два ряда (54 и 55) наблюдений в одно, устраняя влияние стоек в опыте 55, отсчитывая углы от направления воздушного потока и делая, кроме того, перевод полученных сил давления на силы, перпендикулярные к поверхности пластинки, получим, при скорости воздушного потока, близкой к $1\frac{1}{2}$ м/сек (груз в 2 фунта), следующую таблицу:

Углы	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
Сила давления	0	18	37	56	81	105	123	135
Углы		40°	45°	50°	55°	60°	65°	
Сила давления		140	143	144	143,5	142	139	
Углы			70°	75°	80°	85°	90°	
Сила давления			136	134	133	132	132	

57. Эти нормальные к пластинке силы давления получены из наблюдаемых в опытах (54) через деление их на косинус угла отклонения пластинки от направления потока (см. углы таблицы) и из наблюдаемых в опыте (55) через деление их (сил давления) на синус угла отклонения¹³.

58. Из таблицы видно, что сначала (при углах от нуля до 15°) давление возрастает почти строго пропорционально углу отклонения; затем несколько быстрее (до угла в 20°); далее медленнее, достигая максимума при наклонении к воздушному потоку в 50°.

59. При этом положении, нормальная к пластинке сила давления на 12 мм больше, чем при угле между пластинкой и потоком в 90°. Вообще, между углами в 35 и 85° она больше силы давления при нормальном расположении пластинки к потоку.

60. Ни одна из формул, приведенных ранее (50—53), не дает нам указания на это обстоятельство. Все они показывают только, что сила давления, возрастая сначала пропорционально синусу угла отклонения пластинки от потока, далее *возрастает* менее быстро, но все-таки непрерывно, до угла в 90°.

61. Даем тут для сравнения отношения $\frac{P}{P_1}$ для разных углов, по формулам 51, 52, 53 и по моим опытам.

	5°	20°	35°	50°	60°	90°
По Лесслю	0,087	0,342	0,574	0,766	0,866	1
По Релею	0,145	0,470	0,708	0,819	0,920	1
По Ланглюю	0,166	0,612	0,864	0,984	0,990	1
По моим опытам	0,137	0,614	1,023	1,091	1,076	1

62. Из таблицы видно, что при малых углах результаты моих опытов дают числа несколько меньшие, чем числа Ланглей и Релея; далее, они ближе всего к опытам Ланглей и больше всего отличаются от чисел Лессля.

63. Опыты при разных грузах с одинаково наклоненными пластинками показали, что сила давления пропорциональна весу груза или квадрату скорости потока.

IV

СИЛА ДАВЛЕНИЯ НА ПРОДОЛГОВАТую НАКЛОННУЮ ПЛОСКУЮ ПЛАСТИНКУ

64. Ни одна из приведенных формул не указывает влияния продолговатости пластинки на величины сил давления.

В самом деле, если пластинка перпендикулярна к направлению воздушного потока, то сила давления почти не зависит от ее удлинения, а зависит только от величины ее площади. Если же она наклонена к ветру, то продолговатость имеет большое влияние на величину силы давления*.

67. Я произвел ряд опытов с прямоугольными пластинками шириною в 4 см, а длиною последовательно в 4, 8, 12, 16, 20, 24 и 32 см. Я располагал их то вдоль потока, то поперек под одним и тем же острым углом градусов в 20.

68. Привожу тут данные при одной только скорости ветра около 3 м/сек, потому что явление 63 и тут наблюдается.

При расположении поперек (длинное ребро прямоугольника перпендикулярно к направлению потока) имеем:

Длина	4	8	12	16	20	24 см
Сила давления	22	43	64	90	110	136 мм

Отсюда видно, что в случае поперечного расположения пластинки давление почти пропорционально ее площади.

69. Однако, при остром угле наклона к ветру, явственно обнаруживается увеличение давления, приходящегося на единицу площади. При скорости в 3 м/сек. и при угле наклона градусов в 12 получим:

Длина	4	8	12	16	20	24 см
Сила давления	6	14,5	25	38	47,5	59,5 мм

На каждые 16 см² пластинки последовательно приходится следующая сила давления: 6, 7,3, 8,3, 9,5, 9,9, т. е. давление, приходящееся на единицу площади, непрерывно возрастает, увеличиваясь в данном примере чуть не в 2 раза.

* A m a n s. Sur un appareil destiné à mesurer la force propulsive de diverses paletts. L'Aéronaute, 1890.

Этот труд указывает, что продолговатость наклонной пластинки, расположенной перпендикулярно к потоку, увеличивает силу давления на нее ветра. Формулы, однако, не дается. На то же указывают и опыты Ланглей.

70. В случае продольного расположения, хотя и под углом в 20° , также явственно обнаруживается непропорциональность силы давления величине поверхности пластинки. Так, при скорости в 3 м/сек. опыт дает:

Длина	4	8	12	16	20	24	32 см
Сила давления	22	33	42	53	62	73	85 мм

Значит, когда длина пластинки увеличивается вдвое, сила давления увеличивается лишь раза в полтора.

71. В трех приведенных таблицах даны силы давления на пластинки и по направлению воздушного потока. Чтобы получить силы давления, перпендикулярные к пластинкам, надо данные силы разделить на синус угла наклона пластинок к ветру.

V

ОПЫТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТРЕНИЯ

72. Желая выяснить законы трения воздуха о поверхности твердых тел, я произвел опыт с тремя круговыми цилиндрическими поверхностями, имеющими одну и ту же окружность в 32,5 см и один и тот же диаметр в 10,3 см; но длина цилиндров была разная; именно в 12,5, 25 и 50 см.

73. Располагались они по направлению потока (образующая была параллельна ему), чего достигал я, поднимая или опуская один край цилиндра или поворачивая его в бок до тех пор, пока стрелка динамометра (1, с), при действии одного и того же ветра, не показывала наименьшую силу сопротивления.

Цилиндры эти, конечно, открытые (без оснований), и воздух свободно скользил сквозь них.

74. Предупреждаю, что для простоты выводов, все опыты я производжу при плотности воздуха, близкой к 0,0012 от плотности воды (см. 34).

75. Производя с цилиндрами опыты при работе грузов от $\frac{1}{2}$ до 16 фунтов и вычитая сопротивление стоек, получим:

Площадь поверхности	Длина	$\frac{1}{4}$	1	2	4	8	16
813	12,5	4	7	12 12	21,5	36	60
1625	25	6	11	19	32,5	56	94
3250	50	9	16	29	50	87	160

Заметим, что площадь поверхности цилиндров мы удваивали потому, что подвергается трению как наружная их часть, так и внутренняя. Сопротивление выражено, как обыкновенно, в миллиметрах (1 мм соответствует $\frac{1}{80}$ грамма).

76. Рассматривая предложенную таблицу, замечаем следующие, довольно ясно выраженные законы трения:

77. Величина трения не пропорциональна квадрату скорости; но когда скорость увеличивается вдвое, трение увеличивается только в три (в среднем в 3,04) раза; или когда скорость увеличивается в 1,41 раза, то сопротивление, в среднем, увеличивается в 1,7434 раза; отклонения сравнительно незначительны и притом то в ту, то в другую сторону.

78. Величина трения не пропорциональна длине цилиндра. В среднем, когда поверхность и длина цилиндра увеличиваются вдвое, трение увеличивается в 1,546 раза.

79. Итак, величина силы трения T , для цилиндров одного и того же принятого нами диаметра (около 10 см), выразится формулой

$$T = A \cdot v^a l^b,$$

где v — скорость ветра в м/сек, l — длина цилиндра, а прочие величины — постоянные.

80. В частном случае имеем: $T_1 = Av^a \cdot l_1^b$ и $T_2 = Av^a \cdot l_2^b$; отсюда получим

$$81. \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^b, \quad \text{или} \quad b = \log\left(\frac{T_2}{T_1}\right) : \log\left(\frac{l_2}{l_1}\right).$$

83. Но мы заметили, что когда отношение длин равно $2\left(\frac{l_2}{l_1} = 2\right)$, то отношение сил трения равно $1,546\left(\frac{T_2}{T_1} = 1,546\right)$, следовательно, $b = \log(1,546) : \log(2) = 0,629$, или около 0,63.

84. Определив b , найдем a . В частном случае, при одной и той же длине цилиндра, имеем

$$T_3 = A \cdot v_2^a \cdot l_3 \quad \text{и} \quad T_4 = A \cdot v_3^a \cdot l_3.$$

85. Отсюда получим

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_2}\right)^a \quad \text{и} \quad a = \log\left(\frac{T_4}{T_3}\right) : \log\left(\frac{v_3}{v_2}\right).$$

86. Но мы видели, что когда скорость увеличивается вдвое $\left(\frac{v_3}{v_2} = 2\right)$, то сила трения увеличивается почти в 3 раза $\left(\frac{T_4}{T_3} = 3,04\right)$. Следовательно, $a = \log(3,04) : \log(2) = 1,604$.

87. Теперь узнаем величину A . Из формулы (79) найдем:

$$A = \frac{T}{v^a l^b} = \frac{T}{v^{1,604} \cdot l^{0,63}}.$$

Вставляя сюда любые соответствующие величины (v , l и T) из таблицы (75), легко вычислим A . Возьмем, например, для величины трения из таблицы (75) число 32,5 (среднее около 32,3), соответствующее скорости в 2,138 м/сек и длине цилиндра в 50 см. Тогда вычислим для A по предыдущей формуле: $A = 1,264$.

88. Итак, опытные результаты таблицы (75), выразим эмпирической формулой

$$T = 1,264 \cdot V^{1,604} \cdot l^{0,63}.$$

89. Применим теперь это уравнение к выводу общей формулы, определяющей силу трения для прямоугольника, длиною в L метров, а шириною в 1 м, движущегося по направлению стороны L со скоростью V м/сек.

Принимая в расчет величину силы трения только одной его стороны, получим

$$\frac{1,264 \times 100}{32,5 \times 2 \times 80 \times 1000} \cdot V^{1,604} \cdot (L \cdot 100)^{0,63}.$$

Эту формулу мы получим из предыдущей, переведя сантиметры в метры и наши мм (условная единица силы сопротивления, равная 1/80 грамма) в килограммы. Так что в этой формуле сила трения выражена в кг, а длина прямоугольника L в м. Произведя в ней вычисления, получим

$$T = 0,0004423 \cdot V^{1,604} \cdot L^{0,63}.$$

90. Чтобы узнать коэффициент трения, или отношение величины силы трения к сопротивлению воздуха при движении той же пластинки с тою же скоростью, только по направлению нормали к ней, употребим формулу Кальете и Колардо (34)

$$F = (1 \times L) \cdot 0,071 \cdot V^2.$$

91. Разделив предыдущую формулу на эту, найдем

$$\frac{T}{F} = 0,00623 \cdot V^{-0,396} \cdot L^{-0,37}.$$

Значит коэффициент трения уменьшается с увеличением скорости и длины L поверхности по направлению движения, и притом — уменьшается почти в одинаковой степени (около 0,4) от той и другой причины¹⁴.

92. Из последней формулы получим и обратное отношение

$$\frac{F}{T} = 160,5 \cdot V^{+0,396} \cdot L^{+0,37},$$

т. е. узнаем, во сколько раз сила трения для прямоугольной пластинки меньше сопротивления воздуха при нормальном движении той же пластинки и с тою же скоростью.

93. Даем здесь таблицу, основанную на формуле 92, которую, для сокращения вычислений, упрощаем так:

$$\frac{F}{T} = 160,5 \cdot V^{0,4} \cdot L^{0,37}.$$

V м/сек	1	2	4	8	10	20	40
1/10 м	68	90	119	157	172	227	299
1	160	212	272	369	403	532	702
10	376	496	655	864	945	1247	1645
100	882	1164	1536	2026	2216	923	3857
200	1139	1503	1983	2616	2861	3775	4981
1000	2068	2728	3600	4750	5194	6853	9043

Разумеется, законы (77) и (78) не проверены опытами в случае очень длинных поверхностей и больших скоростей. Поэтому числа таблицы (93) можно считать несомненно верными только до длины в 50 см и скорости до 5 м/сек. В тех же пределах верна и формула (93). Весьма жалею, что не мог произвести более обширных опытов с поверхностями большей длины и скоростями, большими 5 м/сек. По аналогии с опытами Фруда в воде (см. Dislere. Exposé Sommaire des expériences faites à Amsterdam sur la resistance des carenes. Paris, 1878) надо думать, что показатели формулы (93) постепенно уменьшаются с увеличением L и V .

Коэффициенты трения получим из чисел таблицы, если разделим на них единицу.

94. Например для поверхности, длиною в 10 м, движущейся со скоростью 4 м в сек, коэффициент трения равен $1/655$.

Из таблицы видно, что трением тел, мало-продолговатых в направлении потока, можно смело пренебречь, если притом размер их в направлении потока более $1/10$ м.

Впрочем и трением в наших моделях, не продолговатых в направлении потока, также можно пренебречь, потому что оно составит не более $1/20$ сопротивления от инерции.

Ранее («Вестник опытной физики», № 259) я дал формулу

$$\frac{T}{F} = \frac{1}{58V},$$

определяющую коэффициент трения в предположении, что поверхность, в направлении движения, достаточно обширна («Вестник опытной физики» № 258, стр. 146, подстрочная выноска). Теперь является возможность определить, в какой мере должна, вместе со скоростью, возрастая и поверхность, чтобы соблюдался закон Гагена (см. пред. формулы), а вместе с ним оказались верны и выводы, сделанные нами в статье: «Самостоятельное движение аэростата» («Вестник опытной физики», №№ 258 и 259).

95. Положим:

$$58V = 160 \cdot V^{0,4} \cdot L^{0,37}$$

(на основании предыдущей формулы и 93). Отсюда

$$L = \left(\frac{58}{160}\right)^{2,7} \cdot V^{1,62} = 0,0646 \cdot V^{1,62} \text{ м.}$$

Если длина прямоугольника, в направлении потока, будет возрастать пропорционально $V^{1,62}$, то закон Гагена будет соблюдаться.

Так, для скоростей упомянутой статьи («Вестник опытной физики», № 258, стр. 150), вычислим длину поверхности в метрах

$V =$	1	4	12	20	40 м / сек.
$L =$	0,065	0,610	2773	8285	25,44 м.

Отсюда видно, что даже для очень больших скоростей (например 40 м в секунду или 144 км в 1 час) требуются поверхности не очень длинные, в десятки раз меньшие предлагаемых нами аэростатов. Значит, трение их еще меньше, чем то следует из прежних наших работ.

96. Так, в примере 74 («Вестник опытной физики», № 259) предельная скорость предельного аэростата составляла 328 м в секунду! Следовательно, коэффициент трения, по предыдущим работам, будет $\frac{1}{19024}$; по закону же настоящей статьи (91) он равен $\frac{1}{32800}$; стало быть, трение по новым опытам в полтора раза меньше, в применении к самому смелому нашему расчету, а следовательно, и скорость аэростата будет более вычисленной нами ранее.

Итак, благоприятность наших выводов относительно аэростата несколько не колеблется, страдает лишь точность их и то не очень.

VI

ПРАВИЛЬНЫЕ ПРИЗМЫ И КРУГЛЫЙ ЦИЛИНДР

100. Ось этих тел располагалась перпендикулярно к направлению потока. Длина оси около 10 см.

101. Треугольная призма; сторона треугольника равна 4 см. Замечу, что сила давления на все тела, мало продолговатые в направлении потока, как показал опыт, прямо пропорциональна весу груза или квадрату

скорости ветра. Поэтому силы давления на такие тела будут приводиться только при одном грузе (хотя я производил эти опыты и при разных грузах).

102. Груз 2 ф; одна грань призмы параллельна направлению потока (крыша). Сила давления ветра соответствует 44 мм. Силу давления на пластинку, нормальную к потоку и равную проекции призмы*, вычислим в 45 мм. Следовательно, коэффициент сопротивления лишь чуть меньше единицы.

103. Одна грань перпендикулярна к потоку и обращена к нему. Сила давления равна 58. Сила давления на пластинку равна 53 мм.

104. То же, но острый двухгранный угол поставлен навстречу ветру. Сила давления на призму равна 31,5; сила давления на проекцию равна 53. Сопротивление по сравнению с пластинкой значительно уменьшается; именно в 1,7 раза. Коэффициент сопротивления равен 0,59 (почти, как у цилиндра).

105. Квадратная призма. Сторона основания равна 4 см; грань нормальна к ветру; сила давления на призму равна 54. Силу давления на проекцию вычислим в 53 мм. Так что давление на призму тут почти не отличается от давления на пластинку, равную грани.

106. Та же призма, но расположенная симметрично, углом к ветру. Сила давления на призму равна 58; сила давления на проекцию равна 74. Коэффициент сопротивления равен 0,78. Тем не менее призму выгоднее располагать так, чтобы грань была нормальна к ветру, потому что абсолютное сопротивление будет меньше.

107. Шестиугольная призма; сторона основания равна 3 см. Призма расположена углом вперед, т. е. так, что проекция ее и сила давления на проекцию наименьшая и равна 69 мм, сила давления на призму равна 61. Сопротивление уменьшается по сравнению с пластинкой только в 1,13 раза. Коэффициент сопротивления равен 0,89.

108. Проекция наибольшая (две грани призмы нормальны к ветру). Сила давления на проекцию равна 78 мм; сила давления на призму равна 52 мм. Коэффициент сопротивления равен 0,65 (близок к коэффициенту сопротивления цилиндра).

109. Отношение сопротивления наибольшего (когда 2 грани параллельны ветру) к наименьшему (когда 2 грани перпендикулярны ему) равно 1,2, т. е. оно не так значительно.

110. Восьмиугольная правильная призма. Проекция наименьшая; сопротивление уменьшается в $65 : 53 = 1,23$ раза. Проекция наибольшая; сопротивление уменьшается в $69 : 42 \frac{1}{2} = 1,62$ раза. Коэффициенты со-

* Имеется в виду проекция на плоскость, нормальную к направлению потока (Ред).

противлений: 0,82 и 0,61. Отношение наибольшего сопротивления к наименьшему = $53 : 42\frac{1}{2} = 1,24$.

111. *Прямой круглый цилиндр*. Длина оси 10 см (такая же, как и у призмы); диаметр основания 5 см. Сопротивление строго пропорционально квадрату скорости. При грузе в 2 ф. сопротивление цилиндра равно 41 мм. Сопротивление проекции равно 65 мм. Сопротивление уменьшается в 1,59 раза. Коэффициент сопротивления равен 0,63. Странно, что сопротивление цилиндра, при одной и той же проекции, оказывается несколько больше сопротивления восьмиугольной призмы — угловатого тела. Не играет ли тут роль передний угол, рассекающий воздух?

112. Некоторые ученые применяют формулы (50) — (53) к теоретическому определению силы давления на тела многогранные и другой формы. Так, применяя формулу Лесли (51), которая дает силы давления чуть не вдвое меньшие истинных, определяют коэффициент сопротивления цилиндра в 0,785, что грубо противоречит опыту. Если же взять в основание более верную формулу Ланглейя (53), то ошибка получится еще больше. Между тем как неверная формула Ньютона дает меньшую ошибку. Отсюда видна невозможность применять формулы (50) — (53) к вычислению сил давления на кривые или многоугольные поверхности.

113. Впрочем мы уже показали на опыте, что эти формулы не годятся даже для плоских пластинок, если они продолговаты и наклонены к потоку под острым углом (см. 64—70).

VII

ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ ПРЯМЫЕ ЦИЛИНДРЫ

114. Я делал опыты с четырьмя эллиптическими цилиндрами; большая ось эллипса располагалась под разными углами к направлению потока. При грузе в 2 фунта мною получена следующая таблица:

Ось эллипса		Отношение осей	Наклонение большой оси к направлению потока			
большая	малая		0°	30°	60°	90°
70	56 мм	1,26	40	45	56,5	60
68	49	1,39	33,5	43	55	62
65	43	1,51	28	37	54	62
62	31,4	1,98	17,5	34	55	65

Длина (высота) всех цилиндров равна 10 см.

115. Возьмем пока в расчет главные положения цилиндров (0 и 90°). Цилиндр, большая ось которого направлена по ветру, можно рассмат-

ривать как такой, продолговатость которого больше единицы. Наоборот, если малая ось совпадает с направлением потока, тот же цилиндр будет иметь продолговатость меньшую единицы. Круглый цилиндр будет иметь продолговатость равную единице. Таким образом, считая и круглый цилиндр (111), получим 9 наблюдений над сопротивлением эллиптических цилиндров разной продолговатости.

116. Итак, из таблицы 114, вычислим:

1,98	1,51	1,39	1,25	1,00	0,80	0,72	0,66	0,51
2,34	2,00	1,9	1,83	1,59	1,52	1,42	1,37	1,25

Первая строка указывает на продолговатость цилиндра (отношение длины оси по направлению потока к длине оси, перпендикулярной к потоку); вторая — во сколько раз уменьшается сопротивление сравнительно с сопротивлением проекции цилиндра (утилизация формы).

117. Затем был проведен опыт с цилиндром, основание которого имело форму рыбы; передняя часть имела форму эллипса, задняя оканчивалась острым углом; форма — весьма плавная. Длина основания 18 см, наибольшая ширина 5,8 см. Значит, продолговатость равнялась 3,1.

118. Опыт был проведен при трех грузах: в 2, 4 и 8 фунтов, причем цилиндр один раз обращался эллиптическим конном к ветру, другой раз, наоборот, острым углом против ветра. Получены следующие сопротивления в мм:

	2	4	8	16 ф.
Цилиндр поставлен тупым концом против ветра . . .	24	42	75	135 мм
Цилиндр поставлен острым концом против ветра . . .	26,5	52	104 мм	—

Отсюда видно, что сопротивление при ветре, набегающем на закругленный конец, значительно меньше, чем при ветре, набегающем на острый. Кроме того, сопротивление в первом случае возрастает не так быстро, как груз (или квадрат скорости потока), между тем как во втором случае оно пропорционально грузу. Наименьший коэффициент сопротивления цилиндра, поставленного круглым концом против ветра, равен 0,224; наибольший — 0,316. Для цилиндра, поставленного острым концом против ветра, коэффициент сопротивления один: 0,342. Сопротивление уменьшается в 4,47; 3,14 и 2,92 раза (утилизация формы).

VIII

ПРАВИЛЬНЫЕ МНОГОГРАННИКИ И ШАР

119. *Тетраэдр* (правильный четырехгранник); длина ребра равна 10 см; сопротивление пропорционально весу груза. Поэтому привожу сопротивление только при грузе в 2 фунта.

120. Одна грань параллельна потоку; двухгранный угол симметрично режет воздух; сопротивление соответствует 31 мм. Двугранный угол симметрично режет воздух и ребро его нормально к потоку; сопротивление равно 43. Одна грань нормальна к потоку и трехгранный угол режет воздух; сопротивление равно 25, коэффициент сопротивления равен 0,442. Грань перпендикулярна и обращена к ветру; сопротивление равно 61, коэффициент сопротивления равен 1,08. Очевидно задняя пирамидка только увеличивает сопротивление треугольника. Наименьший коэффициент сопротивления тетраэдра, как увидим, лишь немного отличается от коэффициента сопротивления шара.

121. *Октаэдр* (правильный восьмигранник). Длина ребра равна 6 см; ось, проходящая через вершины углов, нормальна к потоку.

а) Четырехгранный угол режет воздух; сопротивление октаэдра равно 30,5; сопротивление проекции равно 47; коэффициент сопротивления равен 0,65;

б) Ребро нормально к потоку и режет воздух; сопротивление равно 25, т. е. меньше предыдущего в 1,22 раза; коэффициент сопротивления равен 0,61.

122. *Куб*. Длина ребра равна 8 см.

а) Одна из граней нормальна к потоку; сопротивление куба равно 64, сопротивление проекции — 84 мм. Коэффициент сопротивления равен 0,76, т. е. сопротивление куба меньше в 1,3 раза сопротивления пластинки, перпендикулярной к потоку и имеющей размеры проекции куба. По Дюбуа и Дюшмену, такое же отношение, но для воды, колеблется между 1,22 и 1,27.

б) Две грани параллельны потоку, а прочие одинаково наклонены к нему; прямой двугранный угол режет воздух. Сопротивление равно 84. Сравнительно с силой давления на проекцию оно выражается числом 0,71.

123. *Икосаэдр* правильный (округлый многогранник, ограниченный 20 равносторонними треугольниками). Длина ребра несколько более 6 см. Ось, проходящая через вершины противоположных телесных углов, нормальна к направлению ветра. Поворачивание многогранника вокруг этой оси мало изменяет сопротивление многогранника, которое колеблется между 69 и 71. Площадь проекции менее 100 см², сила давления на нее равна 130 мм. Коэффициент сопротивления не менее $59 : 130 = 0,53$.

124. Шар. Площадь большого круга равна 63 см^2 ; сила давления на проекцию шара равна 82 мм. Сопротивление шара (при том же грузе в 2 фунта) равно 35. Коэффициент сопротивления равен 0,43.

125. Поморцев, принимая в основание наиболее верную формулу Лангеля (53), вычисляет аналитическим путем коэффициент сопротивления шара в 0,86. Отсюда опять-таки видно, насколько неправильно применение формул для плоской пластинки к определению сопротивлений кривых поверхностей.

Я делал опыты с шаром (по обыкновению) при всех доступных мне скоростях потока и нашел, как и для всех мало продолговатых в направлении потока тел, что их сопротивление пропорционально квадрату скорости ветра. Такие же почти коэффициенты сопротивления я получил и ранее для цилиндра и шара, посредством других опытов, при безграничном потоке воздуха (см. Циолковский, «Железный управляемый аэростат», или «Вестник опытной физики [и элементарной математики]», № 259, стр. 278).

Это согласие указывает на то, что поток наш достаточно обширен для размеров наших моделей.

IX

ПРОДОЛГОВАТЫЕ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ

126. Представим себе тело или поверхность, полученную от вращения дуги круга около ее хорды. Бумажные поверхности такого вида были устроены мною четырех размеров в длину; именно — в 21, 32, 42 и 62 см. Диаметр (фиг. 3) наибольшего поперечного сечения был близок к 10 см, а площадь сечения — к 80 см^2 .

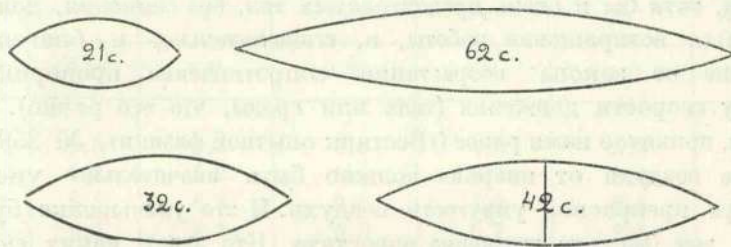
Сопротивления этих тел, расположенных длинной осью (осью вращения) по направлению потока, приведены в следующей таблице:

Груз	$\frac{1}{2}$	1	2	4	8	16 ф.
21	6	12	24	47	79	110
32	5	10	17	31	48,5	80
42	4	8	16	28,5	48,5	89
62	4	8	16	31	55	104

Формы испытывались при разных скоростях. Первый вертикальный столбец содержит длину форм в сантиметрах. Из таблицы видим, что сопротивление форм, с возрастанием удлинения их, уменьшается лишь весьма

незначительно, а начиная со скорости в 2,14 м/сек (груз 4 фунта), оно даже увеличивается с удлинением. Именно, при этой скорости, наименьшее сопротивление оказывается у формы длиною в 42 см. При грузе же в 16 фунтов (скорость 4,28 м/сек), наименьшее сопротивление оказывается у формы длиною в 32 см. Это странное, на первый взгляд, явление отчасти объясняется увеличением поверхности удлиненного тела, а следовательно, и увеличением силы трения его о воздух.

128. Далее мы видим, что только при небольших скоростях (до 2 м/сек — не более) сопротивление тела пропорционально грузу (или квадрату потока); потом же оно возрастает значительно медленнее, что особенно ясно



Фиг. 3

для тел мало продолговатых, где трение, по их незначительной поверхности, сравнительно с инерцией, невелико. Потому-то и нельзя вполне объяснить это явление влиянием трения, возрастающего непропорционально квадрату скорости (88). Явление это поразительно и заслуживает нашего особенного внимания, потому что указывает на перспективы, облегчающие воздухоплавание.

В самом деле, закон, по которому сопротивление тела пропорционально квадрату скорости его движения, множество раз доказывался теоретически (когда не принимали в расчет силу трения) и подтверждался опытными исследованиями (по крайней мере — для тел не продолговатых) — и вот оказывается, что он грубо неверен даже для тела мало продолговатого, трением которого можно пренебречь. Действительно, по таблице 126, для тела длиною в 21 см (а шириною в 10 см), при увеличении груза с 4 фунтов на 16, или при увеличении скорости потока в 2 раза, сопротивление увеличивается не в 4 раза, как бы следовало по общепринятому закону, а только в 2 раза с небольшим!

Как же объяснить это странное на первый взгляд явление?

Из той же таблицы мы видим, что упомянутый закон тем более верно соблюдается, чем скорость движения меньше, и только при скорости от 2 до 4 метров в секунду замечается грубое отклонение от него.

Может быть, когда скорость незначительна, движение распространяется далеко вокруг тела и работа возмущения им воздуха сравнительно

велика. При бóльших же скоростях движения тела, возмущение среды не распространяется далеко — воздух лишь сжимается близ передней половины тела и даже отдает часть полученной им работы сжатия, вновь расширяясь и производя давление на кормовую половину тела. Мне кажется, что часть истраченной телом работы возвращается таким образом телу; и эта часть тем больше, чем быстрее движение тела.

Для тел более продолговатых не замечается это возвращение работы, потому что и при наибольшей употребленной нами скорости (4,3 м) боковое раздвигание воздуха чрезвычайно медленно, возмущение среды распространяется далеко, сгущается (сжимается) она мало и потому почти не возвращает затраченной на нее работы. Но при достаточном увеличении скорости, хотя бы и очень продолговатых тел, без сомнения, должно обнаружиться возвращение работы, а, следовательно, и благоприятное отклонение от закона возрастания сопротивления пропорционально квадрату скорости движения (тела или среды, что все равно).

Итак, принятое нами ранее («Вестник опытной физики», № 259) сопротивление воздуха от инерции должно быть значительно уменьшено, благодаря прекрасной упругости воздуха. И это уменьшение будет тем больше, чем быстрее движение аэростата. Кто знает, каких скоростей, благодаря принципу возвращения энергии, достигнут воздушные корабли в будущем! Во всяком случае они больше тех, которые были даны нами в упомянутой работе!

Если вычислить величину трения для всех тел таблицы 126 (для чего нужно определить особый коэффициент применительно к кривизне тела) и вычесть ее из общего сопротивления этих тел, то получим таблицу, содержащую сопротивления, зависящие исключительно от инерции воздуха и его упругости.

Взяв ряд тел при одной и той же скорости, увидим, что сопротивление от инерции (приблизительно) обратно пропорционально квадрату продолговатости тела.

Таков закон продолговатости, если скорость незначительна (до 2 м/сек). Но рассматривая сопротивление от инерции при скорости 4,2 м/сек, увидим, что закон этот не соблюдается. Как же объяснить эту странность? (см. «Вестник опытной физики», № 259, стр. 277).

Дело в том, что при малых скоростях не имеет места сжатие воздуха и сопряженное с ним возвращение энергии. При скорости же более значительной, боковое сжатие обнаруживается для тупых форм, но не имеет места для острых форм, медленно раздвигающих воздух, почему у последних сопротивление от инерции значительно больше, чем то следует по закону продолговатости тела.

129. В телах удлинённых относительное уменьшение сопротивления, зависящее от упругости среды, не так бросается в глаза, потому что там громадную роль играет трение воздуха; напротив, величина инерции

(раздвигание воздуха) незначительна, вследствие остроты тела. Но для больших тел и скоростей, для которых трение не велико (91), благоприятное уменьшение сопротивления от инерции должно сказаться с полной яркостью.

130. Даем тут еще таблицу, показывающую, во сколько раз уменьшено сопротивление тех же форм (126), сравнительно с силой давления на площадь наибольшего поперечного сечения их (на проекцию). Числа эти можно назвать утилизацией, или полезностью формы. Они обратны коэффициентам сопротивления. Прибавлена строка скоростей, а длина тел заменена продолговатостью, или отношением длины их к ширине.

Грузы	$\frac{1}{2}$	1	2	4	8	16 фунт.
Скорости	0,76	1,07	1,51	2,14	3,01	4,28 м/сек
2,1	4,3	4,3	4,3	4,4	5,3	7,6
3,2	5,2	5,2	6,1	6,7	8,6	10,4
4,2	6,5	6,5	6,5	7,3	8,6	9,4
6,2	6,5	6,5	6,5	6,7	7,6	8,0

131. Отсюда мы видим, что наименьшее сопротивление в наших опытах оказалось у тела с продолговатостью в 3,1 и при наибольшей скорости. Поморцев для той же продолговатости, но для формы идеальной (наименьшее сопротивление) находит, с помощью вариационного исчисления, коэффициент сопротивления равным 0,4; значит, утилизацию формы он находит равной 2,5, что меньше числа, полученного мною из опыта, в 4 раза.

132. Подчеркиваю это обстоятельство, чтобы еще раз показать, насколько не применимы сами по себе довольно верные формулы сопротивления пластинок (52 и 53) к определению сопротивлений криволинейных тел.

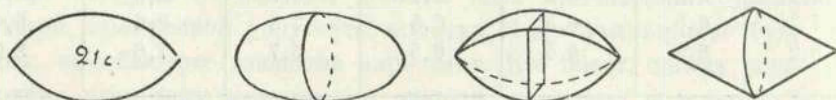
X

СРАВНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕЛ РАЗНОЙ ФОРМЫ, НО (ПРИБЛИЗИТЕЛЬНО) ОДНОЙ И ТОЙ ЖЕ ДЛИНЫ И ПРОДОЛГОВАТОСТИ

133. В следующей таблице приведены сопротивления: а) одного из предыдущих тел (126) длиной в 21 см, б) эллипсоида вращения, в) тела плавного в продольном направлении, но имеющего квадратные поперечные сечения (согнуто из четырех равных пластинок, ограниченных дугами окружности), и г) тела, составленного из двух равных конических поверхностей (фиг. 4).

Груз (фунт.)	1/2	1	2	4	8	16	
а	6	12	24	47	79	110	Уже испытанное тело
б	5,5	11	24	42,5	74	117	Эллипсоид вращения
в	6,5	13	25	47	80	128	Квадратное сечение
г	12	24	47,5	94	185	—	Конусы

134. Сравнивая ранее испытанное тело «а» с эллипсоидом вращения, находим, что сопротивление эллипсоида лишь немного меньше сопротивления тела «а», оканчивающегося с обоих концов маленькими конусами.



Фиг. 4

Мало того, начиная со скорости в 4 м/сек или около того, сопротивление эллипсоида даже больше. Следовательно, для металлического аэростата двойная выгода употреблять формы, оканчивающиеся конусами: в отношении конструкции и в отношении сопротивления.

135. Сопротивление тела «в», с квадратным поперечным сечением, тоже не очень много отличается от сопротивления тел «а» и «б», откуда видно, что углы в поперечном сечении мало увеличивают сопротивление тела.

136. Однако углы продольного сечения (только не на концах) крайне вредно отзываются на сопротивлении тела, как это видно на примере конической поверхности «г». Тут сопротивление в 2—3 раза больше и возрастает почти строго пропорционально весу груза, или квадрату скорости потока (потому что работа инерции здесь много больше работы трения).

XI

ЗНАЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРМЫ

137. Некоторые отрицают значение кормовой части тела в деле его сопротивления ветру. Однако для удлиненных и плавных тел значение кормового придатка громадно. Даем тут результаты опытов, показывающих значение *кормовой части* для различных тел.

138. Для этого, между прочим, я брал известные нам продолговатые тела, разделенные средним поперечным сечением на две равных части. Так, я брал половину эллипсоида вращения и половину тела, полученного от вращения отрезка круга вокруг его хорды. Тела я располагал обыкновенным образом, вдоль потока, но обращал их то острием к ветру, то тупым концом, который я заклеивал бумагой (фиг. 3 и 4).

139.

Г р у з	$\frac{1}{2}$	1	2	4	8 фунт.
Половина эллипсоида; выпуклою стороною обращена к ветру; длина равна 11 см	7,5	14	28	55	106
То же, но обращена тупым концом к ветру	30	60	120	238	—
Половина тела, полученного от вращения дуги; острием обращена к ветру; длина равна 21 см	—	13	26	49	88
То же; тупым концом обращена к ветру	19	40	81	164	—

140. Сравнивая данные во второй горизонтальной строке таблицы с сопротивлением полного эллипсоида (133), видим, что корма у эллипсоида примерно лишь на $\frac{1}{3}$ уменьшает сопротивление.

141. Рассматривая третью строку (139) и сравнивая ее данные с силой давления на плоскую пластинку, видим, что эта сила давления меньше.

142. Сравнивая силы давления, приведенные в третьей строке, с сопротивлением полного тела (126), видим, что у него кормовая часть раза в два уменьшает сопротивление.

143. Наконец, сравнение сопротивлений, приведенных в четвертой строке, с силой давления на плоскую пластинку, равную площади среднего поперечного сечения полного тела, указывает нам, что кормовой придаток такого удлинения уменьшает сопротивление пластинки. Из всего этого видно, что пренебрегать значением кормы отнюдь не следует.

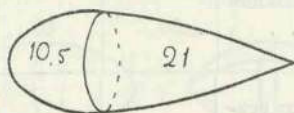
Привожу также опыты, не только интересные сами по себе, но и указывающие еще раз на значение задней части тела. Я взял половину эллипсоида вращения (фиг. 3 и 4) и половину тела (в 42 см длины), полученного от вращения отрезка дуги круга: короче — половинки, взятые

для предыдущего опыта (139). Эти половины я соединял плоскими (и равными) краями так, что получилось тело, несколько напоминающее (только менее продолговатое: вдвое) аэростат Кребса и Ренара (фиг. 5).

144. Величины сопротивлений этого тела, обращенного то эллиптическим концом к ветру, то острым, приведены в следующей таблице.

Вес груза (фунт.)	$\frac{1}{2}$	1	2	4	8	16
Тупым концом к ветру . .	3,5	7	14	25	45	85
Острым концом к ветру .	6	12	24	46	84	134

145. Прежде всего бросается в глаза, что сопротивление при острой корме почти вдвое менее, чем при тупой.



Фиг. 5

146. Сравнивая затем числа 2-й строки с величиной сопротивления половины эллипсоида (139, 2-я строка), видим, что при малой скорости кормовой придаток вдвое уменьшает сопротивление; но чем больше скорость, тем больше его полезное значение.

147. Длина тела (143) равна 32 см; сравнивая его с телом той же длины и продолговатости (см. табл. 126), находим, что сопротивление составного тела несколько меньше, чем простого (126). Однако при скорости в 3—4 м/сек сопротивление более симметричного тела (с коническими концами) уже становится менее значительным.

148. Вывод тот, что аэростат выгоднее строить симметрично, с наибольшим поперечным сечением в середине.

ХII

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛУЦИЛИНДРА, ПОЛУШАРА, КОНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ И АЭРОСТАТА ШВАРЦА

149. Сопротивление последующих тел почти строго пропорционально весу груза (или квадрату скорости), и потому я буду приводить сопротивления лишь при одной скорости, вызываемой грузом в 2 фунта.

150. Сопротивление полуцилиндрического тела, ось которого нормальна к потоку, а выпуклость обращена к ветру, оказалось равным 23. Сила

давления на проекцию равна 34 (площадь проекции равна 32×8). Следовательно, коэффициент сопротивления равен 0,67.

151. При обратном положении цилиндра, сопротивление равно 43, т. е. чуть не вдвое больше. Сила давления на проекцию равна 34. Значит, оно меньше, чем на самый полуцилиндр; коэффициент сопротивления равен 1,26. Сопротивление полного цилиндра с раскрытыми основаниями (сквозная труба), так же как и такого же полуцилиндра, несколько более, чем цилиндра, закрытого с боков.

152. Сопротивление открытого конуса, обращенного острием к ветру, выражается числом 55, а закрытого кругом (основанием) 51. Высота этого конуса, как и испытанного уже двойного (133), равна 10 см; площадь поперечного сечения равна 80 см^2 . Сравнивая это сопротивление с сопротивлением двойного конуса таблицы 133, видим, что последнее, несмотря на кормовой придаток, даже несколько больше сопротивления открытой конической поверхности.

153. Та же коническая поверхность, но обращенная отверстием к ветру, дает при открытом основании сопротивление, равное 128, а при закрытом, — равное 108. Сила давления на проекцию равна 104; т. е. даже немного менее.

154. Сопротивление низких открытых конусов выражается следующей таблицей, где в первом ряду дана высота конусов в миллиметрах; диаметр основания каждого конуса был немного более 7 см:

Высота, мм	0	11	16	20	23	26	31	35
Отверстием к ветру	60	63	64	65	66	67	68	68
Углом к ветру	60	50	48	45	43	42	39	37

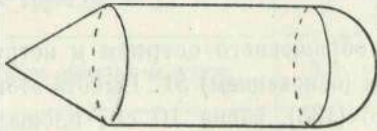
155. Я интересовался, будет ли сопротивление конусов пропорционально числу их, если расположить их вдоль потока. Для этого я сделал 5 равных (двойных) конусов и располагал их в разном числе на проволоке, так что вершины их соприкасались; получились следующие результаты:

Число конусов	1	2	3	4	5
Сопротивление	4	8,5	11,5	16	19

Значит, сопротивление почти пропорционально числу конусов. Отсюда видно, что караван аэростатов едва ли будет подвигаться с большей

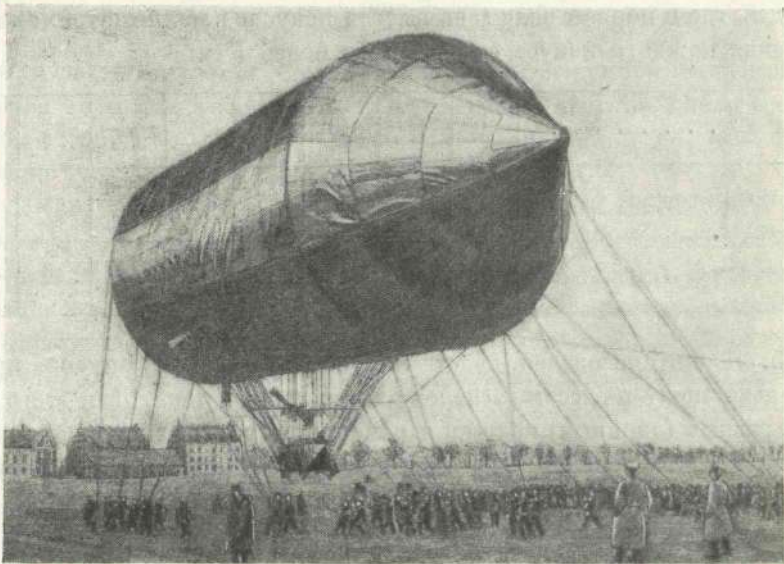
скоростью, чем каждый аэростат отдельно. Вес груза был равен 4 фунтам. Длина двойного конуса равна 14 см; диаметр основания равен $3\frac{1}{3}$ см.

156. Сопротивление полусферической поверхности, расположенной выпуклостью к ветру, равнялось 31; когда же отверстие было закрыто кругом, то — 32. При отверстии, обращенном к ветру, получаем, в случае открытой чаши, 99, а закрытой — 94; т. е. сопротивление увеличивается в 3,2 раза, когда полусфера поворачивается отверстием к ветру. Сравнивая наименьшее сопротивление с сопротивлением полной сферы такого же диаметра (124), видим, что сопротивление открытой полусферы меньше в 1,13 раза.



Фиг. 6

157. Сопротивление полусферы, отверстие которой параллельно направлению потока, равно 20, независимо от того, закрыта ли полусфера или нет. Это сопротивление больше, нежели половина сопротивления полной сферы такого же диаметра.



Фиг. 7

158. Алюминиевый аэростат Шварца (фиг. 6 и 7) (опыт близ Берлина, в 1897 г.), как известно, в носовой части имел форму полушара, а в кормовой — круглого конуса, высоту в 10 м. Корму с носом соединял

цилиндр, диаметром в 12 м и длиною в 24 м. Чтобы определить сопротивление такого тела, я сделал подобное ему, с площадью круглого поперечного сечения в 63 см².

159. Вот результаты опытов:

Вес груза, фунт.	2	4	8
Сферой к ветру	26	50	98
Конусом к ветру	28	54	107

Следовательно, сопротивление почти пропорционально квадрату скорости.

Далее, видим, что сопротивление при установке сферой вперед немного менее, чем при установке конусом вперед. Сила давления на проекцию равна 328 (при грузе весом в 8 ф.), значит, коэффициент сопротивления, при самых благоприятных условиях, равен $98 : 328 = 0,30$; утилизация же формы равна 3,34, т. е. она немного более полезности шаровой поверхности и много уступает полезности продолговатых тел простейшей формы (см. табл. 130).

160. Укажу в заключение на опыт с поверхностью, полученной от соединения сферы и касательного к ней конуса.

Длина образующей конуса равна 12 см. Площадь большого круга шара равна 63 см²; диаметр — около 8,9 см. Испытание было при грузах, весом в 2, 4, 8 фунтов; высота конуса была параллельна направлению потока. Результаты следующие:

Вес груза, фунт.	2	4	8
Сферой к ветру	28	51	90
Конус рассекает воздух . . .	28	55	112

Таким образом, при скорости, большей 1 м/сек, сопротивление оказывается меньшим при движении сферой вперед. Наибольшая утилизация формы равна 3,65; наименьшая 2,93. Наименьший коэффициент сопротивления равен 0,27, тогда как для шара он равен 0,43. Значит, конус в кормовой части значительно уменьшает сопротивление шара.

ВЫВОДЫ

161. Сила давления на наклонную квадратную пластинку вернее всего выражается формулой Ланглей. Годится для этого и формула лорда Релея. Однако ни одна из формул не указывает замеченного нами увеличения силы нормального давления при средних наклонах пластинки к ветру.

162. Обе предыдущие формулы можно применять к решению вопросов, касающихся аэроплана (подразумеваю птицеподобную или насекомоподобную летательную машину).

163. Сопротивление тел не продолговатых в направлении потока (или округлых) пропорционально квадрату скорости потока. То же можно сказать и про тела мало продолговатые, если в средней части они имеют грубые углы (двойной конус).

164. Нет формул, определяющих силу давления ветра на наклонную и продолговатую пластинку. Чем более продолговата и наклонена пластинка к ветру, тем более обнаруживается непригодность известных формул сопротивления пластинки: давление на продолговатую пластинку, расположенную вдоль потока, значительно меньше вычисляемого по ним, а на расположенную поперек — больше.

165. Абсолютная сила трения, в килограммах, одной стороны прямоугольника, шириною в h , а длиною в L , при движении по направлению L , со скоростью V , равна $T = 0,0004423 hV^{1,6}L^{0,63}$, т. е. она не пропорциональна квадрату скорости движения и не пропорциональна длине прямоугольника L .

166. Сила трения, приходящаяся на единицу поверхности прямоугольника, равна

$$T_1 = 0,0004423 \cdot \frac{V^{1,6}}{L^{0,37}}.$$

167. Коэффициент трения равен

$$\frac{0,00623}{V^{0,4} \cdot L^{0,37}},$$

т. е. он уменьшается почти одинаково (показатель степени равен 0,4) как от увеличения скорости, так и от увеличения длины поверхности по направлению движения (L и V выражены в метрах и в метрах в секунду).

168. Для того, чтобы законы трения, принятые мною в недавно напечатанной статье («Вестник опытной физики», № 259), вполне оправдались, необходимо, чтобы длина трущейся поверхности, в направлении движения, возрастала по условию: $L = 0,0646 V^{1,62}$, т. е. возрастала с увеличением скорости движения. В применении к размерам наших аэростатов, величина трения несравненно меньше, чем мы принимали в упомянутой статье. Так, для аэростата в 200 метров длины, движущегося со скоростью

12 метров в секунду, она оказывается раза в 4 меньше, чем мы принимали ранее (Циолковский, «Железный управляемый аэростат»).

169. Чем больше величина поверхности, чем менее она продолговата и чем быстрее ее движение, тем более мы вправе пренебрегать величиною силы трения в сравнении с величиною сопротивления от инерции. Однако для управляемых аэростатов величиной силы трения пренебрегать никак нельзя.

170. Ни одну из формул для сопротивления пластинок нельзя применять к аналитическому определению сопротивления кривых или многогранных поверхностей, потому что результаты таких вычислений грубо противоречат опыту. Согласие с ним может быть только случайное. Так, неверная формула Ньютона дает результаты, более близкие к истине, чем верная, сама по себе, формула Ланглей.

171. *Каждому желающему я готов охотно повторить любой из опытов, описанных в этой статье.*

172. *Прибор, устроенный мною, так дешев, удобен и прост, так быстро решает неразрешимые теоретически вопросы, что должен считаться необходимою принадлежностью каждого университета или физического кабинета.*

Множество неописанных мною тут опытов производятся с помощью его в 2—3 минуты.

173. Сопротивление плавных продолговатых тел (кораблеподобных) возрастает не так быстро, как квадрат скорости.

174. Сопротивление воздуха складывается из двух сил: трения и инерции воздуха. Вычитая сопротивление 1-го рода, увидим, что сопротивление от инерции также возрастает менее быстро, чем квадрат скорости, что легко видеть на телах малопродолговатых и что объясняется упругостью воздуха, который, быстро сжимаясь по бокам носовой частью тела, также быстро расширяется, давя на заднюю часть тела и тем подгоняя его (или возвращая часть затраченной телом работы).

175. Для малых скоростей и малопродолговатых поверхностей или для больших скоростей и сильно продолговатых тел сопротивление тела от инерции будет обратно пропорционально квадрату продолговатости его (продолговатость есть отношение длины тела к ширине).

176. Если скорость тела будет возрастать пропорционально его продолговатости, то боковое сжатие упругой воздушной среды будет приблизительно одинаково и потому, приблизительно, будут соблюдаться два закона относительно сопротивления от инерции: а) сопротивление от инерции будет пропорционально квадрату скорости и б) обратно пропорционально квадрату продолговатости.

177. Кормовой придаток тела иногда увеличивает его сопротивление, иногда не изменяет, но большей частью уменьшает.

Для кораблеподобных тел или для управляемых аэростатов значение кормы громадно.

178. Закончу выражением сожаления по поводу того, что мои опыты не настолько точны, не настолько обширны и многочисленны, чтобы служить для вывода эмпирических формул сопротивления продолговатых тел. На ограниченное значение проводимых тут формул трения я уже указывал.

А как важно возможно точно формулировать законы сопротивления и трения! Какое громадное применение они имеют к теории аэростата и аэроплана! Да и есть ли области техники и науки, в которых законы сопротивления упругой среды не имели бы значения. Так пожелаем же горячо установления этих законов и поспособствуем, насколько от нас зависит, производству необходимых для того опытов.

ОТЧЕТ К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ОБ ОПЫТАХ
ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ ВОЗДУХА,
ПРОИЗВЕДЕННЫХ ИМ НА СРЕДСТВА АКАДЕМИИ
в 1900—1901 гг.*

Опытами по сопротивлению воздуха я занимаюсь уже лет 15 с лишком. Девять лет тому назад я обратился в нашу Академию Наук с весьма обширной программой новых опытов по сопротивлению воздуха и с просьбой помочь мне материально произвести эти опыты.

К предложенным мною предыдущим моим трудам по сопротивлению Академия, в лице М. А. Рыкачева, отнеслась весьма сочувственно и решила оказать мне денежную помощь для производства означенных мною работ.

В 1901 г. я послал в Академию доклад о первой части произведенных мною опытов.

Академик М. А. Рыкачев весьма внимательно разобрал мой труд, на полях которого карандашом сделал большую часть основательные пометки, которыми я с благодарностью и воспользовался, чтобы исправить мой доклад. Кроме того, почтенный академик сделал и общий отзыв о моей работе, напечатанный в одном из изданий Академии. Этот общий отзыв и некоторые пометки на полях моей рукописи показали мне, что М. А. Рыкачев составил преувеличенное представление о неточности некоторых моих опытов.

В представленном мною докладе не означались влажность, время, температура и барометрическое давление, соответствующие опытам.

Академик Рыкачев говорит, что мои опыты действительно не зависят от плотности воздуха, если только принять, что сопротивление воздуха, при прочих неизменных условиях, пропорционально квадрату скорости потока.

* Предисловие к «Отчету Академии Наук об опытах по сопротивлению воздуха», написанное К. Э. Циолковским при отправлении этой рукописи Н. Е. Жуковскому 21 марта 1908 г. (ст. ст.) Печатается впервые, в несколько сокращенном виде.

Большинство моих опытов было именно таких, когда давление ветра можно было принять пропорциональным квадрату его скорости. И так, наибольшая группа моих опытов не зависит от температуры и атмосферного давления, и измерения такого рода тут совершенно излишни.

Но, говорит г. Рыкачев, автор (т. е. я) принимает в некоторых опытах зависимость коэффициентов от скорости потока, скорость же эта зависит от плотности воздуха, следовательно, во время опытов надо определять температуру и атмосферное давление.

В качественном отношении академик совершенно прав, но не в количественном.

Действительно, вторая группа моих опытов относится не к приводимой мною скорости (в 1, 2, 3, 4 метра в секунду), соответствующей плотности воздуха, в 0,0012 от плотности воды, а к другой, соответствующей разнообразным температурам и давлениям воздуха во время разных опытов.

При плотности воздуха, много уклонявшейся от 0,0012, я опытов совсем не производил; но допустим, что я уклонился от этого правила и позволил себе произвести опыты при плотности воздуха в 0,0011. Как же при этом должна измениться соответствующая скорость потока? Не трудно вычислить, что при уменьшении плотности воздуха на $\frac{1}{12}$ первоначальной величины скорость потока должна увеличиться на $\frac{1}{4}$ первоначальной скорости. Но коэффициенты, как я заметил, хотя и зависят от скорости, но весьма мало (для большинства моих опытов этой зависимости совсем не было заметно, хотя, теоретически, она должна быть). И потому, если принять изменение плотности воздуха малым первого порядка, то относительное изменение скорости потока будет в два раза меньше, а изменение коэффициента сопротивления будет малым второго порядка. Когда сопротивление пропорционально квадрату скорости, то коэффициент сопротивления выражается прямой линией, параллельною оси абсцисс. Если нет,— то кривой линией, мало наклонной к оси абсцисс.

Погрешность, указанная академиком, существует, но она так незначительна, что совершенно заглушается множеством других неизбежных погрешностей.

Мне только жаль, что эта теоретическая погрешность, благодаря неправильной оценке почтенного академика, помешала мне поместить своевременно мои труды в изданиях Академии. Конечно, г. Рыкачев это сделал не намеренно, и я останусь весьма благодарным ему и Академии, поддерживавшей меня материально и нравственно.

Весьма краткий отчет, без чертежей и описания приборов, о первой половине моих опытов был напечатан в «Научном Обозрении»*.

Но это было только резюме.

К. Циолковский

1) Сопротивление воздуха при движении в нем различных тел можно узнавать разными способами.

Можно заставить тело двигаться в неподвижном воздухе и определить сопротивление встречного воздушного потока. Если испытуемые тела не продолговаты, то можно употребить круговое их движение (таково большинство производимых опытов), в противном случае неизбежно прямолинейное движение. Так, определение сопротивления длинных корабельных форм требует именно такого движения.

Прямолинейное движение, в свою очередь, может быть вертикально и горизонтально. Как то, так и другое нуждается в громадных помещениях; систематические опыты по такому методу хотя и крайне необходимы, но чересчур дороги.

В изучении сопротивления воздуха большею частью употребляется круговое движение и очень редко прямолинейное; так, Кальете и Колардо применяли его для определения силы давления на плоскую пластинку при падении ее с башни Эйфеля.

Проще выставлять тела на ветер и определять силу сопротивления; но, во-первых, ветер есть движение воздуха весьма неправильное — как по направлению, так и по скорости и потому требует особенных приспособлений для своего направления, во-вторых, скорость ветра определить точно довольно затруднительно.

Впрочем, все эти методы, незаменимые на своем месте и при некоторых условиях, могут оказать неопенимые услуги науке **.

2) Для своих последних опытов (1900—1901 гг.) я употребил большую лопастную воздухоудвную машину, вроде веялки.

Такой же вентилятор я употреблял и ранее (1897—1898 гг.), только значительно меньших размеров. Площадь поперечного сечения воздушного потока в настоящее время увеличена в 4 раза.

Прежние опыты мои были описаны в «Вестнике опытной физики» (№ 269—272, 1898 г.) и в отдельном издании. Так как печатные чертежи воздухоудвной машины были грубо искажены, то я привожу тут точный чертеж вентилятора, применявшегося при опытах 1897—1898 гг. (черт. 1).

Два четырехугольника показывают величину поперечного сечения воздушного потока. Мы видим, что высота второй машины немного

* Воспроизведено в настоящем издании (см. следующую статью).— *Ред.*

** В Аэродинамическом институте Рябушинского применяют оба метода.

превышает высоту первой, между тем как сечение потока у новейшей воздуходувки почти в 4 раза больше, чем у прежней. Достиг я этого быстрым расширением воздушного канала вокруг лопастного колеса.

Эти колеса у обеих машин были одинакового размера: в диаметре 1 м. Но у первой воздуходувки круглые боковые отверстия были малы сравнительно с колесом, тогда как у второй воздуходувки они были строго равны колесу.

Мне помнится, что старая машина давала более постоянные показания, чем теперешняя, но зато у новой машины поток был гораздо однороднее, т. е. я хочу сказать, что в определенном месте потока у старой машины давление ветра было более постоянным, чем у новой, но зато это давление у последней было, приблизительно, одинаково во всех частях потока.

Довольно значительные колебания стрелки, указывающей давление ветра, понудили меня для позднейшей машины приспособить и особый измерительный прибор, умеряющий эти колебания.

3) На чертеже изображено лопастное колесо с 16 полотняными лопатками. В периферии они прикреплены к двум параллельным и равным ободам, а в центре — пружинами, прикрепленными к оси колеса. Благодаря этому, для лопастей у меня нет спиц, хотя лопасти всегда умеренно натянуты. Есть только по крестовине у каждого круглого отверстия для поддержания двух проволочных ободов. Ось лопастного колеса железная и вращается на конусах, входящих в конические углубления, просверленные на концах оси.

4) Боковые стенки веялки деревянные и состоят из двух равных и параллельных прямоугольников с круглыми окнами. Между этими стенками изгибается спиралью Архимеда длинный железный лист в аршин шириною.

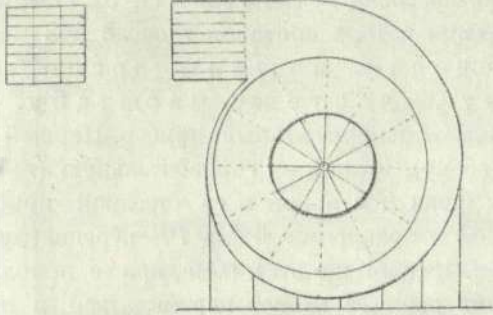
Таким образом, внутренняя полость вентилятора образует прямой цилиндр, основание которого ограничено спиралью Архимеда.

Воздух, при движении лопастей, втягивается в круглые окна, вращается по спирали и устремляется прямолинейно через верхнее отверстие машины. Величина и форма его изображены на черт. 2 справа. Выходящий воздушный поток устремляется несколько кверху и, кроме того, в нижней части отверстия значительно слабее.

5) Для уничтожения этих недостатков устье машины перегороджено четырьмя почти горизонтальными перегородками. Эти полотняные перегородки, достаточно натянутые, можно наклонять слегка к горизонту и привинчивать в этом положении. Я наклонял их относительно друг друга так и до тех пор, пока не получался поток одинаковой силы из каждого отверстия¹⁵. Вследствие полной почти горизонтальности перегородок, и поток получался горизонтальный.

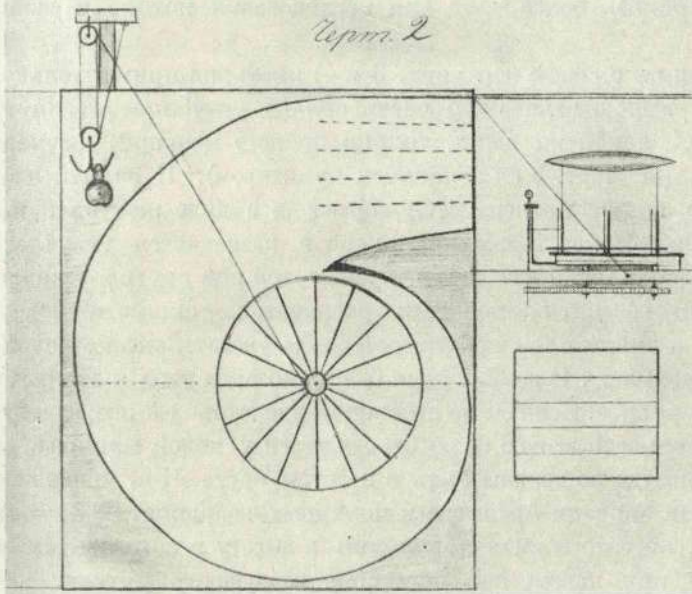
Пять отверстий и перегородки изображены на черт. 2 пунктирными линиями. Изображен и наклон их.

Черт. 1.



Масштаб $\frac{1}{20}$

Черт. 2.



Масштаб $\frac{1}{20}$

6) Лопастное колесо вращается полиспастом из 4 блоков. Справа, перед устьем машины изображен измерительный прибор: определяется сопротивление продолговатой плавной формы.

Ширина воздушного потока равна 71 см, а высота — 62,4 см; стало быть площадь поперечного сечения потока составляет около 443 кв. см, или 0,44 м². Все измерения машины легко видеть по приложенному к чертежу масштабу.

7) Черт. 3 и 4 изображают измерительный прибор. Первый — проекцию вертикальную (вид сбоку), второй — горизонтальную (вид сверху).

Из черт. 4 видно, как ящик *Я* с водой и со стрелкой передвигается в продольном и поперечном направлении. Рама *РР* передвигает ящик *Я* в продольном направлении. В самой же этой раме, при ее неподвижности, измерительный прибор или ящик *Я* может перемещаться в поперечном направлении. Вместе с ящиком передвигается и форма (Φ , черт. 3), сопротивление которой определяет измерительный прибор. С помощью проволочных стоек *n* разной величины форма (черт. 3) может быть расположена выше или ниже.

Таким образом, всякая форма может быть помещена в любой части потока, что и устраивал более всего для исследования потока в разных его частях.

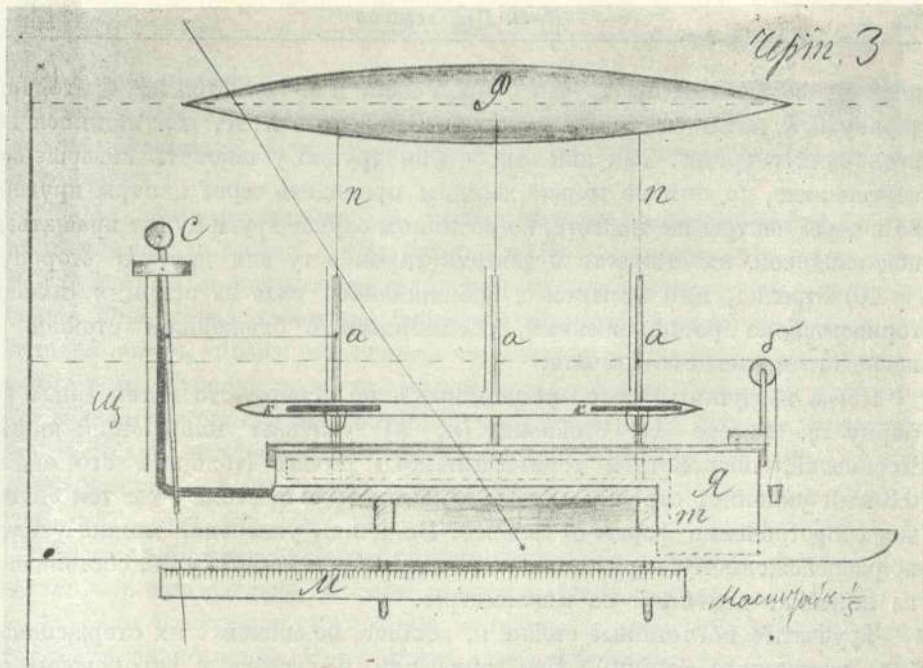
8) Жестяной ящик с водою (см. черт. 3 и 4) имеет вид прямоугольного параллелепипеда, только задняя его часть сильно углубляется. Внутри его плавает другой такой же ящик, только меньших размеров и без углубления (на черт. 3 он обозначен пунктиром). К задней части этого плавающего ящика прикрепляется тормоз *t* в виде жестяной пластинки. Для свободного ее движения в воде и назначается углубление в задней части резервуара. Назначение тормоза той или другой величины (тормозы меняются) состоит в замедлении раскачивания ящика в продольном направлении, а вместе с тем и связанной с ним указательной стрелки *c*.

В старой машине (черт. 1) я обходился без тормоза; из чего я заключаю, что поток там был ровнее. Если бы не стеснение в средствах и помещениях, то той же равномерности можно было бы добиться у новой машины, для чего спираль Архимеда не должна быть в ней так крута. Чем менее величина *a* в уравнении спирали Архимеда в полярных координатах ($r = a\phi$), тем поток ровнее, но зато и размеры машины в высоту и ширину должны возрасти, даже при неизменной величине воздушного потока.

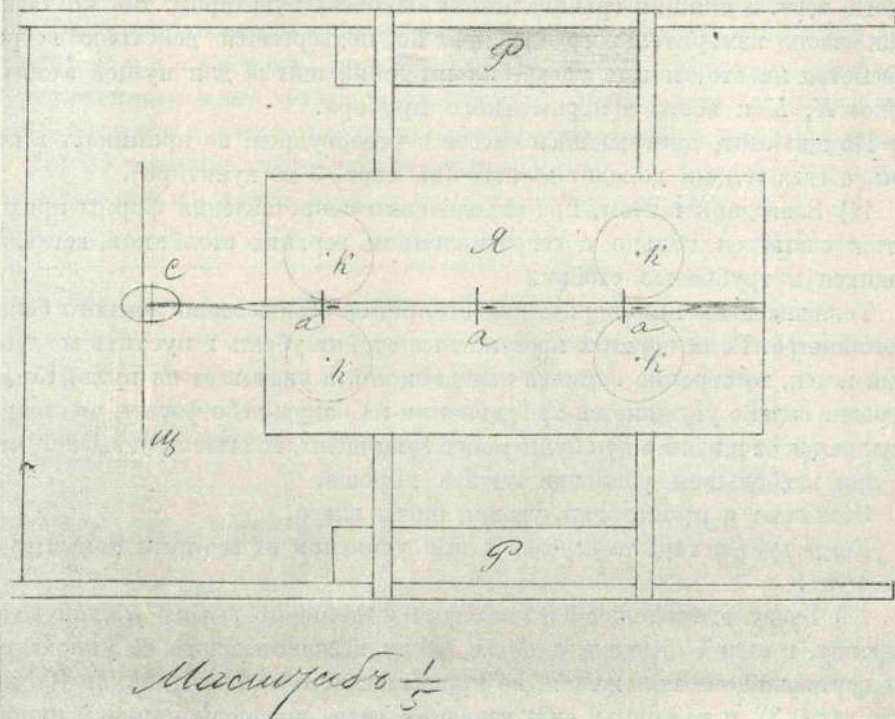
9) Ко дну внутреннего плавающего ящика припаяны три железных стержня, а на них надеваются три жестяные сплюснутые трубки *a*.

Трубки проходят сквозь деревянный таран *k*, *k* или линейку. Линейка же укреплена на двух столбиках, припаянных тоже ко дну плавающего ящика. Ящик *Я* с водою закрывается сверху двумя дощечками, между которыми остается продольная щель во всю длину ящика. Через эту щель и проходят свободно столбики *a*. Они, при движении вместе с

Черт. 3



Черт. 4



Черт. 3, 4

плавающим ящиком, не трутся о края щели и не касаются их, благодаря тарану k, k , катящемуся между легкими колесами K, K , вертящимися на иглочных остриях. Так как эти острия трудно установить совершенно вертикально, то они не только должны проходить через центры кругов, но и через центры их тяжести, в противном случае круги будут вращаться под влиянием их тяжести и двигать таран в ту или другую сторону.

10) Стрелка, или маятник s , вращающийся тоже на остриях, только горизонтально расположенных, соединяется с ближайшей стойкой a посредством легкого рычага.

Когда воздушный поток устремляется на аппарат, то ветер давит на форму и, вместе со стойками (n, a) увлекает плавающий ящик. Последний, посредством горизонтального рычага (толщина его около 0,3 мм), уклоняет стрелку s от вертикального положения — и тем более, чем сопротивление формы Φ сильнее. Величины уклонения можно узнать по расположенному горизонтально под прибором масштабу M , состоящему из линейки, деленной на миллиметры.

Трубчатые постоянные стойки a , вообще, не снимаю с их стерженьков (a — постоянные стойки). Как они, так и стрелка s загорожены от действия воздушного потока вертикальными пластинками в палец длиною и в полтора, два сантиметра шириною.

На черт. 3 нижняя граница потока означена пунктиром, так что большая часть измерительного прибора не подвергается действию ветра. Несмотря на это, я еще употребил широкий щит $щ$ для пуццей защиты колес K, K и всего измерительного прибора.

Но щит этот, двигающийся вместе с резервуаром, не проникает в поток, а едва только доходит до него (на черт. 3 до пунктира).

11) Благодаря щитам, при определении сопротивления формы приходится считаться только с сопротивлением верхних столбиков, вставляющихся в трубчатые стойки.

Толщина этих цилиндрических столбиков обыкновенно немного более миллиметра. Если верхние проволочные стойки убрать и пустить воздушный поток, то стрелка остается неподвижной и указывает на нуль. Когда стрелка сильно уклоняется при давлении на какую-либо форму, то стойки удаляются от щитов и как будто менее защищены, но опыт показывает, что и при наибольшем удалении защита хороша.

Этот опыт я производил, удаляя щиты влево.

Когда дует ветер, то стрелка и при удалении их все-таки показывает на нуль.

12) Ввиду значительной длины горизонтального рычага a , тянущего стрелку, и самой стрелки, а также ввиду незначительного ее уклонения от вертикального положения, не превышающего по масштабу M 100 мм (см. черт. 3), я принимал силу давления ветра пропорциональной линейному уклонению стрелки от вертикали.

13) Для проверки этого теоретического вывода на практике и для приведения показаний стрелки к определенной величине мною употреблялся легкий бумажный блок, вращающийся на горизонтальных остриях (см. черт. 3, б).

Через него перекидывалась легкая ниточка, верхний конец которой прицеплялся к стойке *a* так, чтобы иметь горизонтальное положение. К нижнему отвесному концу привешивалась легчайшая бумажная коробочка. Она своей тяжестью (вместе с тяжестью нитки) подвигает плавающий ящик вправо; последний же выводит и стрелку *c* из отвесного положения. Стрелка, положим, уклоняется на 5 мм. Тогда я в коробочку кладу грамм и смотрю, насколько уклонилась стрелка от нуля. Допустим, что на 105 мм. Следовательно, грамм уклоняет стрелку *c* на 100 мм; показание стрелки в 1 мм значит соответствует силе в $\frac{1}{100}$ грамма (около 10 дин).

Так же убеждаемся в пропорциональности показаний стрелки силе груза, а следовательно, и силе давления ветра.

14) Для измерения сил разной величины у меня приготовлено было 4 стрелки разного веса. Вот таблица этих стрелок: горизонтальные строки ее последовательно показывают: номер стрелки, начиная с легчайшей; длину плеча стрелки, к которому прилажен горизонтальный рычаг *a*; уклонение стрелки в мм, зависящее от тяжести коробочки с ниткой *b* и, конечно, от тяжести стрелки и удаления ее центра тяжести от оси вращения; уклонение стрелки от совокупного действия коробочки и положенного в нее груза (см. последнюю строку; груз этот различен); уклонение в мм от действия одного груза; самый груз в граммах.

15) Из таблицы видно, что уклонение стрелок на 1 мм соответствует, последовательно, силам в $\frac{1}{200}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{50}$ и $\frac{1}{25}$ грамма.

Таблица

№ стрелки	1	2	3	4
Плечо (см)	10	8	8	8
Уклонение под действием веса коробки (мм)	23,5	12	5,7	1,5
Уклонение под действием веса коробки и груза (мм)	123,5	112	105,7	101,5
Уклонение под действием груза (мм)	100	100	100	100
Величина груза (г)	0,5	1,0	2,0	8,0

Зная уклонение и номер стрелки, можно всегда вычислить и силу давления ветра, соответствующую этому уклонению.

Стрелки имели на себе прицепки, которые можно было менять, а также и передвигать вертикально с тем, чтобы округлить показания стрелки согласно приведенной таблице.

16) В последующих опытах я выражаю все силы давления в миллиметрах показания стрелки № 2, уклонение которой на n мм соответствует силе в $\frac{n}{100}$ граммов.

Так, если я употребляю первую стрелку (№ 1) и получаю 28 мм, то число это я должен разделить на 2. Если стрелка № 4 дала мне 20 мм, то число это я множу на 8, т. е. я получаю столько, сколько показала бы стрелка № 2, предполагая, что показания ее неограниченны.

17) Таким образом, показание первой стрелки делится на 2, второй — остается без изменения, третьей — умножается на 2, четвертой — умножается на 8.

При опускании гири (черт. 2) до пола, колесо с полотняными лопатками делало 33 полных оборота. Кроме гири, на крюк еще надевается особый дополнительный груз. Я изменял его до тех пор, пока колесо не получало вращения от самого незначительного груза (например в $\frac{1}{4}$ фунта). Приведенное в весьма слабое вращение, колесо очень медленно останавливается даже при отсутствии переменного груза, если дополнительный (постоянный, неснимаемый) груз подобран правильно.

18) Про дополнительный груз далее я совсем не буду упоминать, а буду лишь подразумевать переменный груз, от 1 до 130 фунтов.

Первые три оборота колесо движется ускоренным движением, но, начиная с четвертого время полного оборота для данного груза постоянно.

Сбоку колеса у меня устроен звонок, который производит короткий звон при каждом начале и конце оборота. Следя за секундной стрелкой, я диктую своему помощнику время каждого удара колокольчика; из полученных чисел уже не трудно вывести вышесказанное.

19) Для определения времени развертывания намотанной на центральный вал бечевы, я принимал в расчет только равномерное вращение колеса, т. е. время, необходимое для совершения последних 30 оборотов (33—3). Для этого я из времени совершения 33 оборотов вычитал время совершения первых трех оборотов. Получилась у меня такая таблица: [см. стр. 131].

Первая строка указывает вес груза в фунтах (не считая дополнительного — постоянного), вторая — время первых трех оборотов (неравномерных), третья — время 33 оборотов, четвертая — время 30 равномерных оборотов.

20) Из таблицы видно, что время разворачивания обратно пропорционально квадратному корню из действующего груза. Когда, например,

Груз	1	4	16	32	64 фунт.
Секунды	45	19	9	6	4 $\frac{1}{2}$
»	266	129	64	46	32
»	221	110	55	40	27 $\frac{1}{2}$

вес груза в 4 раза больше, то время разворачивания в $\sqrt{4}$, или в 2 раза меньше.

Скорость движения на ободу колеса (или угловая скорость вращения колеса) пропорциональна квадратному корню из веса груза. Так, когда вес груза увеличивается в 16 раз, то угловая скорость вращения колеса увеличивается в $\sqrt{16}$, или в 4 раза.

21. Отсюда можно вывести, почти с полной достоверностью, что и скорость воздушного потока в моих опытах пропорциональна квадратному корню из веса груза. (Предполагая, конечно, постоянную плотность воздуха).

22) Модели и прибор, расположенные перед потоком, имеют незаметное влияние на время обращения колеса и, по всей вероятности, на самую скорость потока, что видно из следующего опыта.

23) Для грубого исследования потока в вентиляторе и его двух уменьшенных моделях я устраивал горизонтальные флюгера (черт. 5), а также пользовался тонкими нитками, привешенными к горизонтальной палке (черт. 6).

Первый прибор указывал одновременно силу давления потока в разных его частях*. Второй прибор (черт. 6) показывал, что только в средних частях потока направление его перпендикулярно к плоскости отверстия вентилятора. В других частях поток направляется немного вбок, но, повидимому, тем сильнее, чем груз меньше.

Горизонтальность потока определяется легким флюгером, с горизонтальной осью вращения, проходящей через центр тяжести флюгера.

Без решетки, в устье воздуходувки (черт. 2), поток заметно уклоняется вверх. С решеткой он почти горизонтален.

24) Показания стрелки (с, черт. 3 и 2), при одном и том же грузе, вообще не постоянны. Стрелка движется в течение всех оборотов колеса,

* Действительно, чем сильнее ветер, тем больше уклоняется плоскость флюгера от вертикального положения.

и колебания эти тем значительнее, чем более измеряемое сопротивление и чем сильнее ветер. При измерении силы давления на плоскую пластинку, получаются наибольшие колебания. Только при малом уклонении стрелки и небольшой скорости потока, стрелка почти неподвижна. В течение времени полного развертывания бечева я делал наблюдения над показаниями стрелки; помощник же мой записывал их. Наблюдения я делал через равные промежутки времени (около 2 секунд) с помощью метронома, который звонил через каждые $1\frac{7}{8}$ секунды.

25) Воздушный поток обыкновенно устанавливается через 5—10 оборотов колеса, и с этого момента записывались показания. По окончании опыта, сумму записанных чисел я делил на число их, т. е. брал среднее показание за истинное.

26) Средние показания стрелки (иногда вывод из 40 записей) большею частью согласуются между собою. Однако не всегда и не вполне. Часто я производил два одинаковых опыта и только при достаточно близких средних числах принимал одно из них, или их среднее арифметическое число.

Мне пришлось произвести несколько десятков тысяч записей при своих опытах.

27) Исследование потока я производил: в продольном направлении, по оси потока (средняя линия потока), в поперечном горизонтальном и в поперечном вертикальном направлении.

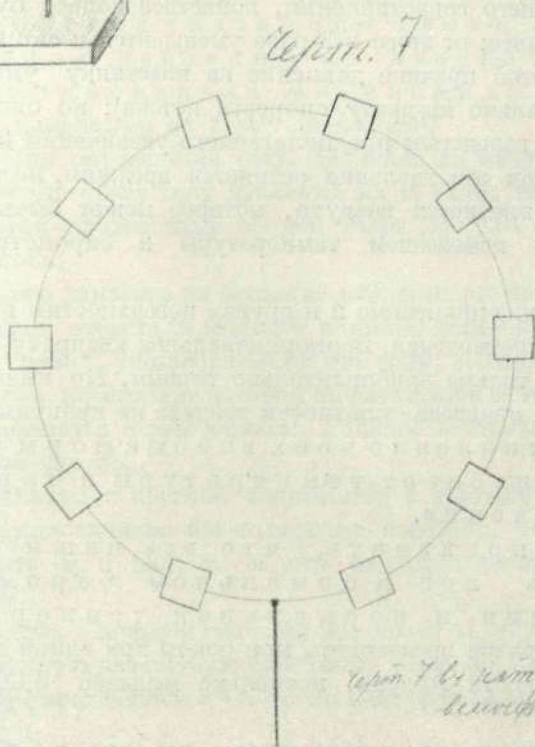
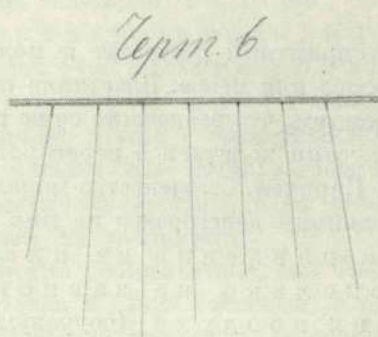
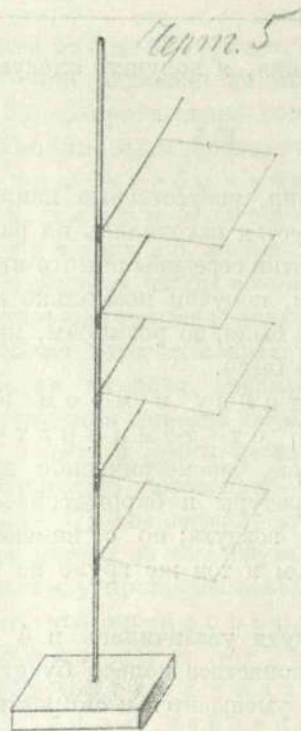
Исследование потока в продольном направлении выразилось следующими числами.

Расстояние от устья потока в сантиметрах .	40	60	80	105
Сопротивление квадратной пластинки в 36 кв. см и стойки	34,9	34,7	34,7	34,3

Вообще, подобные исследования всегда давали благоприятные результаты относительно однородности потока.

28) Исследование в горизонтальном поперечном направлении, на расстоянии 15 см вправо и влево от оси потока, дает числа 34,1 и 35,9, что несколько больше предыдущего. Вообще, многочисленные мои опыты такого рода показывают, что к боковым границам прямоугольного потока давление его немного возрастает и только близ самых границ опять уменьшается.

29) Для исследования в вертикальном направлении я брал длинную проволочную стойку и, передвигая по ней квадрат в отвесном направлении, располагал его последовательно против пяти отделений устья (черт. 2).



Черт. 7 by компьютерного
дизайнера

Начиная с верхнего горизонтального отделения, я получил следующие числа:

33 33,5 33,5 33 33,5

Такой благоприятный результат я получил, искусственно наклоняя перегородки более или менее. Пластинка от устья находилась на расстоянии 40 см. Заметим, что располагая ее не против середины какого-нибудь отверстия, а против холстинной перегородки, получим несколько меньшее давление. Впрочем, большинство моделей было, по размерам, меньше отверстия и влияния перегородок на них не было.

30) Сила давления на пластинку в моем приборе несколько не зависит от температуры и давления воздуха (подразумеваю барометрическое давление). Действительно, с изменением температуры и барометрического давления изменяется вообще и плотность воздуха; но с изменением плотности воздуха давление ветра при одном и том же грузе не изменяется.

Положим, например, что плотность воздуха увеличилась в 4 раза; тогда вследствие большего сопротивления, лопастное колесо будет вращаться в 2 раза медленнее; от этого в 2 раза уменьшится и скорость воздушного потока; по этой причине давление на пластинку уменьшится в 4 раза (пропорционально квадрату скорости потока); но оно должно и увеличиться в 4 раза вследствие предполагаемого увеличения плотности воздуха. Итак, в общем это давление останется прежним, несмотря на громадное изменение плотности воздуха, которое может быть вызвано также произвольным изменением температуры и барометрического давления.

31) То же рассуждение применимо и к другим поверхностям и формам. Однако тут закон о сопротивлении, пропорциональном квадрату скорости ветра, можно считать только приблизительно верным. Но имея в виду весьма незначительное изменение плотности воздуха на практике, можем считать, что сопротивление всех вообще форм в моем аппарате не зависит от температуры и барометрического давления.

Итак, можем принимать, что все наши опыты производились при нормальном барометрическом давлении и нормальной температуре.

Тем не менее я старался производить мои опыты при одной и той же, приблизительно, плотности воздуха, несколько меньшей 0,0012 плотности воды.

32—34). Опыты привели меня к заключению, что сила давления на одну и ту же пластинку, расположенную нормально к направлению потока, пропорциональна весу груза. Вес груза изме-

няется от 5 до 130 фунтов. Из этих опытов я вывел, что при грузе в 10 фунтов сила давления на квадрат в 100 см^2 составляет в среднем 0,92 г.

35) Сопротивление стоек, конечно, вычиталось.

Стойки были проволочные, толщиной в 1,15 мм, но все такой длины, чтобы центр квадрата находился на средней линии потока, что я всегда соблюдал и относительно всех других испытываемых форм.

В высших частях потока, по его краям, у меня расположены две горизонтальные линейки, длиною каждая более метра; по ним могла двигаться свободно горизонтальная поперечная линейка, а от этой — шла вертикальная линейка, разделенная на сантиметры.

Отвесная линейка также могла передвигаться, так что ее можно было установить в любом месте потока и таким способом, с помощью ее (без катетометра), проверить положение модели в воздушном течении.

36—37) Мы видели, что скорость потока пропорциональна квадратному корню из веса груза (21), а так как сила давления на квадратную пластинку пропорциональна весу груза (33), то мы можем сказать, вместо этого, что оно пропорционально квадрату скорости потока.

38) Следуя указаниям опыта, я далее вывожу, что сила давления на квадратную пластинку пропорциональна ее площади. Площадь эта в моих опытах изменялась от 1 см^2 до 400 см^2 .

39) Для определения силы давления на квадрат со стороною в 1 см, я определял сразу силу давления на 10 таких квадратов, наизванных на тончайший проволочный ободок (черт. 7). Его сопротивление, конечно, вычиталось.

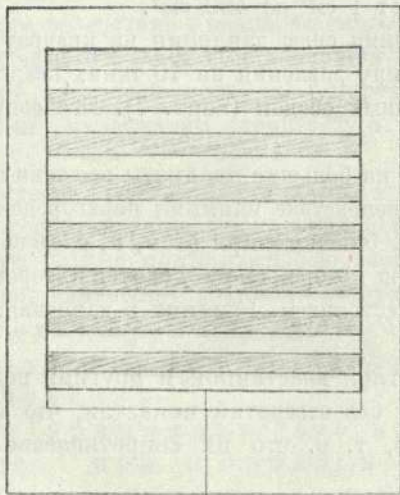
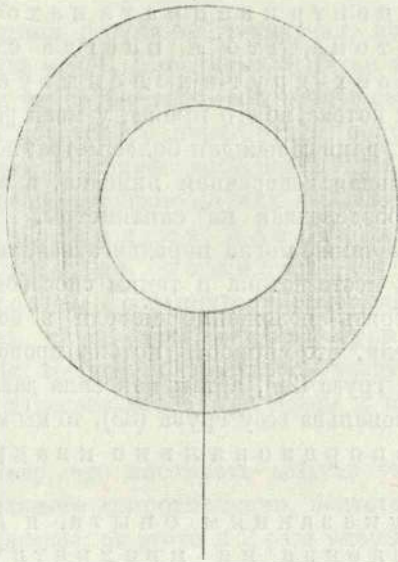
Среднее давление на большие квадраты все-таки оказывалось несколько меньше, отчасти вследствие влияния перегородок, отчасти вследствие малого груза*, употребляемого при этом, и, следовательно, малой скорости потока, по причине которой он расходится в стороны сильнее и сильнее же ослабляется с расстоянием. Разница в давлениях, в крайнем случае, доходила до 3%.

40) Опыты с круглой пластинкой и другими подобными непродолговатыми пластинками без отверстий показали, что этот же закон можно применять и к ним, т. е. что их сопротивление пропорционально их площади.

41) Опыт с кольцом (черт. 8) дал число 41, тогда как сила давления на равновеликую квадратную пластинку равна 35. Сила давления на решетку (черт. 9) определяется в 47, тогда как, судя по площади, должно быть 35.

* При малой скорости потока стрелка менее колеблется, дает более точный средний результат.

Черт. 8



Черт. 9

Весьма тщательный опыт я произвел с решеткой из квадратов, изображенной в натуральную величину на черт. 9₁. Такой же сплошной квадрат имел площадь в 256 см². Давление на 1 см² по опыту с таким квадратом, равнялось 0,711 (при грузе в 8 фунтов). Площадь решетки, вычитая дыры, равнялась 192 см². Давление на 1 см² ее, по опытам, оказалось равным 0,852.

Отношение этого давления на решетку к давлению на сплошной квадрат равняется 1,2, т. е. давление возросло на 20%. Площадь решетки определялась прежде, чем она была разрезана на части, как и всегда в подобных случаях, и потому можно поручиться за полную точность измерения площади ¹⁶.

42) Итак, на основании наших опытов, можем выразить силу давления F на непродолговатую сплошную пластинку, расположенную нормально к потоку, формулой

$$F = A \cdot S \cdot v^2,$$

где A — постоянное, v — скорость потока, а S — площадь пластинки.

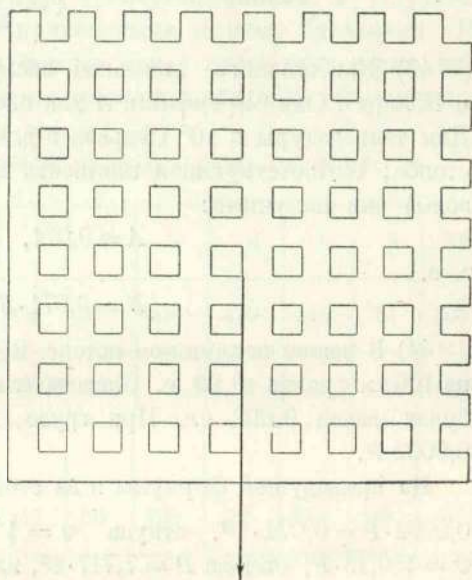
Тут мы можем указать на аналогию между сопротивлением воды и воздуха. В самом деле, сила давления воды и воздуха выражается одной и той же формулой

$$F = \psi \cdot \gamma \cdot S \cdot \frac{v^2}{2g},$$

где γ — вес одного кубического метра жидкости (воды или газа), S — площадь пластинки, нормальной к потоку, g — ускорение силы земного тяготения, v — скорость потока и ψ — коэффициент.

По Дюбуа и Дюшмену, ψ для воды равен 1,43. Для воздуха, по опытам Кальете и Колардо, коэффициент этот меньше, именно около 1,2; Ланглей же дает число, близкое к Дюбуа, именно 1,4. Впрочем Дюбуа и Дюшмен нашли 1,43 для пластинки, движущейся в стоячей воде, для движущейся же воды (и неподвижной пластинки), как это ни странно, они нашли другое число — 1,86²².

Иногда принимают ψ для воздуха переменным, в зависимости от величины квадрата; но того же, сколько мне известно, не принимают для



Черт. 9₁

сопротивления воды. Ввиду постоянства этого коэффициента для воды (независимо от размеров площади) и ввиду моих личных опытов, при изменении площади от 1 см² до 400 см² я склоняюсь принять этот коэффициент ψ вместе с другими исследователями постоянным и для воздуха (по крайней мере для не очень больших площадей и скоростей).

Очевидно, в моей формуле

$$A = \frac{\gamma \cdot \psi}{2g}.$$

43) Наибольшего внимания заслуживают последние опыты Кальете и Колард). Они определяли A для пластинки, падающей с башни Эйфеля. Для температуры в 10° Цельсия и для новой атмосферы (735 мм ртутного столба; соответствующая плотность воздуха близка к 0,0012 плотности воды) они получили:

$$A = 0,071,$$

т. е.

$$F = 0,071 \cdot S \cdot v^2 \text{ кг.}$$

44) В нашем воздушном потоке, при грузе в 10 фунтов, сила давления на 100 см² равна 0,92 г. Следовательно, сила давления на 1 кв. метр будет равна 0,092 кг. При грузе в P фунтов сила давления равна 0,0092 P .

Из предыдущей формулы и из этой, полагая $S = 1$, найдем:

$0,0092 \cdot P = 0,071 \cdot v^2$, откуда $v = \sqrt{0,12958 \cdot P}$, или приблизительно, $v = \sqrt{0,13 \cdot P}$; отсюда $P = 7,717 \cdot v^2$, или приблизительно $P = 7,72 \cdot v^2$.

47) ¹⁷ Эти формулы дают возможность вычислить вес груза, производящий поток той или другой скорости.

48) Также легко вычислить и скорость, соответствующую круглому числу фунтов:

$P = 1$	...	...	2	3	5	10	20	30	40 фунтов	
$v = 0,36$	...	...	0,51	0,62	0,81	1,14	1,61	1,97	2,28 метра в секунду	
$P = 50$	...	...	60	70	80	90	100	110	120	130 фунтов
$v = 2,55$	...	...	2,79	3,02	3,24	3,42	3,61	3,78	3,95	4,11 метра в секунду

50) Зная, что диаметр лопастного колеса равен 1 м, по (19) определим скорость на ободу этого колеса при любом грузе. Так, при грузе в 1 фунт она составляет 0,857 метра в секунду. Сравнивая эту ско-

рость на ободе со скоростью потока при том же грузе в 1 ф. (48), получим: $0,361 : 0,428 = 0,84$, т. е. скорость потока составляет 0,84 скорости на ободе, или скорости наиболее удаленных от оси частей лопаток.

Потеря скорости равна 16%, или около $\frac{1}{6}$ скорости точек обода.

В прежней воздуходувке (черт. 1) это отношение выразилось тем же почти числом (0,83), (см. «Давление воздуха»).

53) Для опытов с продолговатыми прямоугольниками я устраивал проволочный квадрат с четырьмя припаянными к нему булавками. На булавки накалывалась рамка из четырех более или менее узких картонных пластинок (черт. 10). Периметр проволоки составлял 94 см; такой же длины была и средняя линия рамки.

54) Следующая таблица указывает на результаты опытов*:

Ширина см, . . .	$\frac{1}{2}$	1	$1\frac{1}{2}$	2	3	4	5	6	8	32
Площадь см ² , . .	47	94	141	188	282	376	470	564	752	800
Продолговатость .	47	23,5	15,7	11,7	7,8	5,9	4,7	3,9	2,9	1,3
Сила давления при грузе в 10 ф. на 100 кв. сант.	125	123	120	118	111	108	103	103	99	91

55) Первая строка указывает ширину прямоугольника в сантиметрах, вторая — полную площадь рамки в кв. сантиметрах, третья — продолговатость, или отношение длины одного из 4 прямоугольников рамки к ширине его, наконец, последняя — силу давления в миллиметрах (условная единица в $\frac{1}{100}$ г), приходящуюся на 100 см² площади рамки при грузе в 10 фунтов.

Зависимость между продолговатостью и сопротивлением можно выразить кривой, откладывая продолговатости абсциссами (на оси X-ов), а сопротивление ординатами (на оси Y-ков).

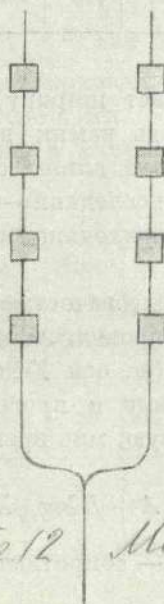
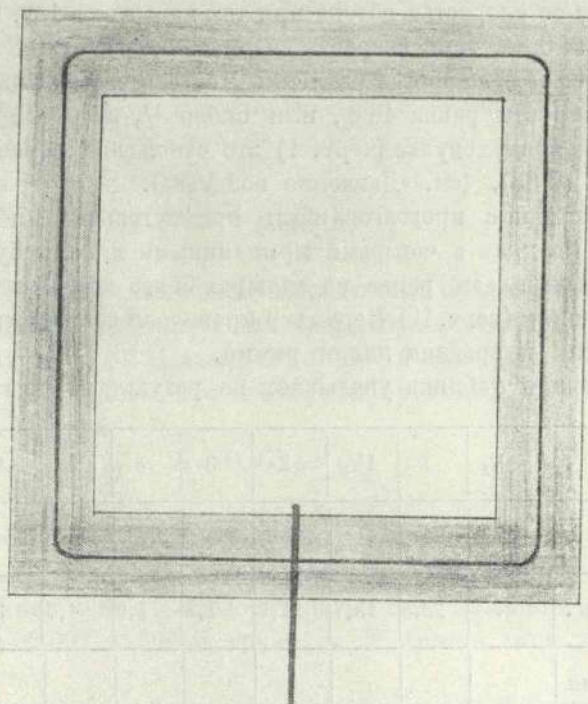
Между полученными точками я провел, по возможности, плавную линию. Рассматривая эту кривую, мне пришлось в голову выразить ее простым уравнением

$$Y = A + B \log_{10} X,$$

где A и B — постоянные, Y — сопротивление, а X — продолговатость прямоугольника.

* Соседство четырех прямоугольников, конечно, не могло не иметь влияние на результаты опытов.

Черт. 10 Масштаб $\frac{1}{2}$



Черт. 12 Масштаб $\frac{1}{4}$

56) Для определения постоянных я в уравнении этом подставил две пары координат, полученных из опыта, именно сопротивления, соответствующие продолговатостям 23,5 и 1,3.

Тогда найдем

$$Y = 88,15 + 25,03 \log_{10} X.$$

Заметим, что последняя строка таблицы выведена из двойного ряда средних наблюдений и что при опыте с прямоугольником продолговатости 1,3 употреблялась, конечно, не рамка, а один прямоугольник больших размеров (закрывающий весь проволочный четырехугольник).

Формула не применяется для продолговатостей больших 25. По формуле сопротивление непрерывно возрастает, хотя и очень медленно, с увеличением продолговатости; по опытам же оно, повидимому, стремится к известному пределу, так что какова бы ни была продолговатость, сопротивление не нужно принимать большим 125—130.

И в таком случае оно больше силы давления на равновеликий квадрат процентов на 40. Такое увеличение не может быть объяснено никакими ошибками в наблюдении и никакими погрешностями в моих приборах. Я бы все-таки немного сомневался в этих выводах, если бы не нашел еще совершенно ясное подтверждение тому же из наблюдений над сопротивлением проволоки и, вообще, удлиненных цилиндров.

Формула также не применяется, когда продолговатость прямоугольника не велика, не превышает, например, 1,3; тогда сила давления определяется так же, как на квадрат.

59) Выходит, что если мы соединяем несколько квадратов в длинный прямоугольник, то сила давления увеличивается. Это увеличение тем больше, чем ближе квадраты друг к другу. Сила давления на ряд близких квадратов более, чем на тот же ряд, но более удаленных друг от друга квадратов.

Этот довольно деликатный опыт производится с помощью модели, изображенной на черт. 12. Квадраты можно сближать и удалять, передвигая их по проволокам.

61) Особенную важность имеет вопрос о сопротивлении продолговатых тел вращения в применении к управляемым аэростатам. Поэтому, хотя и не совсем у места, я занялся определением сопротивления этих тел (черт. 14). Чертеж изображает наибольшее продольное сечение этих тел. Сечение это, как видно, ограничено дугами двух равных окружностей. Центр каждой модели помещался, как обыкновенно, на средней линии потока, или на его оси. Сопротивление подставок определялось с особым вниманием ввиду малости сопротивления самих тел (см. черт. 2 и 3).

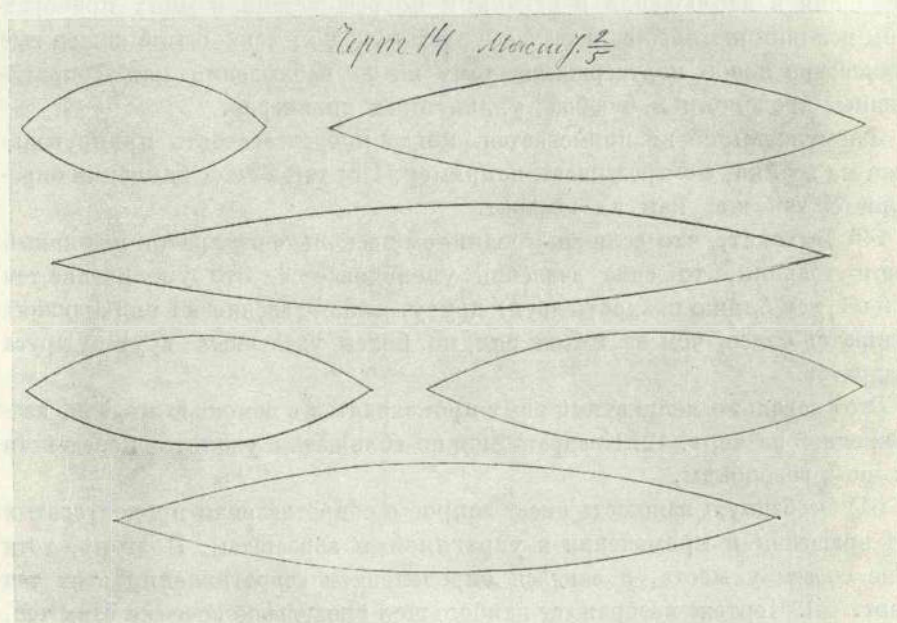
Вот таблица размеров этих тел: [см. стр. 142].

Столбцы по порядку показывают: длину окружности среднего поперечного сечения, его диаметр, площадь, длину тела и продолговатость

Таблица

Окружность	Диаметр	Площадь поперечного сечения	Длина	Продолговатость
1	2	3	4	5
32,0	10,2	82,0	23,5	2,30
32,0	10,2	82,0	34,0	3,33
32,3	10,3	83,0	42,8	4,15
33,0	10,5	85,5	52,9	5,04
32,5	10,4	84,0	65,0	6,32
32,5	10,4	84,0	77,6	7,40

или отношение длины к наибольшей ширине (диаметру). Линейные размеры выражены в сантиметрах, а площадь — в см².



Черт. 14

65) При расположении продольной оси тел вдоль потока я получил таблицу сопротивлений [см. стр. 143]. В таблице даны силы сопротивления в миллиметрах отклонения стрелки, приходящиеся на 100 см² наибольшего поперечного сечения. Найденные сопротивления я делю

на площадь поперечного сечения таблицы (64) и потом множу на 100. Опыты производились при разных грузах, указанных в 1-й горизонтальной строке таблицы.

Таблица

Вес груза в фунтах	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	
Продолговатость	2,30	21,1	37,1	45,6	54,3	60,5	69,0	75,1	80,0	86,5	94,0	97,3	105,5	108,8
	3,33	12,2	21,0	29,3	37,0	43,0	48,0	53,7	60,0	64,3	71,3	75,9	79,6	83,2
	4,15	13,1	23,1	31,1	38,0	46,0	52,3	65,8	57,1	71,9	75,1	84,8	90,2	95,2
	5,04	14,6	23,6	32,5	41,3	50,0	58,9	68,9	72,5	83,8	88,3	96,4	107,0	112,0
	6,31	14,2	23,0	33,1	43,0	55,2	62,0	72,0	80,0	91,0	101,0	107,6	116,8	125,2
	7,40	16,0	29,0	42,4	53,8	65,6	77,8	89,3	100	111,8	121,1	132,7	143,3	157,6
Скорость в метрах в секунду * . . .	1,14	1,61	1,97	2,28	2,55	2,79	3,02	3,24	3,42	3,61	3,78	3,95	4,11	

Из каждой горизонтальной строки, т. е. для любого тела, мы видим, что сопротивление не пропорционально весу груза, или квадрату скорости потока.

Так, когда груз увеличивается с 10 до 100 фунтов, или в 10 раз, то сопротивление увеличится не в 10 раз, а гораздо меньше; именно, для тел разной продолговатости, по порядку, в следующее число раз:

4,5 5,9 5,8 6,7 7,1 7,6

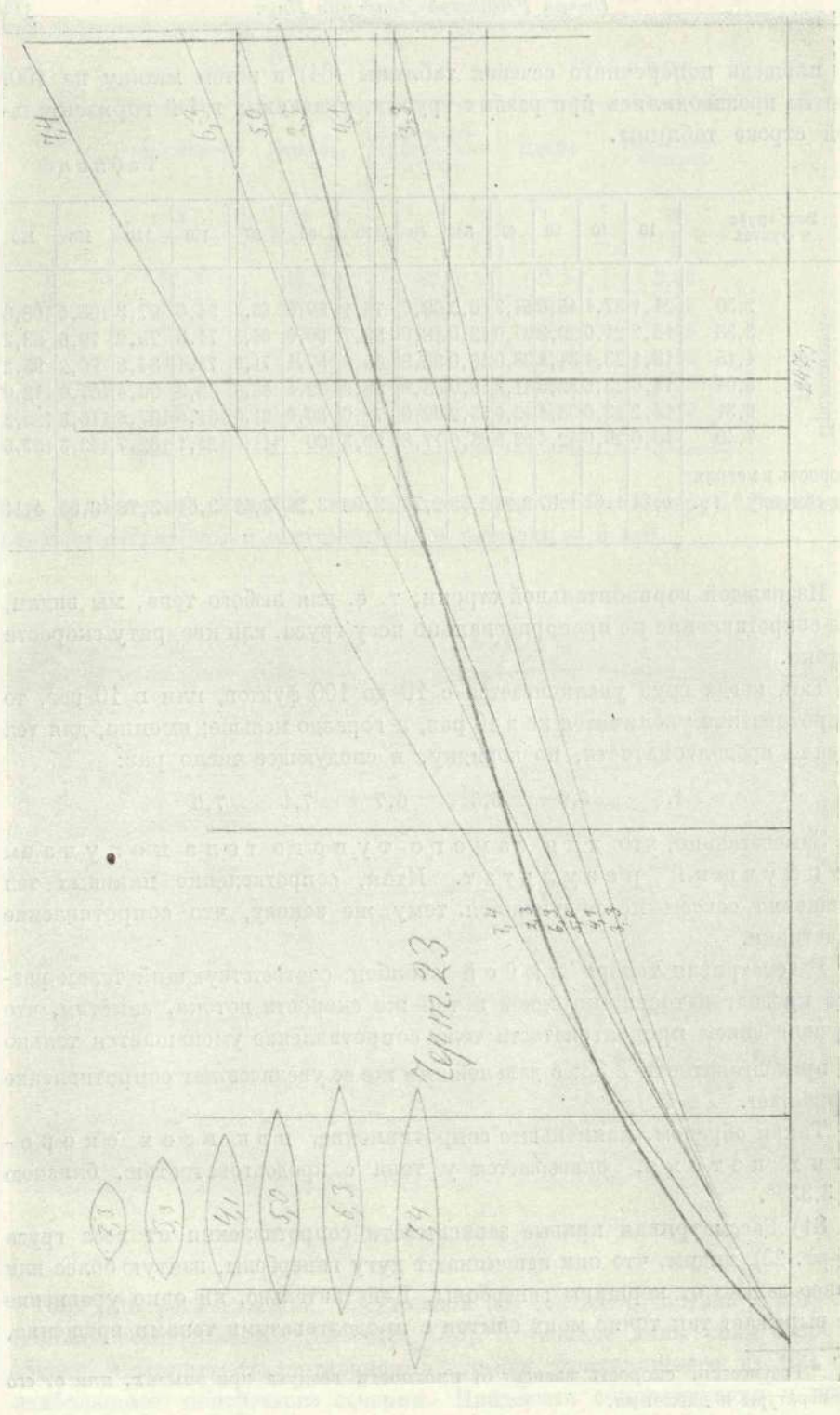
Замечательно, что для самого тупого тела получаем наилучший результат. Итак, сопротивление плавных тел вращения совсем не подчиняется тому же закону, что сопротивление пластинки.

Рассматривая теперь любой столбец, соответствующий телам разной продолговатости, но одной и той же скорости потока, заметим, что с увеличением продолговатости тела сопротивление уменьшается только до продолговатости 3,33; с дальнейшим же ее увеличением сопротивление возрастает.

Таким образом, наименьшее сопротивление, при всех скоростях потока, оказывается у тела с продолговатостью, близкою к 3,33¹⁸.

81) Рассматривая кривые зависимости сопротивления от веса груза (черт. 23), видим, что они напоминают дугу гиперболы, взятую более или менее далеко от вершины гиперболы. Действительно, ни одно уравнение не выражает так точно моих опытов с продолговатыми телами вращения,

* Разумеется, скорость зависит от плотности воздуха при опытах, или от его температуры и давления.



как уравнение гиперболы относительно прямоугольных координат, начало которых лежит на кривой, на некотором расстоянии от вершины гиперболы.

82) Предполагая, что оси координат параллельны осям симметрии гиперболы, получим такое ее уравнение:

$$y = \sqrt{Ax^2 + Bx + C} - D,$$

где ордината y выражает сопротивление, а абсцисса x — вес груза, производящего ветер; A , B , C и D суть постоянные положительные числа. Для определения их надо взять четыре пары координат из кривых сопротивления.

83) Решая для каждой продолговатости систему из 4 уравнений, найдем следующие значения A , B , C и D :

П о с т о я н н ы е

Продолговатость	A	B	C	D
2,30	0,0910	99,0	137,0	11,7
3,33	0,0858	82,1	858,5	29,3
4,15	0,22635	80,3	709,67	26,64
5,04	0,4676	116,31	1927,21	43,9
6,31	0,5138	234,74	8742,25	93,5
7,40	1,084	138,84	1616,0	40,2

90) Отсюда как будто вытекает, что наивыгоднейшая продолговатость близка к 3 и что наибольшая полезность формы не превышает 32. Относительно последнего обстоятельства я произвел ряд опытов с телами одной формы (т. е. с телами подобными), но разных размеров, которые показали, что с увеличением размеров тела полезность его формы также увеличивается.

91) Мною было сделано три продолговатых тела с удлиненностью в 4,2 (черт. 24).

Поперечное сечение было квадратным. Каждое из тел я устраивал так: на картоне я вычерчивал кривую по уравнению

$$y = A \cdot \cos x,$$

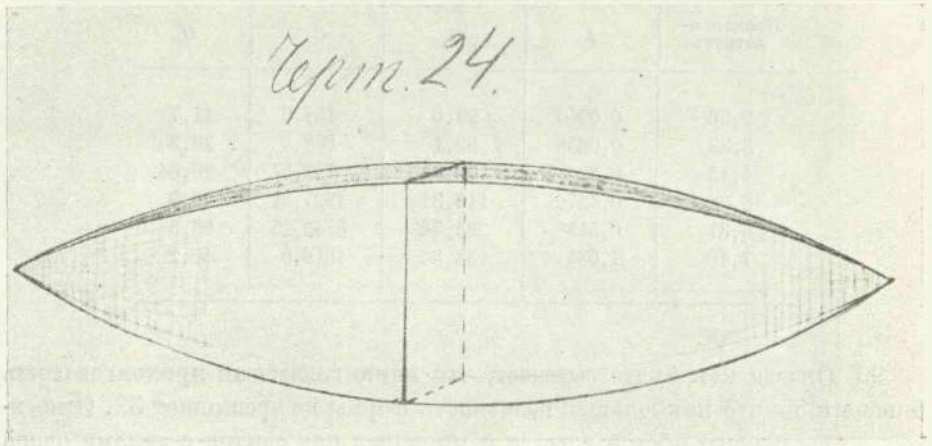
где A — постоянное, меньшее единицы. Двумя такими равными кривыми я ограничивал пластинку картона, так что получался симметричный продолговатый листик. Из четырех одинаковых листиков склеивалась одна форма. Размер наибольшего тела в длину составлял 68 сант.; другое тело было вдвое меньших линейных размеров, третье — еще вдвое меньше.

92) Полезность этих форм приведена в следующей таблице:

Длина (см)	Площадь сечения в см. ²	Груз в фунтах					
		4	8	16	32	64	128
17	17,6	4,7	4,4	4,9	6,9	7,4	7,9
34	66,0	4,7	5,1	5,4	7,1	8,2	9,5
68	263,0	5,4	6,3	6,9	8,0	8,8	9,9

Горизонтальные строки показывают, как возрастает полезность с увеличением веса груза.

Столбцы же указывают на возрастание полезностей при увеличении размеров, но без изменения скорости потока. Опыты эти грубы, но они



Черт. 24

несомненно выясняют, что с увеличением абсолютных размеров тела возрастает и полезность формы*.

93) Полезность самых продолговатых тел вращения, полученная из наших опытов, может еще многократно увеличиться с увеличением их размеров до размеров воздушного корабля.

А у каких тел это увеличение будет идти быстрее — у слабо или сильно продолговатых — это вопрос, решение которого я откладываю до будущего.

* Аналогичное явление я наблюдал весьма явственно и при подобных опытах в воде. Корабельным инженерам это должно быть отлично известно. Опыты в воде для определения сопротивления формы корабля производятся только с моделями значительной величины.

101) Для определения сопротивления наклонных пластинок я, для начала, употребил 3 квадрата разных размеров (25, 100 и 400 см²) и два одинаковых прямоугольника с продолговатостью 3 и с площадью в 48 см² (4 × 12). Прямоугольник располагался длиною своею стороною то вертикально, то горизонтально. Прямоугольники эти могли поворачиваться вокруг вертикальной оси на определенное число градусов. Для измерения угла между пластинкой и направлением воздушного потока, с задней стороны прямоугольника (или квадрата) прикрепляется горизонтально небольшой бумажный транспортир. Стрелка же, скрепленная с осью вращения (т. е. с неподвижно укрепленной проволокой, на которой вращался прямоугольник), указывала по транспортиру величину уклонения пластинки от направления потока.

102) При углах от 90 до 50° измерительный прибор располагался, как обыкновенно; при углах же от 40 до 0° прибор (ящик с водой, со стрелкой и со всем плавающим в воде) становился в положение, перпендикулярное к прежнему (см. черт. 29, 30 и 4).

103) В первом случае для того, чтобы узнать нормальную к пластинке составляющую силы давления ветра, надо полученное из опыта сопротивление делить на синус угла наклона; во втором же случае следует, для определения той же составляющей, перпендикулярной к пластинке, делить полученное сопротивление на косинус угла, образуемого направлением потока с плоскостью пластинки¹⁹.

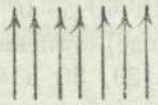
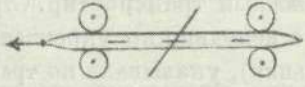
107) Опыты привели меня к следующей таблице для трех квадратов и двух прямоугольников.

Таблица

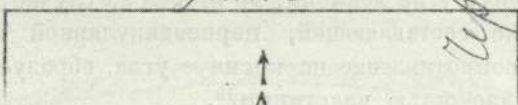
Углы наклона пластинки к потоку	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90
20 × 20 = 400 см ²	11,5	24,7	41,6	57,0	75,0	86,0	88,3	90,0	90,3	89,2	87,5	87,5
10 × 10 = 100 см ²	11,6	26,7	38,8	54,8	68,1	78,7	88,0	92,0	93,8	93,4	91,6	92,0
5 × 5 = 25 см ²	—	17,5	29,2	40,4	—	66,3	80,4	87,8	88,7	90,6	91,9	92,0
Длинная сторона прямоугольника нормальна к потоку (4 × 12 см)	20,7	41,3	58,5	66,4	77,3	71,2	75,4	90,0	94,5	99,6	97,2	98,4
Короткая сторона нормальна к потоку (12 × 4 см)	3,0	13,0	22,2	29,0	45,8	61,2	84,5	98,0	97,8	97,1	97,7	99,0

1) При движении по окружности радиусом R и частотой ν центростремительное ускорение равно $a_{цс} = 4\pi^2 R \nu^2$. Если частота ν задана в оборотах в секунду, то $\nu = \frac{1}{T}$, где T — период обращения. Тогда $a_{цс} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$. Если частота задана в секундах (угловых), то $\omega = 2\pi \nu$, и $a_{цс} = R \omega^2$.

2) При движении по окружности радиусом R и частотой ν центростремительное ускорение равно $a_{цс} = 4\pi^2 R \nu^2$. Если частота ν задана в оборотах в секунду, то $\nu = \frac{1}{T}$, где T — период обращения. Тогда $a_{цс} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$. Если частота задана в секундах (угловых), то $\omega = 2\pi \nu$, и $a_{цс} = R \omega^2$.

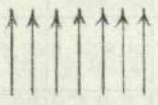


Учебное

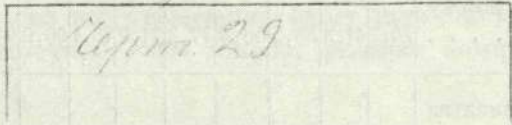


Упр. 30

Упр. 29, 30



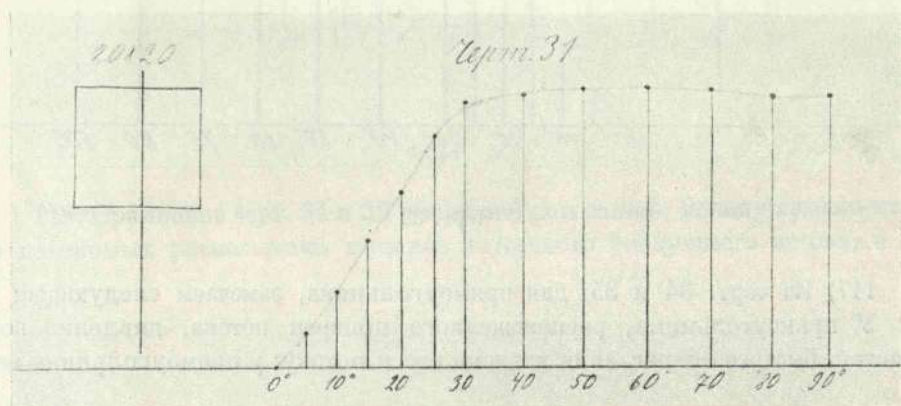
Учебное



Упр. 29

108—109) Первая строка указывает наклон пластинки к потоку. Следующие 3 — величину силы давления на квадраты разных площадей (см. 1-й столбец). Последние две — силу давления на один и тот же прямоугольник, с продолговатостью 3, но расположенный то длиною стороною перпендикулярно к потоку, то короткою. Необходимо помнить, что все силы давления приведены к площади в 100 см^2 и к грузу в 10 фунтов.

112) Сравнивая числа давлений на 2 большие квадрата (в 400 и 100 см^2) замечаем, что эти числа не очень разнятся между собою; видим так же, что при 60 — 50° наклона давление имеет максимум, который превышает перпендикулярное давление ветра процента на 2—3.



Черт. 31

113) Почему малый (25 см^2) квадрат дал числа, значительно разнящиеся от чисел, соответствующих большим квадратам, разьяснить не берусь. Скажу только, что с особенною тщательностью и многими проверками производился опыт с квадратом в 100 см^2 .

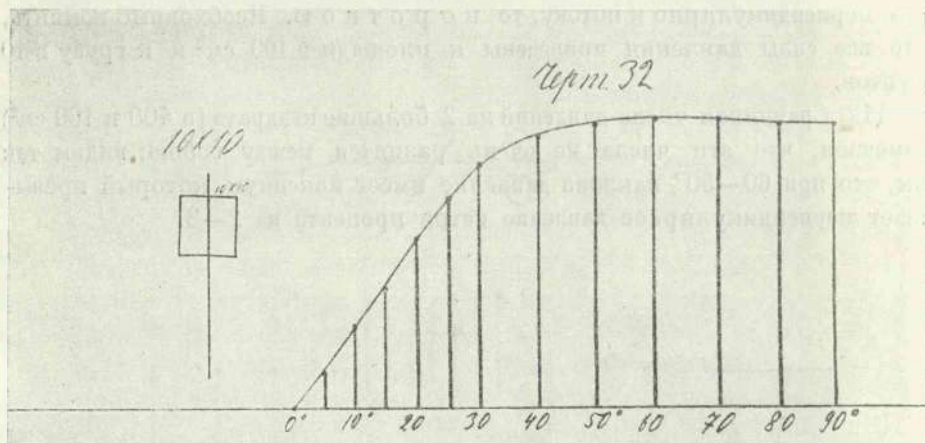
114) Интересно сравнить давления на один и тот же прямоугольник (см. две последние строки таблицы), при одном их угле наклона к потоку.

Так, при наклоне в 10° , давление на прямоугольник, расположенный вдоль потока, раза в 3 меньше, чем когда тот же прямоугольник расположен поперек потока. При увеличении наклона, это отношение давлений непрерывно уменьшается, так что при 30 — 40° оно уже близко к единице.

115) Давление на квадрат, при одинаковых условиях, составляет нечто среднее между давлениями на равновеликие ему прямоугольники, расположенные, как объяснено.

Кривые, построенные на основании таблицы (см. черт. 31—35), дают наглядное понятие о законах давления на квадрат и прямоугольники.

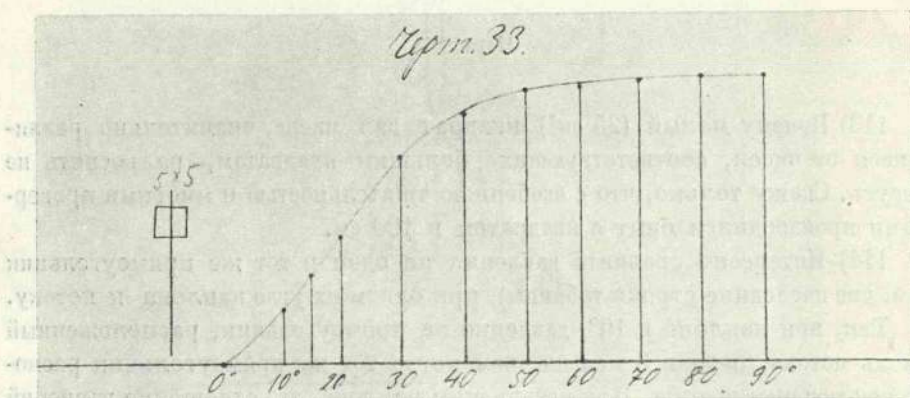
116) Из первых трех чертежей, для квадратов, видим, что нормальное давление мало изменяется при углах наклона от 50 до 90° . Далее видим, что при очень острых углах давление возрастает быстрее, чем наклон.



Черт. 32

117) Из черт. 34 и 35, для прямоугольника, замечаем следующее:

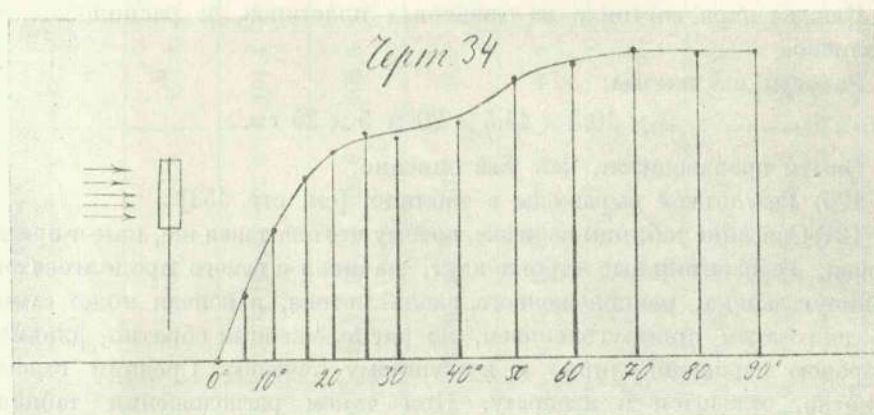
У прямоугольника, расположенного поперек потока, давление возрастает быстрее возрастания наклона его к потоку; у прямоугольника же,



Черт. 33

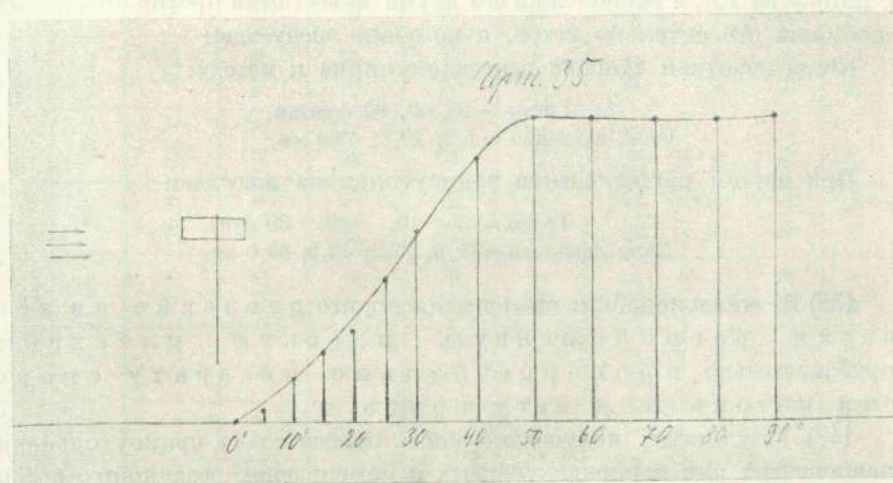
расположенного вдоль потока, наоборот (как и у квадрата); у первого прямоугольника быстрое возрастание давления сопровождается далее падением его при углах около $30-40^\circ$; у второго же медленное первоначальное

чальное возрастание сопровождается далее быстрым подъемом давления и максимумом его близ угла наклона пластинки в 50° .



Черт. 34

118) Сравнение черт. 34 и 35 объясняет нам также, почему крылья птиц и насекомых расположены поперек встречного воздушного потока, а не



Черт. 35

вдоль. Действительно, такое расположение, при малых углах наклона, увеличивает силу давления в несколько раз сравнительно с обратным расположением крыльев.

119) Предыдущие опыты производились с картонными пластинками толщиной немного менее миллиметра. Теперь я сделал, по тому же образцу, 4 пары прямоугольников из жести, толщиной в $\frac{1}{3}$ мм.

Каждая пара состояла из одиночных пластинок, не расположенных различно.

Размеры их таковы:

$$5 \times 10,5 \times 15,5 \times 20 \text{ и } 5 \times 25 \text{ см.}$$

Опыты производятся, как уже описано.

120) Результаты выражены в таблице: [см. стр. 153]

124) Описание таблицы излишне, потому что она такая же, как и предыдущая. Горизонтальные строки идут, начиная с самого продолговатого прямоугольника, расположенного вдоль потока, и кончая тоже самым продолговатым прямоугольником, но расположенным обратно, длинной стороною перпендикулярно к воздушному течению. Средняя строка, понятно, относится к квадрату. При таком расположении таблицы ясно видно, как давление при одном наклоне непрерывно возрастает с возрастанием продолговатости. Это замечается градусов до 25—30; далее давление мало изменяется, несмотря на различие продолговатости. До этого же угла разница в давлениях двух прямоугольников тем более, чем угол наклона их к потоку менее ²⁰.

134) Взяв прямоугольник с продолговатостью в 4 (5×20), наклонный к потоку на 10° , и расположив его двумя известными противоположными способами относительно ветра, я получил следующее:

Когда короткая сторона перпендикулярна к потоку:

Грузы = 10, 40, 80 фунтам.

Сила давления = 5,2; 20,3; 40,0 мм.

При другом расположении прямоугольника получено:

Грузы = 5, 10, 20, 30 фунт.

Сила давления = 12,6; 24,1; 43,9; 65,0 мм.

135) Из этих и подобных опытов найдено, что давление на всячески расположенную плоскую пластинку приблизительно пропорционально квадрату скорости потока или весу груза.

147) Результаты, полученные мною относительно прямоугольников, наклоненных или перпендикулярных к направлению воздушного потока, я не могу сравнить с результатами других исследователей, хотя давно известно, что одна и та же продолговатая наклонная пластинка испытывает большую силу давления, если длинное ее ребро будет перпендикулярно к потоку (Ланглей, Аман). Может быть и есть другие более подробные опыты, но мне они неизвестны*.

* Теперь мне известно, что кривые, полученные Ланглеем, близки к моим.

Давления приведены к 100 кв. см и к грузу в 10 фунтов

Угол наклона к потоку в градусах	Давления приведены к 100 кв. см и к грузу в 10 фунтов															
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90		
25 × 5	3,2	7,8	16,6	24,2	39,2	49,9	62,5	72,7	86,0	101,0	106,5	104,0	103,4	104,9		
20 × 5	6,6	13,6	21,1	31,5	42,8	53,6	69,6	78,3	89,1	102,8	103,1	103,5	101,4	102,3		
15 × 5	7,2	14,6	24,5	36,0	50,0	64,1	75,5	85,0	91,3	98,7	97,8	100,6	100,8	102,6		
10,5	6,4	16,00	32,00	44,00	59,60	74,36	88,50	98,2	101,0	102,9	99,5	97,2	98,0	95,8		
Квадрат 10 × 10	11,6	26,7	38,8	54,8	68,1	78,1	—	88,0	—	92,0	93,8	93,4	91,6	92,0		
5 × 10	16,4	32,5	48,0	61,3	66,7	67,9	70,8	78,8	82,0	89,0	96,4	97,0	95,6	96,0		
5 × 15	23,7	42,5	40,7	64,1	73,6	76,4	75,9	77,3	81,1	86,9	94,1	98,6	100,3	95,3		
5 × 20	23,0	44,3	62,1	70,2	74,4	76,7	72,4	80,0	86,0	95,4	98,0	102,0	101,8	99,5		
5 × 25	22,7	42,7	61,9	68,4	69,6	75,0	74,4	77,6	81,4	91,5	102,3	105,6	108,5	106,7		

Короткая сторона перпендикулярна к потоку

Длинная сторона перпендикулярна к потоку

148) Но мы можем сравнить наши исследования относительно давления ветра на наклонный квадрат с другими такими же.

Однако большею частью предполагается, что законы давления на квадрат применяются равносильно и ко всякой продолговатой пластинке, что составляет — если опыты мои предыдущие верны — большое заблуждение.

Для сравнения мы возьмем формулы Ньютона, Лессля, Релей (или Герляха), Ланглей (или Дюшмена) и мои прежние опыты 1897—1898 годов.

По формулам этим составим следующую таблицу давлений на наклонную непродолговатую пластинку. Давление, перпендикулярное к пластинке ветра, мы принуждены принять за единицу, ибо в этом отношении разногласия между учеными ужасающая. У меня тоже, с квадратами разной величины, получились результаты, не вполне сходные между собою.

Но так как с квадратом в 100 см² я произвел особенно тщательные опыты (давление определялось не менее двух раз, при поворачивании на одно число градусов вправо и влево от направления воздушного течения), то в таблице я привожу числа, относящиеся именно к этому квадрату.

Углы в градусах	5	20	35	50	60	90
Ньютон $F = F_1 \cdot \sin^2 i$	0,0076	0,117	0,330	0,587	0,750	1
Лессль, $F = F_1 \cdot \sin i$	0,0870	0,342	0,574	0,766	0,866	1
Релей и Герлях, $F = F_1 \frac{(4 + \pi) \sin i}{4 + \pi \cdot \sin^2 i}$. .	0,1450	0,470	0,708	0,819	0,920	1
Ланглей и Дюшмен $F = F_1 \frac{2 \sin i}{1 + \sin^2 i}$. .	0,1730	0,612	0,864	0,966	0,990	1
Мои опыты 1897—1898 гг.	0,1370	0,614	1,023	0,091	1,076	1
Теперьшние мои опыты 1900—1901 гг.	0,1300	0,600	0,925	1,005	1,022	1

В формулах таблицы F означает силу давления на наклонный квадрат; F_1 — силу давления на квадрат, нормальный к направлению ветра; i — угол наклона пластинки к потоку в градусах; π — отношение длины окружности к диаметру.

149) Если сравнить, при 5° наклона, числа Ланглея и Ньютона, то найдем, что Ланглей дает для давления число в 23 раза большее, чем Ньютон. При более острых углах разница еще увеличивается.

Несмотря на это, формуле Ньютона пока еще отводится почетное место в разных инженерных книжках и не только в применении к воздуху, но

и в применении к мореходству (определение силы давления воды на корабль при его движении).

Эта формула до сих пор рекомендуется Прусской строительной Академией при определении силы давления ветра на наклонную плоскость. Все это показывает, с какой поразительной медленностью проникают новые знания даже в ученую среду.

150) Рассматривая таблицу, видим непрерывное увеличение чисел давления с течением времени. Так, наименьший ряд чисел дает формула Ньютона, наибольший ряд даю я, если не считать острые углы, при которых наибольшее сходство у меня обнаруживается сначала с числами Релея и Герляха (теория), а затем Лангilea (опыт).¹

Между прежними моими опытами и теперешними, повторенными несколько раз, также обнаруживается разница, при средних углах, доходящая до 9%.

151) Если верить моим опытам, то при острых углах, не больших 10°, вернее применять формулу лорда Релея. При углах же, больших 15°, вернее формула Лангilea; к тому же она и проще.

152) Еще проще применять для острых углов от 5 до 35 формулу Лессля, если только изменить ее коэффициент. Тогда получим

$$F = F_1 \cdot 1,7 \cdot \sin i.$$

По этой формуле вычислим таблицу давлений для углов от 5 до 45° и сравним ее с давлением по моим опытам:

Углы в градусах	5	10	15	20	25	30	35	40	45
По формуле	0,148	0,296	0,440	0,581	0,719	0,850	0,976	1,09	1,20
По моим опытам	0,130	0,280	0,440	0,600	0,745	0,860	0,925	0,97	0,99

Из нее видим, что давления по измененной формуле Лессля отличаются от показаний моего опыта не более как на 5%, при изменении угла от 10 до 35°.

153) Рассматривая первую кривую черт. 36, соответствующую квадрату, видим, что начальная ветвь кривой близка к прямой линии. Следовательно, для выражения давления на наклонный квадрат до 30° наклона, будем иметь еще более простую формулу, а именно:

$$F = A \cdot i,$$

где i есть угол наклона пластинки к потоку в градусах. Тогда, согласно данным опыта, найдем

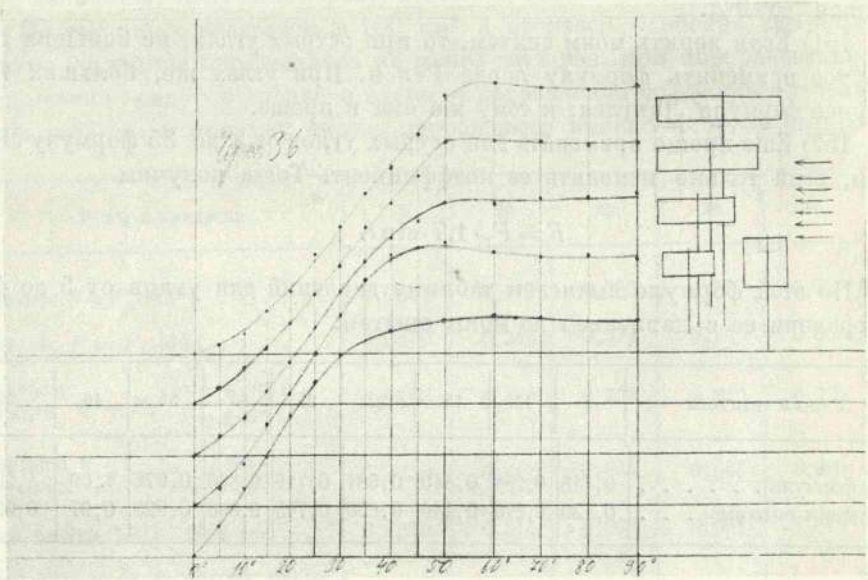
$$F = 2,1 \cdot i,$$

где F выражает давление на 100 см^2 площади при скорости потока в 1 метр в секунду.

По этой формуле вычислим ряд давлений, который сравним с давлениями, найденными из опыта:

Углы в градусах	5	10	15	20	25	30	35	40
Формула	10,5	21	31,5	42	52,5	63	73,5	81,9
Опыт	9	21	32	44	54,5	63	67,7	70,5

Отсюда видим, что до 35° разница сравнительно небольшая.



Черт. 36

154) Вообще, для квадратной, круглой и другой какой-нибудь непродолговатой пластинки можем положить

$$F = 2,1 \cdot i \cdot S \cdot v^2,$$

для практических единиц (метр, килограмм)

$$F = 0,0021 \cdot i \cdot S \cdot v^2.$$

155) В случае расположения прямоугольника, эллипса или другой продолговатой пластинки поперек потока, так что длинная сторона или

ось ее будет перпендикулярна к направлению потока, мы также можем принять для силы давления столь же простые формулы.

Но чем продолговатее пластинка, тем меньше угол наклона, до которого применима формула.

Составим для продолговатостей от 2 до 5 такие формулы, которые смело можно применять до углов в 10—15°:

Продолговатость	Формула для силы давления
2	$F = 2,7 \cdot i \cdot S \cdot v^2$
3	$F = 3,2 \cdot i \cdot S \cdot v^2$
4	$F = 3,5 \cdot i \cdot S \cdot v^2$
5	$F = 3,6 \cdot i \cdot S \cdot v^2$

Для получения практических коэффициентов надо эти коэффициенты уменьшить в 1000 раз. Например, для продолговатости 5 получим: $F = 0,0036 \cdot i \cdot S \cdot v^2$ килограммов.

Для аэропланов с плоскими и крыльями можно рекомендовать формулы 155, потому, что наимыгоднейший угол наклона аэроплана, как увидим, едва ли превышает 10—15°. Кроме того, выгоды аэроплана требуют продолговатых крыльев, расположенных длиною стороною перпендикулярно к ветру или к встречному воздушному потоку, когда именно и имеют применение последние формулы.

Часто требуется узнать величину составляющей силы давления ветра по направлению самого ветра или по направлению, перпендикулярному к нему.

Наши же формулы дают только нормальную к пластинке силу давления, т. е. приблизительно, не считая трения, — равнодействующую силу.

Если означить эту последнюю через F , то составляющая по направлению ветра будет равна $F \cdot \sin i$, где i — угол наклона скорости ветра к пластинке. Составляющая сила по направлению, перпендикулярному к скорости ветра, выразится в виде: $F \cdot \cos i$.

Опытами мы, собственно, и определяли эти составляющие силы, но вычислением преобразовывали их в силы, нормальные к пластинке.

156) Рассмотрим сопротивление прямого круглого цилиндра. Для опытов я употребил 13 цилиндров почти одинакового диаметра — в 5 см, но разной высоты, от 1 до 25 см; далее — 10 цилиндров диаметром около 10 см и высотой от 3 до 50 см; затем — 5 цилиндров высотой в 25 см, но разного диаметра — от 1,05 до 5 см; еще — два одинаковых цилиндра, толщиной в 0,9 см, а длиною в 39,2 см; эти цилиндры оканчивались заостренными конусами; здесь дана общая длина (39,2) цилиндра с конусами; наконец, употреблена была проволока (круглая) толщиной от 0,365 до 3 мм.

157) Располагая малые цилиндры, с одинаковым диаметром в 5 см, так, чтобы оси их были параллельны направлению потока, и подвергая

их действию потока от груза весом в 32 фунта, получим результаты, которые выражены черт. 43.

Ординаты, в миллиметрах длины выражают миллиметры давления, приведенного к 100 кв. см площади основания цилиндра и к грузу в 8 фунтов (или скорости в 1 м/сек); абсциссы означают продолговатость цилиндра, или отношение длины его к диаметру основания.

159) Из чертежа видно, как давление сначала очень медленно, а потом очень быстро падает; далее падение замедляется, приостанавливается и, наконец, начинает медленно, но непрерывно возрастать.

160) Для проверки предыдущего я произвел такие же точно опыты, только с цилиндрами лучшего устройства и больших размеров, именно 10 см в диаметре.

Эти опыты производились особенно внимательно при грузе в 8 фунтов (т. е. при скорости в 1 м в сек). Результаты видны из черт. 44. Этот чертеж дает нам те же выводы, что и предыдущий, но полного сходства между кривыми на обоих чертежах нет. Ордината, соответствующая абсциссе, равной нулю, выражает давление на цилиндр бесконечно малой высоты, т. е. на круглую пластинку.

161) Эти опыты весьма важны, потому что их результаты применимы ко всем вообще прямым призмам и цилиндрам, имеющим непродолговатое основание (См. «Давление воздуха», § 122).

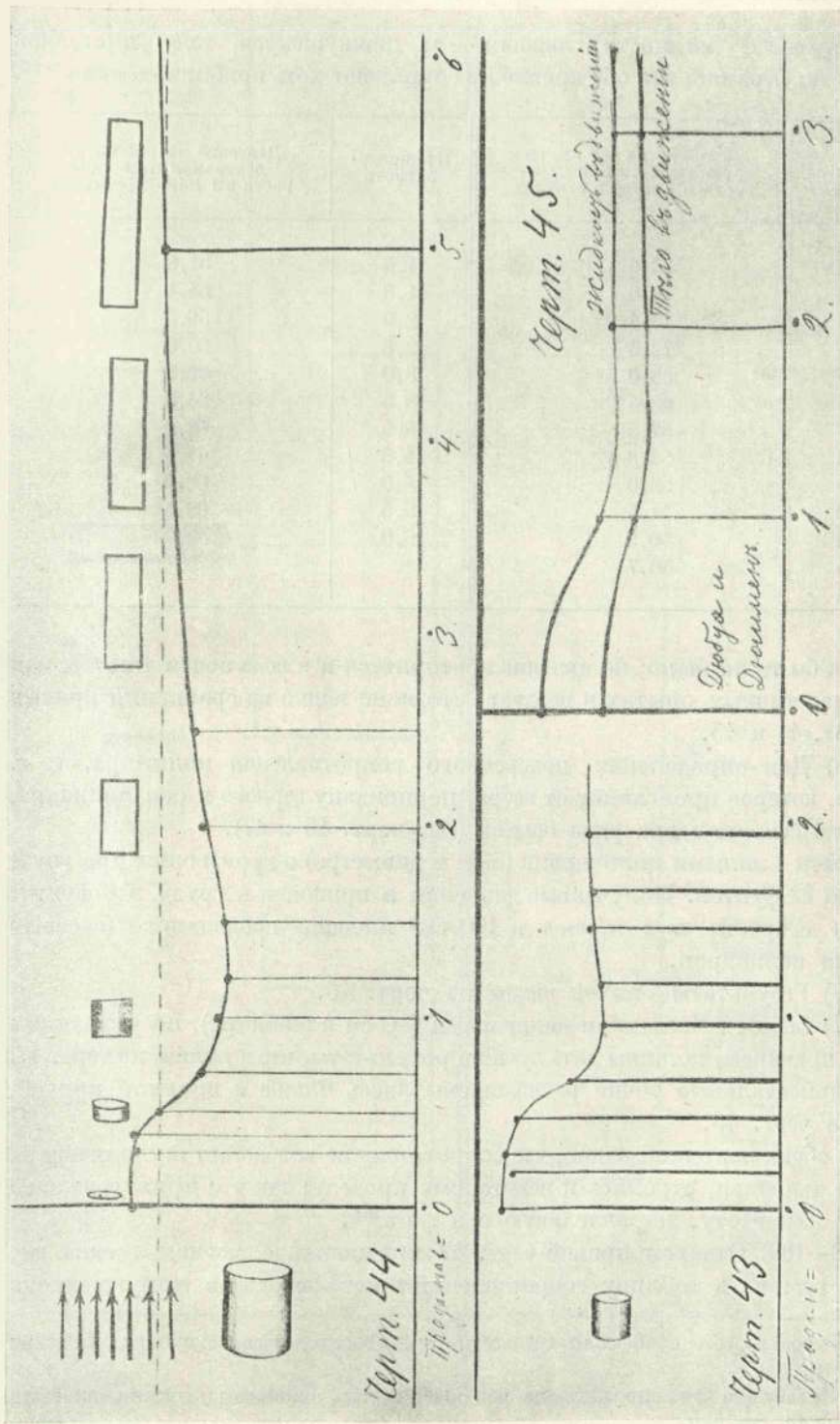
162) Кривая черт. 44, заслуживающая в моих глазах большого внимания, дает возможность определить вероятную величину давлений на основание цилиндра, при разных его продолговатостях²¹. Для этого мы должны выразить в миллиметрах ординаты кривой, соответствующие желаемым абсциссам, т. е. желаемым продолговатостям цилиндров. Тогда получим давление в условных миллиметрах (1 мм соответствует $\frac{1}{100}$ грамма), приходящееся на 100 см² основания цилиндра, при скорости потока в 1 метр в секунду [см. таблицу на стр. 160].

163) Из таблицы этой видно, что при продолговатости, близкой к 1,2, давление на цилиндр наименьшее.

Если нам дана какая-нибудь прямая призма с основанием не очень продолговатым, то силу давления ветра, по направлению ее высоты, мы можем определить по этой таблице или непосредственно по кривой на черт. 44.

Для этого вычислим диаметр круга, площадь которого равна площади основания призмы. Отношение высоты ее к диаметру круга составит продолговатость призмы. Пусть она равна 1,2; тогда, по таблице, найдем давление на призму в 50,5 мм или для практических единиц: $F = 0,0505 \cdot S \cdot v^2$ килограммов, где S есть площадь основания призмы в м².

164) Дюбуа и Дюшмен для призматических тел, при опытах в воде, аналогичных описанным, дали несколько наблюдений, которые я иллюстрирую черт. 45. Верхняя кривая относится к неподвижному телу



в движущейся жидкости, нижняя — к движущемуся телу в стоячей жидкости. Странно, что обе кривые не совпадают хоть приблизительно * 22.

Продолговатость	Давление на 100 кв. см основания при скорости в 1 метр в секунду	Продолговатость	Давление на 100 кв. см основания при скорости в 1 метр в секунду
0,0	73,6	1,6	51,8
0,2	73,6	1,8	54,1
0,3	73,4	2,0	56,5
0,4	72,5	2,5	60,0
0,5	68,0	3,0	62,5
0,6	62,5	3,5	64,5
0,7	57,5	4,0	66,0
0,8	54,6	4,5	67,0
0,9	53,0	5,0	68,0
1,0	51,5	5,5	68,5
1,2	50,5	6,0	69,0
1,4	50,7		

Как бы то ни было, но явление повторяется и в воде почти так же, как при аналогичных опытах в воздухе, что ясно видно из сравнения кривых на черт. 44 и 45.

165) Для определения поперечного сопротивления цилиндра, т. е. такого, которое происходит от ветра, перпендикулярного к оси цилиндра, я также исполнил два ряда опытов (см. черт. 46 и 47).

Опыты с малыми цилиндрами (5 см в диаметре) я производил при грузе от 8 до 32 фунтов. Полученные давления я приводил к грузу в 8 фунтов или к скорости в 1 м/сек и к 100 см² площади продольного (осевого) сечения цилиндров.

166) Результаты опытов видны из черт. 46.

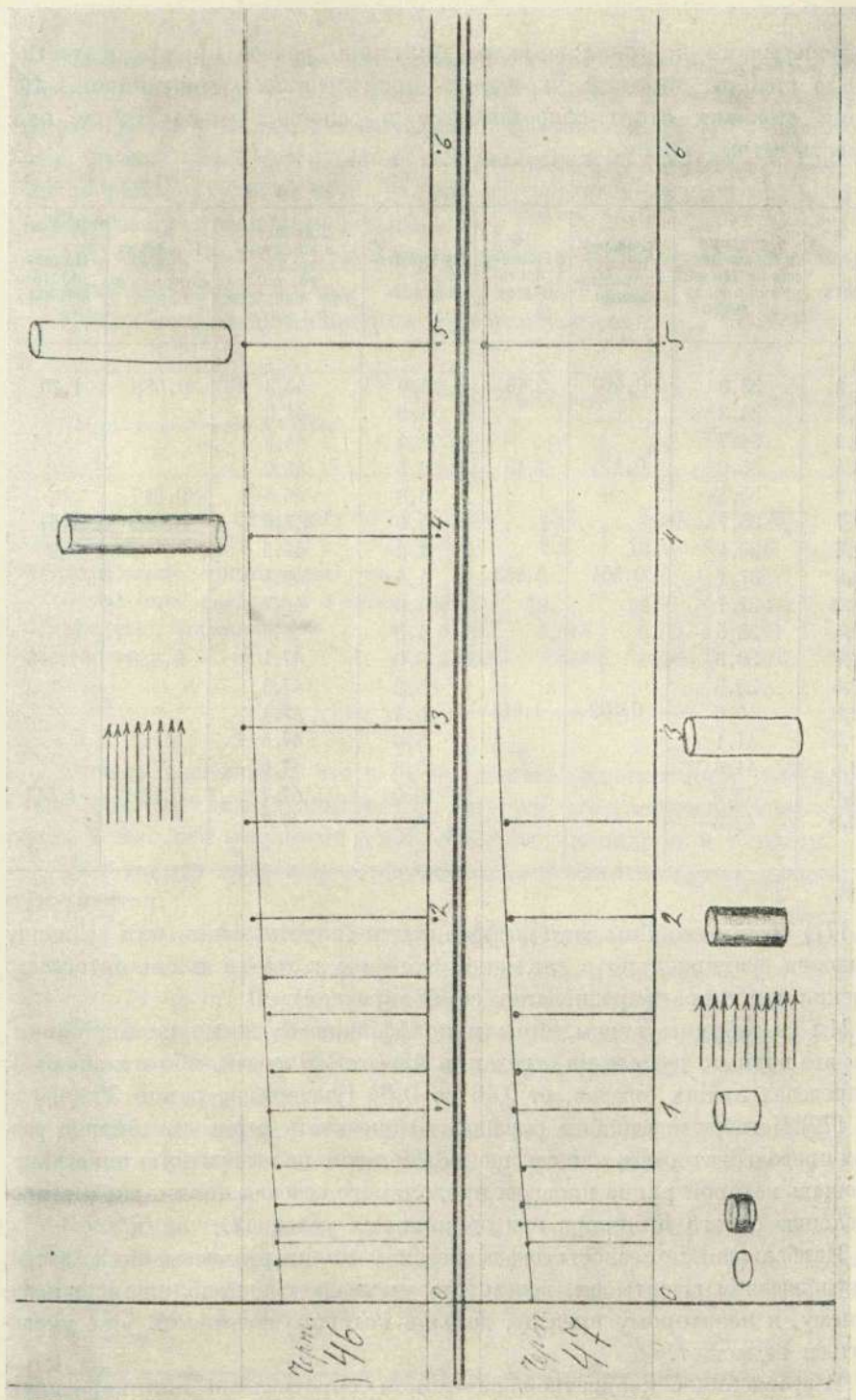
167) Опыты с большими цилиндрами (10 см в диаметре), по указанным ранее причинам, должны дать лучшие результаты, что и видим из черт. 47: экспериментальные точки расположены здесь ближе к плавной кривой, чем на черт. 46.

Из обеих чертежей видно, что сопротивление возрастает с увеличением длины цилиндра, стремясь к некоторому пределу; так что кривая должна иметь асимптоту, параллельную оси x -ов**.

168—169) Отдавая кривой черт. 47 предпочтение, воспользуемся ею, чтобы составить таблицу сопротивлений и коэффициентов сопротивления

* Вероятно, это зависит от трудности точного определения скорости движения жидкости.

** Не забудем, что сопротивления, как почти всегда, приведены к единице площади поперечного сечения.



Черт. 46, 47

для поперечного действия ветра на цилиндры разной продолговатости. Первые столбцы таблицы указывают продолговатость цилиндров. Во вторых столбцах стоит сопротивление в условных мм на 100 см^2 при скорости ветра в м/сек.

Продолговатость	Давление в миллиметрах на 100 см^2 при скорости в 1 м/сек	Коэффициент сопротивления	Полезность формы	Продолговатость	Давление в миллиметрах на 100 см^2 при скорости в 1 м/сек	Коэффициент сопротивления	Полезность формы
0,2	33,8	0,460	2,18	3,0	43,3	0,588	1,70
0,3	34,2			3,2	44,0		
0,4	34,7			3,4	44,5		
0,5	35,0	0,475	2,13	3,6	45,0		
0,6	35,4			3,8	45,4	0,617	
0,7	35,7			4,0	45,8	0,622	1,67
0,8	36,1			4,2	46,2		
1,0	37,1	0,504	1,983	4,4	46,4		
1,2	37,7			4,6	46,7		
1,4	38,5			4,8	46,9		
1,6	39,3			5,0	47,1	0,640	1,563
1,8	39,8			5,2	47,3		
2,0	40,6	0,552	1,813	5,4	47,4		
2,2	41,1			5,6	47,5		
2,4	41,6			5,8	47,6		
2,6	42,3			6,0	47,7	0,648	1,543
2,8	42,3			6,2	47,7		

171) Третьи столбцы дают коэффициенты сопротивления, или величину давления сравнительно с давлением того же ветра на площадь осевого сечения цилиндра (предполагая ее квадратной).

Мы из таблицы видим, что эти коэффициенты далеко не постоянны, как это принято думать на основании известных теорий, ибо изменяются, в пределах наших опытов, от 0,46 до 0,64 (увеличение равно 39%).

172) Четвертые столбцы выражают полезность формы цилиндров разных продолговатостей, или отношение давления на квадратную пластинку, площадь которой равна площади продольного сечения цилиндра, к сопротивлению самого цилиндра при одинаковых условиях.

Наибольшая полезность оказывается у цилиндров невысоких; затем, с увеличением высоты их, полезность уменьшается, приближаясь, повидному, к некоторому пределу, дальше которого полезность уже уменьшаться не может.

В сравнении с квадратной пластинкой сопротивление цилиндра получается в 1,5—2 раза меньшим.

По опытам 1897 г. (см. «Давление воздуха», § 111) коэффициент сопротивления цилиндра с продолговатостью в 2 (длина 10 см, диаметр — 5 см) равен 0,63, т. е. больше, чем по таблице (там стоит 0,552). Разница, в данном случае, объясняется большими размерами цилиндров таблицы. При тех же размерах (см. на черт. 46 ординату при продолговатости 2) получим коэффициент точно такой же.

173) Кроме опытов с этими цилиндрами, я сделал опыты с цилиндрами большей продолговатости — до 44.

Вот таблица этих цилиндров и результаты опытов с ними:

Приведено к грузу в 8 фунт.	При 8 фунт.			При 32 фунт.	
	1	2	3	4	5
Диаметр основания цилиндра в см	3,90	2,87	1,97	1,05	0,90
Продолговатость	6,4	8,7	12,7	23,8	43,6
Сопротивление, приходящееся на 100 см ² при скорости в 1 м/сек	55,2	59,5	58,4	59,4	61,7
Коэффициент сопротивления	0,75	0,81	0,80	0,81	0,84
Полезность	1,333	1,237	1,260	1,237	1,194

Отсюда мы видим, что с возрастанием удлиненности коэффициент сопротивления еще увеличивается. Впрочем, это увеличение можно объяснить и малыми размерами употребленных цилиндров в толщину.

Для тонких проволок коэффициент сопротивления, как увидим, еще увеличится.

175) Проволока также есть цилиндр. Поэтому результаты опытов с сопротивлением проволок я привожу тут же. Результаты эти видны из фиг. 50, 51 и 52. Проволока употреблялась толщиной от 0,365 до 7,1 мм.

179) Проведя по данным опытов плавные кривые зависимости сопротивления от толщины проволоки и измерив ординаты кривых, получим таблицу [см. стр. 164].

Из таблицы видно, что коэффициент сопротивления уменьшается с увеличением скорости потока и, в общем *, с увеличением толщины круглых проволок.

Последние три столбца выражают сопротивление по отношению к сопротивлению квадратной пластинки, площадь которой равна площади продольного сечения проволоки. Из этих столбцов видно, что тонкая

* При очень малой толщине, коэффициент, если верить опытам, уменьшается; это можно объяснить прилипанием воздуха, что делает проволоку как бы более продолговатой в сечении.

Толщина проволоки в мм	Сопротивление в мм, приведенное к площади в 100 см ² и к скорости в 1 м/сек. Скорость равна 1, 2, 3 м/сек. Груз в фунтах:			Коэффициент сопротивления. Скорость в м/сек		
	8	32	72	1	2	3
0,5	91	67	57	1,23	0,91	0,77
1	90	69	61	1,22	0,93	0,83
2	73	66	61	0,99	0,89	0,83
3	69	63	58,5	0,93	0,85	0,79
4	68	61	56,5	0,92	0,83	0,76
5	67,5	60	56	0,91	0,82	0,76
6	67	59,5	56	0,91	0,81	0,76
7	67	59	56	0,91	0,80	0,76
8	67	58	56	0,91	0,79	0,76
9	67	58	56	0,91	0,79	0,76
10	67	58	56	0,91	0,79	0,76

проволока, при малой скорости ветра, представляет даже большее сопротивление, чем плоская пластинка при тех же условиях.

Вывод парадоксальный, но объясняется, с одной стороны, большой продолговатостью проволочного цилиндра, с другой — законами трения, которое (как увидим) весьма велико для малых поверхностей и малых скоростей потока.

Хотя несомненно, что круглая форма сечения проволоки полезна для нее в отношении рассечения ею воздуха, но эту пользу пожирает трение, весьма большое при малых скоростях и коротких (по направлению потока) поверхностях.

Итак, опыты с цилиндрами разной толщины и продолговатости привели нас к тому, что коэффициент поперечного сопротивления цилиндра может колебаться, по крайней мере, от 0,46 до 1,29, между тем как любая из принятых формул, теоретически, дает один коэффициент сопротивления для всякого цилиндра.

Отсюда видна полная неприменимость всех существующих формул и приемов к определению сопротивления цилиндра (да и всех почти других тел и поверхностей).

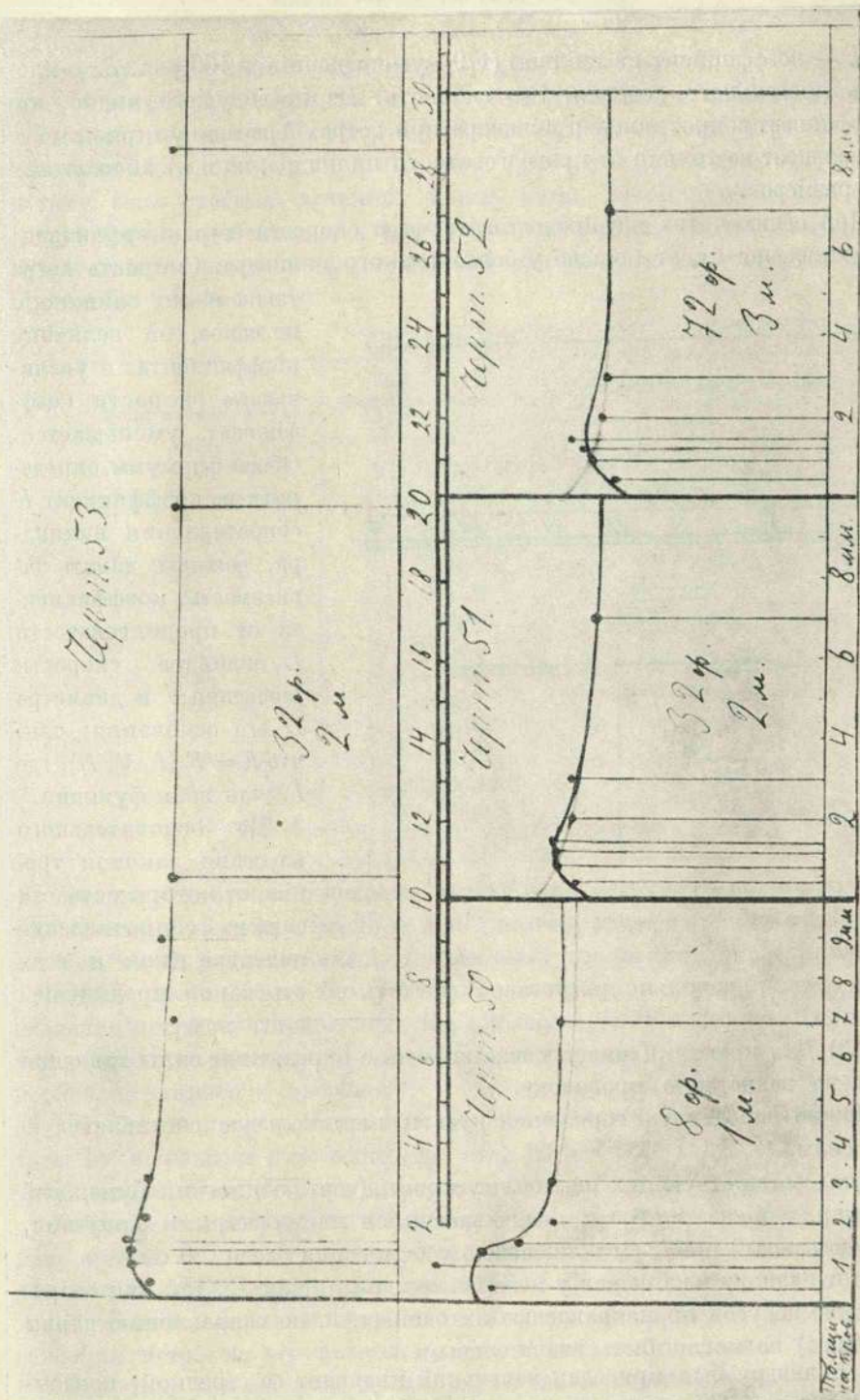
Формула Ньютона дает для цилиндра коэффициент в $\frac{2}{3}$, или 0,667. По Лесслю. найдем величину $\pi/4 = 0,785$. По Ланглею и Релею еще больше.

Конечно, тут сходство с моими опытными коэффициентами может быть только случайное.

181) Сопротивление проволоки равно

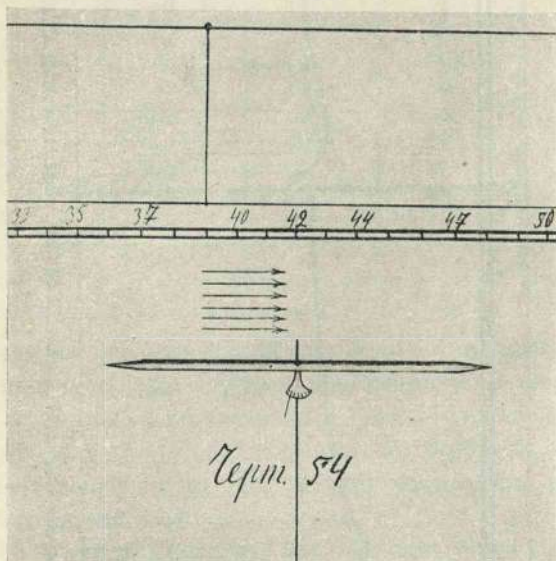
$$F = kSV^2,$$

Черт. 53.



где k — коэффициент из таблицы (179), уменьшенный в 100 раз, S — площадь продольного сечения, V — скорость. Из предыдущего видно, что коэффициент сопротивления цилиндра при ветре, перпендикулярном к его оси, зависит не только от продолговатости цилиндра, но и от абсолютных его размеров.

При одних и тех же продолговатости и скорости ветра коэффициент сопротивления будет больше у более тонкого цилиндра. Скорость ветра



Черт. 54

также имеет влияние, и не малое, на величину коэффициента: с увеличением скорости коэффициент уменьшается. Общие формулы, определяющие коэффициент K сопротивления цилиндра, должны давать зависимость коэффициента от продолговатости L цилиндра, скорости движения V и диаметра D его основания; так, что $K = F(L, V, D)$, где F есть знак функции.

До основательного изучения законов трения, от которых отчасти зависит сопротивление цилиндра (как и всех

других тел), довольно рискованно мечтать об отыскании предыдущей функции.

183) Для практики имеет также значение определение силы давления ветра на наклонную проволоку.

Можно определить горизонтальную и вертикальную составляющую этой силы.

Для соответствующих опытов я устроил (черт. 54) легкий бумажный цилиндр, длиною в 26 см, оканчивающийся двумя острыми конусами, длиною каждый в $4\frac{1}{4}$ см и толщиною у основания около 0,9 см.

Этот цилиндр изображал у меня бесконечный цилиндр, так как сопротивление конусов по направлению их осей (т. е. по направлению длины цилиндра) не могло быть значительным.

К цилиндру был приделан маленький квадрант со стрелкой, показывающей уклонение цилиндра от направления потока.

187) Опыт я производил при трех скоростях потока: в 1, 2 и 3 метра

в секунду. Полученные числа давлений по направлению потока я привел к скорости в 1 м/сек, но не приводил к 100 см² площади продольного сечения. Из полученной таблицы [см. стр. 164] я увидел, что давления при скоростях в 2 и 3 м/сек не очень отличаются друг от друга, и потому взял среднюю величину между ними. Затем давление, перпендикулярное к оси цилиндра, принял за единицу и, таким образом, получил следующую таблицу отношений для разных наклонов цилиндра (будто бы бесконечного).

Таблица

Углы наклона в градусах	Скорость равна 1 м/сек	Скорость равна 2 и 3 м/сек (средний вывод)
	Приведено к скорости в 1 м/сек	
0	0,0824	0,06823
10	0,1029	0,09063
20	0,1440	0,1417
30	0,2471	0,2356
40	0,3871	0,3644
50	0,5354	0,5340
60	0,7041	0,7065
70	0,8646	0,8704
80	0,9773	0,9816
90	1,0000	1,0000

Отсюда видно, что отношения весьма мало разнятся при разных скоростях ветра, начиная с наклона в 10°; поэтому можем принять последний столбец чисел за постоянный, применимый для всякой скорости ветра.

190) Точно таким же способом можем получить и составляющую силы давления ветра по направлению, перпендикулярному к потоку. Для этого измерительный прибор, как всегда в таких случаях, ставим в положение, перпендикулярное к прежнему.

192) Опыты производились при скорости потока в 2 и 3 м/сек и результаты их выражены в таблице [см. стр. 168].

Давление на цилиндр при ветре, нормальном к оси, принято за единицу.

Таблица эта показывает составляющую силы сопротивления, перпендикулярную к потоку, по отношению к наибольшему сопротивлению при ветре, нормальном к оси цилиндра.

Если мы имеем змей с проволокой и нужно узнать вертикальную силу давления ветра на эту проволоку, то пользуемся последней таблицей. Вообще сила давления на проволоку в таком случае будет

$$F = \frac{K}{1000} \cdot K_1 \cdot S \cdot V^2 \text{ кг.}$$

Таблица

Углы наклона в градусах	Коэффициент K_1 (средний вывод из опытов при скорости в 2 и 3 м/сек)
0	0,0000
10	0,06103
20	0,1296
30	0,2034
40	0,2863
50	0,3361
60	0,3263
70	0,2717
80	0,1609
90	0,0000

где K — давление на цилиндр в мм на 100 см^2 при скорости в 1 метр в секунду, K_1 взято из последней таблицы, S — выражено в м^2 , а V — в м/сек.

195) Не исчерпав вопрос о сопротивлении прямых круглых цилиндров, перехожу к цилиндрам прямым, эллиптическим.

У меня приготовлено было 20 моделей таких цилиндров высотой в 10 см, шириною около 5 см и длиною от 5 до 42,3 см. При этом продолговатость их, или отношение длины их к ширине (большой и малой осей эллиптического основания цилиндра), изменялась от 1 до 8,6.

Те же цилиндры я ставил и поперек потока, причем продолговатость принимал меньшей единицы, т. е. я брал для ее выражения обратное отношение: ширины к длине. Оно изменялось от 0,164 до 1. Таким образом, продолговатость варьировала от 0,164 до 8,6.

196) Вот таблица, полученная из наблюдений над цилиндрами, поставленными вдоль и поперек потока. Опыты производились при грузах в 8, 32 и 72 фунта, или при скоростях в 1, 2 и 3 м/сек.

Первый столбец указывает на продолговатость цилиндров; второй, третий и четвертый — на сопротивление, приведенное к 100 см^2 наибольшего перпендикулярного к потоку сечения цилиндра и к 8 фунтам груза или к скорости в 1 м/сек.

Наконец, последние три столбца дают полезность формы цилиндра, при тех же трех скоростях потока — в 1, 2 и 3 м/сек.

198) При цилиндрах очень удлиненных, но поставленных поперек потока, сопротивление близко к сопротивлению квадратной пластинки, равновеликой продольному сечению формы [см. таблицу на стр. 169].

Кроме того, в том случае, когда продолговатость не превышает двух, коэффициенты очень мало зависят от скорости потока. Но при боль-

Таблица

Продолговатость эллиптического цилиндра	Сопротивление в условных миллиметрах, приведенных к скорости в 1 м/сек (8 ф.) и 100 см ² площади проекции. Скорость в м/сек			Полезность формы при скорости в м/сек		
	1	2	3	1	2	3
0,164	70			1,051		
0,173	70			1,051		
0,222	69			1,067		
0,259	67			1,099		
0,297	64			1,150		
0,425	59			1,247		
0,466	57			1,280		
0,610	50,5			1,458		
0,659	49			1,502		
0,715	46			1,600		
0,791	44			1,673		
0,831	43,5			1,692		
1,000	43			1,701		
1,20	42,6		42,40	1,710		1,629
1,27	36,9		32,38	1,996		2,272
1,40	33,2		30,02	2,230		2,44
1,52	32,0		26,89	2,240		2,74
2,00	25,8		23,89	2,850		3,08
2,35	24,8	23,6	22,44	2,97	3,26	3,27
2,96	23,5	19,3	18,16	3,14	3,81	4,06
3,36	22,0	18,6	16,78	3,35	3,96	4,39
3,85	20,0	17,6	16,00	3,70	4,19	4,60
4,51	20,3	16,9	15,33	3,64	4,35	4,78
5,66	18,7	16,9	15,78	3,94	4,35	4,70
6,42	19,0	16,1	15,78	3,90	4,52	4,70
8,63	22,1	19,6	16,29	3,33	3,76	4,515

шой продолговатости цилиндра мы замечаем, что коэффициенты сопротивления убывают с увеличением скорости потока и продолговатости цилиндра. При продолговатости около 6 это убывание коэффициентов приостанавливается и коэффициент даже начинает увеличиваться с дальнейшим увеличением продолговатости.

199) Замечательно, что момент наименьшего сопротивления наступает при одной и той же продолговатости для всех испытанных скоростей потока. Это же явление уже замечено нами и относительно продолговатых тел вращения.

Разница лишь в том, что там коэффициент наименьшего сопротивления наступал при продолговатости вдвое меньшей. У тел вращения наивысшая полезность, при скорости в 3 метра в секунду, выражается числом 11,7; между тем как у эллиптического цилиндра, при той же скорости, она

составляет 4,7, т. е. в два с лишком раза меньше. Впрочем, если взять цилиндр, ограниченный дугами окружностей, т. е. подходящей формы, то наивысшая полезность окажется у него почти ровно вдвое меньше, чем у тела, образованного вращением дуги круга (см. таблицу 219).

204) Следующая практическая таблица дает сопротивления в условных мм, приведенные к 100 см² проекции и к скорости в 1 м/сек.

Таблица

Продолговатость	Сопротивление в мм на 100 см ² площади сечения, приведенное к скорости в 1 м/сек. Скорость в м/сек			Продолговатость	Сопротивление в мм на 100 см ² площади сечения, приведенное к скорости в 1 м/сек. Скорость в м/сек		
	1	2	3		1	2	3
0,0	73,6	Почти то же, что и при скорости в 1 м/сек		3,2	22,0	20	18
0,2	70,0			3,4	21,6	19,6	17,5
0,3	65,5			3,6	21,1	19,1	16,8
0,4	60,5			3,8	20,9	18,7	16,4
0,5	55,5			4,0	20,6	18,4	16,0
0,6	51,0			4,2	20,3	18,1	15,7
0,7	46,5			4,4	20,2	17,8	15,4
0,8	44,5			4,6	20,2	17,6	15,1
0,9	44,5			4,8	20,2	17,6	15,0
1,0	43,0			5,0	20,1	17,5	15,0
1,1	42,5			5,2	20,1	17,6	14,9
1,2	41,0			5,4	20,0	17,6	14,9
1,3	35,0			5,6	20,0	17,5	14,8
1,4	33,0	32	31	5,8	19,9	17,5	14,7
1,6	31	29,5	28	6,0	19,9	17,5	14,6
1,8	29	27,5	26	6,5	20,0	17,7	14,7
2,0	28	26,0	24,5	7,0	20,6	18,0	15,2
2,2	26,5	24,5	23	7,5	21,0	18,5	15,6
2,4	25,5	23,5	22,0	8,0	21,4	19,0	15,9
2,6	24,4	22,4	21,6	8,5	22,0	19,5	16,3
2,8	23,5	21,5	19,5	9,0	22,8	20,4	16,6
3,0	22,8	20,6	18,8				

204) До продолговатости, равной 1,4, коэффициенты очень мало отличаются друг от друга при разных скоростях потока, и потому тут при всякой скорости можно положить сопротивление цилиндра равным $F = K \cdot S \cdot V^2$, где K есть коэффициент из последней таблицы, уменьшенный в 1000 раз, а S есть площадь проекции в м², т. е. площадь среднего сечения цилиндра плоскостью, нормальной к направлению потока.

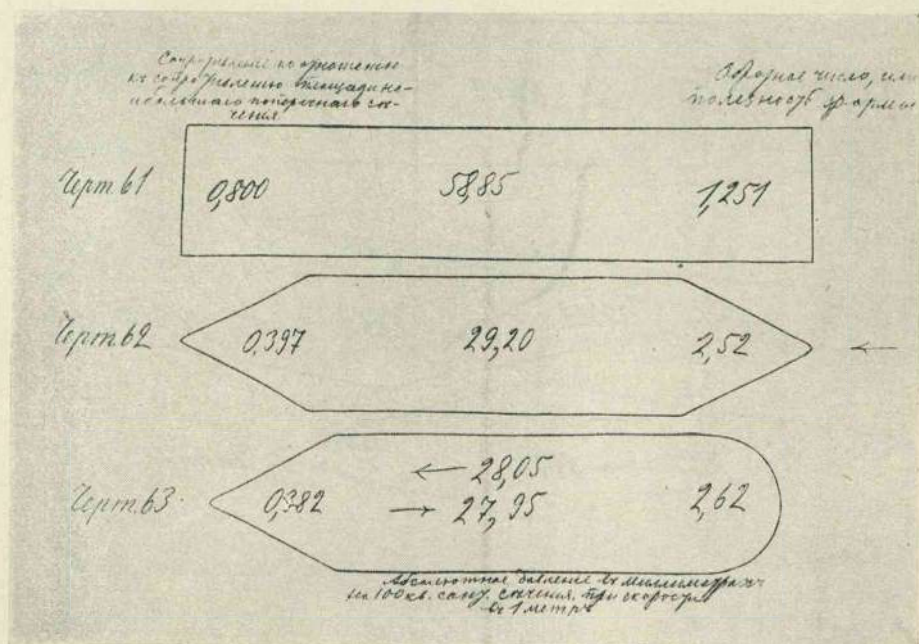
208) Я устроил несколько цилиндров (или прямых призм) с основаниями то многоугольными, то криволинейными, с целью испытать их сопротив-

ление и сравнить его с известным уже нам сопротивлением эллиптического цилиндра.

Продолговатость и все размеры новых цилиндров, приблизительно, были сходны с размерами одного взятого для сравнения эллиптического цилиндра, размеры которого следующие: длина 24,7 см. ширина 5,48 см, высота 10 см.

Продолговатость составляла 4,51*.

Основания всех цилиндров изображены на черт. 61—75.



Черт. 61, 62, 63

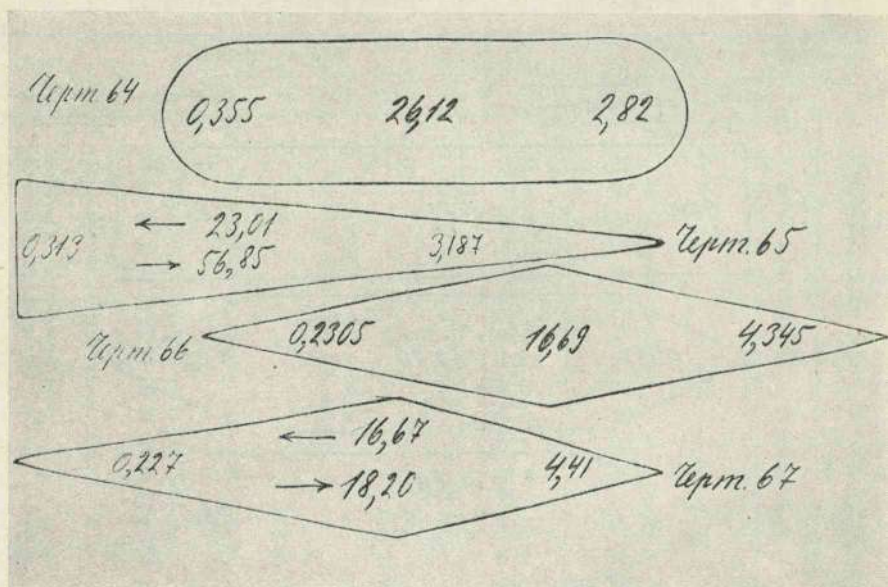
Внутри каждой фигуры поставлено большею частью три числа: одно, среднее, выражает сопротивление в мм (1 мм соответствует $\frac{1}{100}$ г), приходящееся на 100 см² площади проекции, приведенное к грузу в 8 фунтов или к скорости потока в 1 м/сек (тысячные доли этих чисел составляют практические коэффициенты); другое, справа, выражает полезность формы; наконец, третье, слева, есть число, обратное полезности; его мы называли коэффициентом сопротивления по отношению к сопротивлению проекции.

* Для яркого выяснения значения формы надо бы взять тела с продолговатостью вдвое меньшей. При большой же продолговатости (4,5) трение, так сказать, заглушает сопротивление от инерции среды.— Автор.

Если фигура не одинакова спереди и сзади, то в середине ее поставлено, одно под другим, два числа: одно соответствует ветру, дующему с правой стороны (по чертежу), другое — с левой.

Первые 7 цилиндров испытаны при скорости потока в 2 м/сек, остальные — при 3 м/сек.

209) Грубые, угловатые цилиндры, представляющие большое сопротивление потоку, имеют сопротивление, почти пропорциональное квадрату



Черт. 64, 65, 66, 67

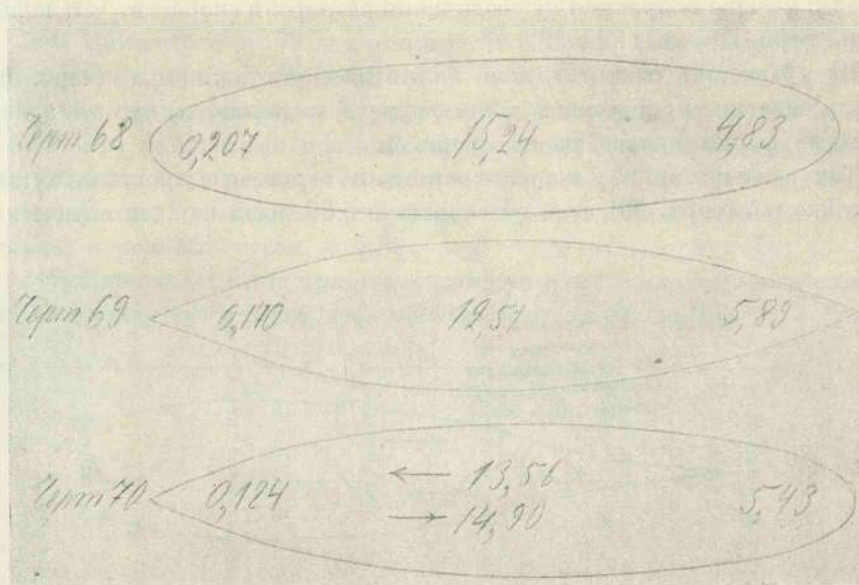
скорости ветра. Но другие цилиндры, хорошей формы, гораздо менее подчиняются этому закону.

210) Из черт. 61 видно, что прямоугольный параллелепипед представляет меньшее сопротивление, чем одна из его граней, обращенная к потоку.

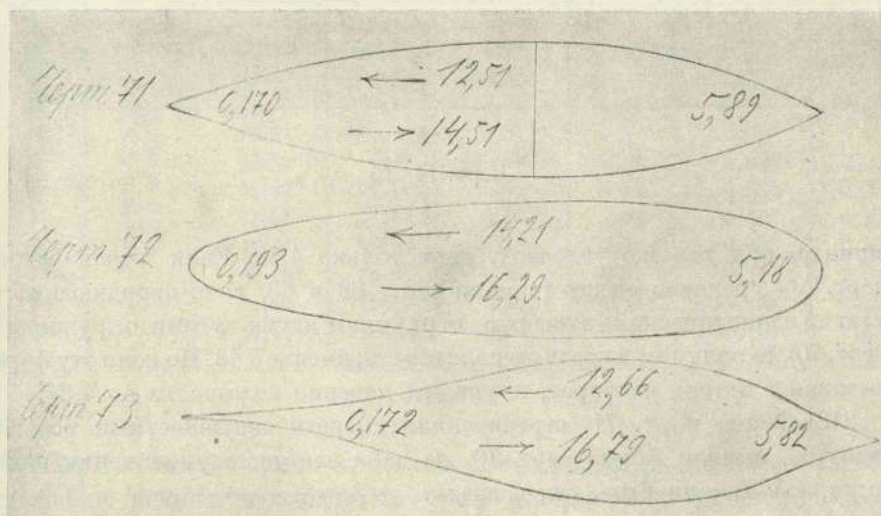
Опыт с моделью 63 показал, что ее сопротивление как при потоке справа, так и при потоке слева почти одинаково.

211) Такой же опыт с кливом (черт. 65) дал, напротив, громадную разницу; именно, при движении двухгранным углом вперед полезность оказалась 3,107; при движении же в обратном направлении полезность упала до 1,295.

Следующие две призмы дали довольно значительную полезность, достигающую 4,41. Признаюсь, я не ожидал столь малого сопротивления от



Черт. 68, 69, 70

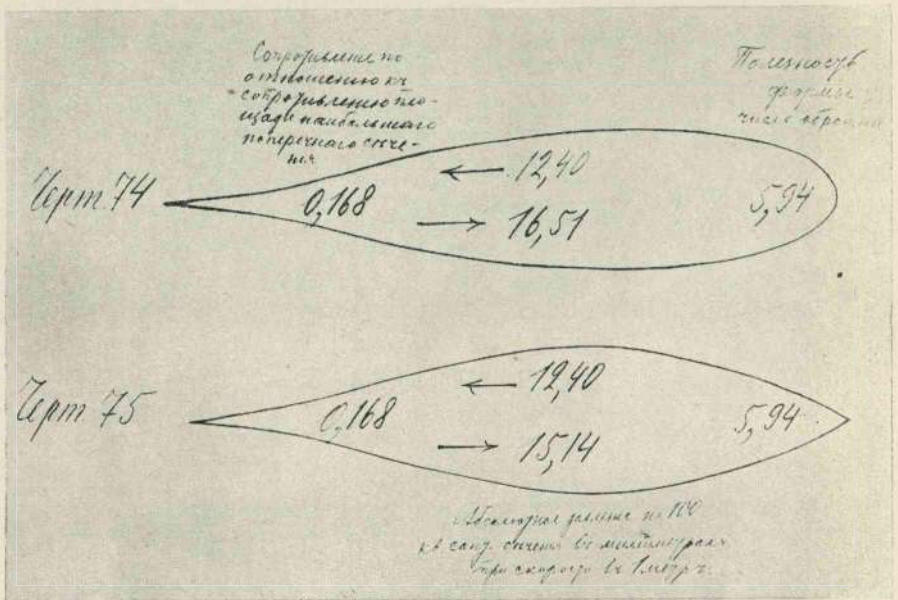


Черт. 71, 72, 73

таких угловатых форм. Но не надо забывать, что полезность этих форм гораздо меньше возрастает от увеличения размеров и скорости, чем полезность форм плавных.

Из сравнения сопротивления эллиптического цилиндра (черт. 68) с сопротивлением следующих за ним моделей оказывается, что эта эллиптическая форма далеко не из лучших.

Так, даже цилиндр, у которого основание ограничено простыми дугами окружностей (черт. 69), дает полезность в 5,89, тогда как эллиптический



Черт. 74, 75

цилиндр, при тех же условиях, дает только 4,83. Если взять форму (черт. 70), среднюю между формами черт. 68 и 69, т. е. переднюю часть оставим эллиптической, а заднюю ограничим двумя дугами окружностей (черт. 70), то получим и среднюю полезность, именно 5,43. Но если эту форму поставим в потоке наоборот, то увидим падение полезности до 4,94.

213) Форма черт. 71, ограниченная спереди окружностями меньших радиусов, нежели форма черт. 70, не дала заметного увеличения полезности, как можно было бы ожидать.

Обратное же положение модели, напротив, сопровождалось заметным падением полезности до 5,08.

Плавная форма, составленная из двух половин эллипсов разной продолговатости (черт. 72), не дала особенно малого сопротивления. Полезность

ее оказалась равной 5,18, а при обратном ветре тонкой частью вперед — 4,52.

214) Цилиндр черт. 73 дал полезность 5,82, а при обратном положении, хвостом вперед — только 4,31.

Лучше оказались формы черт. 74 и 75, которые дали одну полезность в 5,94. Это наибольшая полезность, полученная мною из моих опытов, над цилиндрами, при скорости потока в 3 м/сек. Те же формы, хвостами к потоку, дали полезности: первая, с эллиптической головой, 4,45, а вторая, с угловым носом, в 4,88.

219) Данные о разных прямых цилиндрах и призмах считаем не лишним сосредоточить тут в одной таблице (см. черт. от 61 до 75).

Обозначение фиг. и формы	скорость	Сопротивление, приходящееся на 100 см ² сечения формы, приращенное к скорости в 1 м/сек	То же при обратном ветре	Полезность формы при положении носом вперед	Полезность при обратном положении модели	Число, обратное полезности (нос вперед)	То же, при обратном положении модели
1	2	3	4	5	6	7	8
61	Скорость 3 м/сек (72 ф.); 2 м/сек (32 ф.)	58,85		1,251		0,800	
62		29,20		2,52		0,397	
63		28,05	27,95	2,62	2,63	0,382	
64		26,12		2,82		0,355	
65		23,01	56,85	3,187	1,29	0,313	0,773
66		16,69		4,345		0,230	
67		16,67	18,20	4,41	4,04	0,227	0,248
68		15,24		4,83		0,207	
69		12,51		5,89		0,170	
70		13,56	14,90	5,43	4,34	0,184	0,203
71		12,51	14,51	5,89	5,08	0,170	0,197
72		14,21	16,29	5,18	4,52	0,193	0,222
73		12,66	16,79	5,82	4,31	0,172	0,240
74		12,40	16,54	5,94	4,45	0,168	0,228
75		12,40	15,14	5,94	4,88	0,168	0,206

220) Любопытно сравнить эти числа с данными о сопротивлении воды движению речных плоскодонных судов, которые тоже можно принимать за прямые цилиндры с криволинейным основанием, только, сравнительно, очень низкие.

Для хорошо построенных речных пароходов принимается коэффициент сопротивления от 0,16 до 0,20. Если, согласно Дюбуа и Дюш-

мену, для движущейся перпендикулярно своей плоскости плоской пластинки принять этот коэффициент равным 1,43, то полезность формы лучших речных пароходов будет колебаться между 9,0 и 7,15. Средняя полезность составит около 8,1, что не так далеко от полезности 5,94 лучшей из наших форм (фиг. 74 и 75), при скорости в 3 м/сек. При скорости в 4 м/сек эта полезность доходит даже до 7.

Для лучших речных судов принимают полезность от 6,8 до 5,3, т. е. в среднем 6, что совсем близко к нашим опытам.

Меня изумляет это сходство двух разнородных стихий. Правда, размеры моделей разные, и это должно влиять на полезность форм. Именно, я ожидал от огромных судов гораздо меньшего сопротивления, чем какое принимается на практике; разница же оказалась довольно малой, хотя и в пользу моделей большого размера (т. е. судов).

222) Испытаны мною также крупные части прямого круглого цилиндра.

Я взял цилиндр, высота которого равна диаметру основания (10 см), и разрезал его пополам плоскостью, проходящей через ось цилиндра. Одна такая половина, имеющая вид короткого корыта, ограничивалась двумя полукруглыми боками, другая плоских боков не имела, но полукруг был вклеен в середину цилиндрической поверхности. Цилиндры эти ставились отверстием к ветру, затем наоборот и, наконец, боком; испытывались они при скорости потока в 1 м/сек.

223) Вот результаты, где показаны сопротивления в мм, приходящиеся на 100 см² площади проекции формы.

	Отверстием к ветру	Выпуклостью к ветру	Боком
1. Полуцилиндр с двумя основа- ниями	91,68	38,64	48,71
2. Полуцилиндр с поперечным полукругом в в середине	95,08	46,84	58,61

Отсюда видно, что сопротивление полуцилиндра со средней перегородкой больше, при одних и тех же условиях, чем на полуцилиндр с полукруглыми основаниями, и разница эта достигает 20%.

225) Изогнутая равномерно плоскость также представляет собой часть поверхности прямого круглого цилиндра.

Сопротивление таких равномерно (но мало) искривленных пластинок (т. е. имеющих постоянный радиус кривизны) мы и рассмотрим.

Я взял 4 равных жестяных квадрата (толщина жести 0,3 мм) и изогнул их различно.

226) Вот таблица этих изогнутых квадратов, каждый из которых до искривления имел сторону, равную 10 см. К этой таблице, для полноты, прибавим еще полуцилиндр с двумя основаниями (см. 222 и 223).

Предпоследний столбец указывает на отношение длины хорды к длине стрелки; последний — на обратное отношение, или на степень изгиба пластинки.

№ п/п	Хорда в мм	Стрелка в мм	Отношения	
			$\frac{\text{хорда}}{\text{стрелка}}$	$\frac{\text{стрелка}}{\text{хорда}}$
1	99,3	3,1	32,03	0,031
2	98,0	8,4	11,67	0,086
3	96,0	12,5	7,67	0,130
4	92,3	16,0	5,77	0,173
5	102,5	50,5	2,48	0,493

227) С этими цилиндрическими поверхностями я делал опыты, так же как с квадратными и прямоугольными пластинками, расположенными под углом к ветру.

Но полученные мною давления я не перевожу вычислением на давления нормальные к пластинкам или хордам изогнутых поверхностей.

Если измерительный прибор поставлен обыкновенным образом, вдоль потока, то движение пластинки и плавающего ящика будет тоже вдоль потока, или по ветру. В этом случае, поворачивая хорду пластинки под разными углами к потоку, я определяю сопротивление наклонной цилиндрической поверхности по направлению самого ветра.

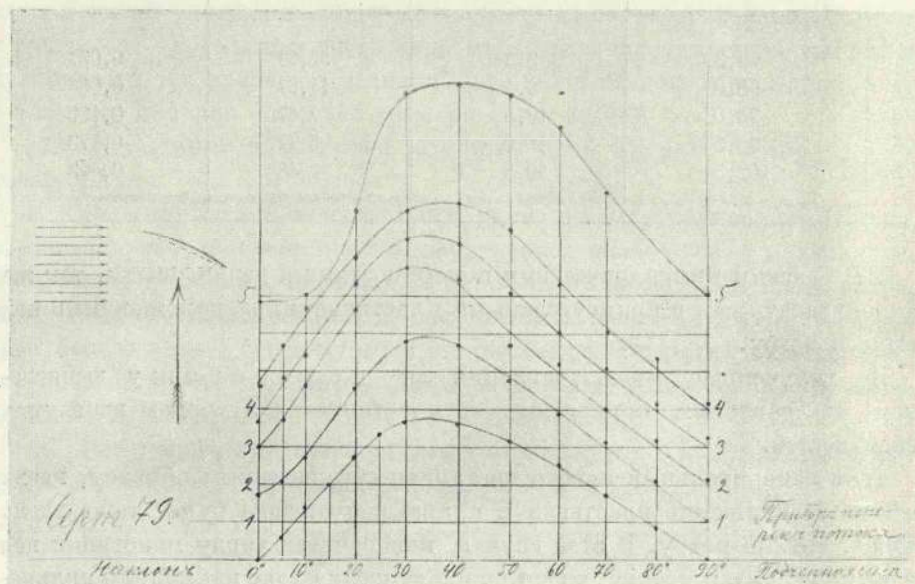
Представив себе, что цилиндрические поверхности суть крылья птицы или аэроплана, мы, с помощью наших опытов, при продольном положении измерительного прибора, определяем величину тяги, потребную для движения одних крыльев в горизонтальном, например, направлении.

228) Напротив, располагая измерительный прибор нормально к потоку, мы измеряем составляющую силы ветра в перпендикулярном к потоку направлении. Применяя это к крыльям птицы, летящей горизонтально, скажем, что мы узнаем величину вертикальной слагающей силы действия встречного воздушного потока, или величину его подъемной силы.

229) Пластинки поворачивались вокруг вертикальных осей (как и ранее плоские) и подвержены были потоку скоростью в 1 м/сек.

Для сравнения, к последующей таблице я присоединяю плоскую пластинку (10×10 см²) и определяю величину потребной для ее влечения тяги, а также и величину развиваемой ею при этом подъемной силы (см. табл. на стр. 180).

230) Интересно, что подъемная сила [см. табл. на стр. 177] рождается даже тогда, когда хорда нормального сечения цилиндрической поверхности совпадает с направлением воздушного потока (см. в таблице наклон в 0°). Это не новость, потому что то же вывел из своих опытов и Лилиенталь, производя их с одной вогнутой поверхностью (близкой к нашему № 2), которую он находил наиболее выгодной для аэроплана и которая, действительно, и по моим опытам оказалась наиболее выгодной, так как рождает при углах до 30° наибольшую подъемную силу.



Черт. 79

231) Прежде чем делать дальнейшие выводы из таблицы, изобразим кривыми линиями изменение подъемной силы (черт. 79) и лобового сопротивления (черт. 80) в зависимости от угла наклона хорды к направлению потока.

Абсциссы изображают углы наклона пластинки к потоку, а ординаты — величину лобового сопротивления и подъемной силы при скорости в 1 м/сек. Ось ординат одна для всех кривых; оси же абсцисс разные и означены номерами пластинок (см. табл. 226).

Нижняя кривая, без номера, относится к плоской пластинке, самая верхняя — к наиболее изогнутой поверхности, именно — к полуцилиндру.

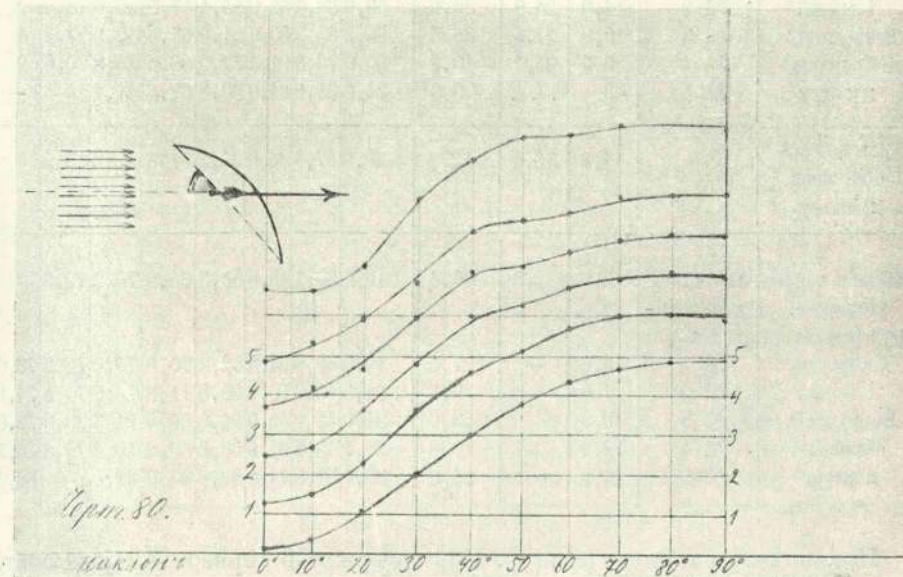
При нулевом наклоне все поверхности развивают подъемную силу (черт. 79), кроме плоской пластинки и полуцилиндра; последний даже,

как будто, развивает отрицательную подъемную силу. Во всяком случае эта подъемная сила близка к нулю.

Из черт. 79 видно, что подъемная сила быстро возрастает с увеличением угла наклона до $30-40^\circ$, а затем менее быстро убывает, нисходя до нуля при 90° .

Только полуцилиндр, градусов до 10, почти не развивает подъемной силы.

233) Если продолжить кривые 1, 2, 3 и 4 с левой стороны, то увидим,



Черт. 80

что подъемная сила не исчезает и при некотором небольшом, отрицательном угле наклона, т. е., применяясь к крыльям птицы, скажем, что передняя часть крыльев может быть даже немного опущена (сравнительно с задней), причем подъемная сила сохранит некоторую положительную величину.

235) Кривые лобового сопротивления крыла (черт. 80) имеют какую-то уродливость при 50° ; я бы ей не поверил, т. е. не поверил бы своим опытам, если бы не заметил эту уродливость (неожиданную вдавленность) у всех кривых: № 1, 2, 3, 4 и 5. Только кривая для плоской пластинки не имеет этой вдавленности.

236) Измеряя ординаты всех кривых на черт. 79, 80 и 81, получим наиболее вероятную величину сил, действующих на крылья, расположенные так или иначе относительно ветра.

Таблица

Угол наклона хорды к потоку в градусах		0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
Подъемная сила. Груз 8 фунтов.	Плоская пластинка	0	9,28	21,04	41,2	54,6	53,9	47,2	37,5	25,5	12,7	0	
	Скорость 1 м/сек.	№ 1	11,0	16,4	26,0	53,2	71,8	70,6	56,2	42,8	31,8	16,0	0
	Вогнутость обращена к ветру	№ 2	14,8	26,0	39,6	69,9	86,4	82,0	55,4	47,8	29,6	18,0	2
		№ 3	10,0	27,6	36,4	65,2	83,2	80,6	61,0	45,6	30,8	17,2	4
		№ 4	9,0	25,4	40,2	60,0	78,8	91,4	72,0	49,6	35,8	20,0	2
	№ 5	-3	. . .	+0,0	+34,9	85,8	84,0	80,3	67,6	41,1	—	—	
Выпуклость обращена к ветру	№ 2	14,8	+3,4	+12,2	+29,6	37,4	38,0	38,2	31,8	22,8	13,6	0	
Лобовое сопротивление. Груз 8 фунтов.	Плоская пластинка	2,0	2,8	5,4	16,0	30,1	45,6	56,3	65,0	70,2	72,2	73,7	
	Скорость 1 м/сек.	№ 1	3,6	—	7,4	19,0	39,8	54,0	62,2	70,8	75,0	75,2	73,0
	Вогнутость обращена к ветру	№ 2	7,0	—	9,6	24,6	42,0	60,4	63,8	71,2	74,0	76,5	74,1
		№ 3	9,8	—	13,0	24,0	45,2	62,0	64,0	69,6	74,3	76,0	75,0
		№ 4	12,2	—	19,6	28,4	42,4	62,6	66,8	69,2	75,4	75,8	76,5
	№ 5	24,6	—	24,0	33,7	59,9	74,4	82,9	84,0	91,8	—	86,0	

Предлагаемая таблица [см. стр. 181] содержит 6 горизонтальных лент, каждая из которых имеет три строчки. Первая лента относится к плоской пластинке, остальные, по порядку, к цилиндрическим поверхностям № 1, 2, 3, 4 и 5.

Первая строка ленты означает величину коэффициента подъемной силы K_v , вторая — величину коэффициента лобового сопротивления K_l , третья — величину подъемной силы, приходящейся на единицу сопротивления, т. е. последняя строка ленты выражает качество крыла.

Строчка в конце таблицы указывает подъемную силу крыла № 2, обращенного выпуклостью к ветру.

237) Обратим внимание на третью строку каждой ленты, т. е. на относительную подъемную силу крыла, или на величину ее, приходящуюся на единицу тяги.

Надо помнить, что все пластинки имеют одну и ту же скорость в 1 м/сек и что у всех (кроме № 5) одна и та же площадь в 100 см². Мы видим, что относительная подъемная сила у всех поверхностей возрастает с увеличением угла наклона только до известной величины; далее она начинает опять уменьшаться. Так, для плоской пластинки наиболее

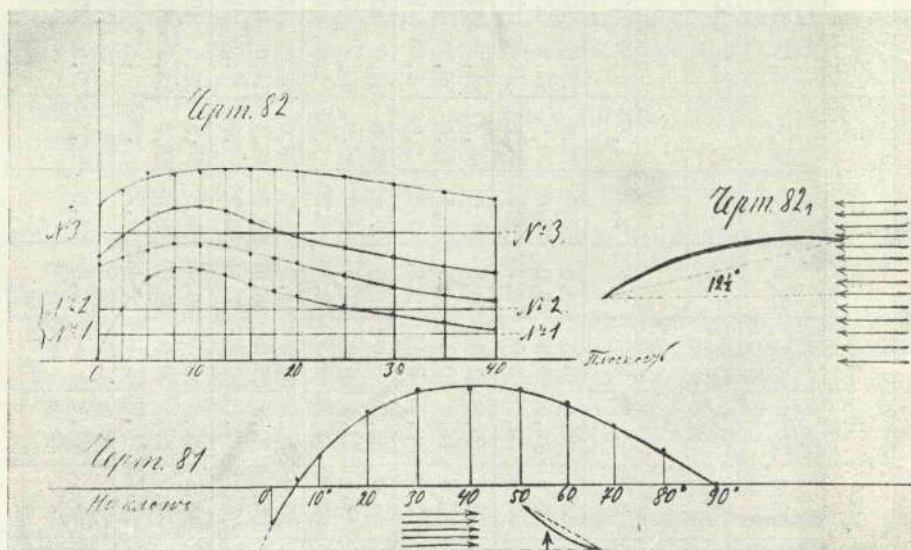
Таблица

Углы наклона: в градусах	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
K_v — коэффициент подъемной силы	0	4,4	9,3	14,5	19,5	25,0	30,0	35,5	40,5	49,5	55,0	56,0	54,5	47,0	36,6	25,5	13,0	0
K_f — коэффициент лобового сопротивления	2	2,2	2,8	4,0	5,5	7,5	10,0	13,0	16,0	23,0	30,0	38,0	45,6	56,5	65,0	70,0	72,5	73,5
Отношение $\frac{K_v}{K_f}$	0	2	3,32	3,50	3,55	3,33	3,00	2,73	2,53	2,15	1,80	1,47	1,19					0
№ 1	11	13,5	16,5	21,4	26,5	33,5	39,5	46,5	53,0	65,0	72,0	73,0	70,5	57,6	44,0	30,0	15,0	0
	4,0	4,5	6,0	6,0	7,5	9,5	12,5	15,5	19,0	28,0	39,0	47,0	53,5	62,0	70,5	75,0	75,5	74,0
	2,75	3,00	3,00	3,57	3,51	3,53	3,46	3,00	2,79	2,32	1,85	1,56	1,32					0
№ 2	14,7	20,5	27,0	34,0	40,5	48,5	55,5	63,5	70,3	81,0	86,5	84,7	84,5	60,0	44,5	30,0	15,5	0
	7,0	7,0	7,5	8,5	10,0	12,5	16,0	20,3	24,5	33,5	42,0	50,5	58,3	64,0	71,0	75,0	76,0	74,0
	2,10	2,93	3,60	4,00	4,05	3,88	3,47	3,13	2,87	2,42	2,06	1,68	1,45					0
№ 3	11,0	18,5	25,5	32,0	39,0	46,0	53,0	60,0	66,0	77,0	83,3	84,0	80,5	63,0	44,5	30,0	15,0	0
	10,0	11,0	12,5	14,0	16,5	18,5	21,0	24,0	27,0	35,0	44,0	52,5	60,5	64,5	69,5	74,0	76,0	75,0
	1,10	1,68	2,40	2,29	2,36	2,49	2,52	2,50	2,44	2,20	1,89	1,60	1,33					0
№ 4	10,0	18,0	24,5	31,0	37,5	44,0	50,5	56,0	61,5	71,5	79,0	82,0	82,0	70,0	50,4	32,5	16,5	0
	12,3	13,3	14,7	16,5	18,5	20,5	22,8	26,0	28,6	30,7	45,4	54,0	62,0	61,5	69,5	74,5	76,3	76,0
	0,813	1,35	1,67	1,80	2,27	2,15	2,21	2,15	2,15	2,33	1,74	1,52	1,32					0
№ 5	12,5	12,3	12,5	13,5	15,0	18,5	25,5	35,5	49,0	82,0	95,5	99,5	100,0	95,0	91,0	42,0	19,3	0
	24,0	23,8	23,5	23,8	24,5	25,5	27,5	30,5	34,0	46,5	68,3	74,5	82,5	85,7	85,7	87,0	87,5	86,0
	0,51	0,52	0,53	0,57	0,61	0,73	0,93	1,164	1,440	1,764	1,605	1,458	1,342	1,151				0
№ 2; выпуклость обращена к ветру; K_v	14,8	—	+2	—	+12,5	—	21,5	—	28,8	34,0	32,5	39,2	39,8	37,5	31,8	23,8	13,5	0

Выпуклость обращена к ветру

выгодный угол наклона к ветру близок к 10° (т. е. угол, при котором на единицу тяги двигателя приходится наибольшая подъемная сила); для цилиндрических поверхностей № 2 и 1 тот же угол недалеко от 10° ; для № 3 он равен 15° , для № 4 он заключается между 10 и 25° ; наконец, для № 5 максимум соответствует 25° . Отсюда заключаем, что он вообще возрастает с увеличением кривизны поверхностей.

Черт. 82 выражает кривые изменения подъемной силы в зависимости от угла наклона. Для плоской пластинки максимум соответствует углу, близкому к 9° ; для № 1 и 2 он близок к 10° ; для № 3 — к 15° .



Черт. 81, 82, 82₁

238) При наимыгоднейшем угле наклона, относительная подъемная сила для плоской пластинки составляет 3,55, а для прочих поверхностей, по порядку (№ 1 до № 5), она равна: 3,57, 40,5, 2,52, 2,33.

Из рассмотрения этого ряда максимумов (236) видно, что он имеет свой собственный максимум, именно для кривизны, близкой к $1/12$, или для поверхности № 2, что согласно с мнением Лилиенталя о наиболее выгодной кривизне.

При наимыгоднейшем угле наклона и при скорости в 1 м/сек плоская пластинка развивает абсолютную подъемную силу в 19,5, а поверхность № 2 (236) развивает 40,5, т. е. в два с лишком раза бóльшую, и потому действует, как плоское крыло, поверхность которого увеличим в два с лишком раза.

У насекомых вес крыльев составляет ничтожную долю веса всего их тела и потому не обременяет животное. Там природа не мудрит и употребляет простейшую форму (плоскую большей частью) крыльев, потому что увеличение поверхности и веса крыльев, в 2—3 раза, для маленького существа немного значит. На высшей ступени животного мира экономия в весе крыльев крайне важна, так как вес крыльев тяжелых птиц составляет немалую долю их веса; и вот тут природа умудряется, придавая крыльям вогнутость и тем уменьшая их вес и поверхность. Впрочем, надкрылья и у насекомых имеют форму вогнутую, может быть для защиты и плотного прикрытия насекомого.

Помимо этих соображений, возможно, что очень малые поверхности не подчиняются одним законам с большими (как у птиц).

239) Вместо того, чтобы делить величину подъемной силы крыла на величину тяги, потребной для его движения со скоростью в один метр в секунду, мы можем сделать обратное и тогда получим работу двигателя в единицу времени или, точнее, *работу тяги* крыла, движущегося горизонтально со скоростью одного метра в секунду, приходящуюся на единицу подъемной силы. Полученные числа можно считать вообще коэффициентом работы для движения летательной машины.

Прилагая тут полученную таблицу [стр. 184—185], покажем ее применение, а также применение и других коэффициентов.

240) Если имеем изогнутую пластинку, то действующие на нее силы выразятся в практических единицах числами таблицы (236), уменьшенными в 1000 раз.

Так, например, силы, действующие на m^2 поверхности крыла № 2, движущегося со скоростью в 1 м/сек, выразятся в килограммах, при наклоне в 10° :

1) по направлению движения — величиной 0,010;

2) по направлению, перпендикулярному к направлению движения пластинки, — величиной 0,0405.

Обозначим коэффициент подъемной силы через K_v , а коэффициент тяги через K_f ; тогда коэффициент работы будет равен $\frac{K_f}{K_v}$ (см. предыдущую таблицу, где вычислены коэффициенты работы).

241) Если площадь крыла равна S , а скорость V , то подъемная сила P крыла вообще равна

$$P = K_v \cdot S \cdot V^2.$$

242) Лобовое сопротивление или тяга Q , развиваемая гребным винтом равна

$$Q = \frac{K_f}{K_v} \cdot P = K_t \cdot P,$$

Углы в градусах	Коэффициенты работы при					
	0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5
Плоская	Бесконеч-	0,500	0,300	0,286	0,282	0,300
пластинка	ность					
№ 1	0,364	0,334	0,303	0,280	0,283	0,284
№ 2	0,476	0,342	0,278	0,250	0,274	0,258
№ 3	0,909	0,595	0,490	0,438	0,413	0,402
№ 4	1,23	0,739	0,600	0,532	0,493	0,466
№ 5						

где P есть подъемная сила и в то же время — вес аэроплана вместе с грузом и пассажирами.

243) Работа тяги T в единицу времени будет равна

$$T = K_t \cdot P \cdot V.$$

244) Из формулы 241 найдем

$$V = \sqrt{\frac{P}{S \cdot K_v}};$$

теперь, исключая V из формулы 243, получим

$$T = P \cdot \sqrt{P} \cdot \frac{K_t}{\sqrt{S \cdot K_v}}.$$

В этих простых формулах, основанных исключительно на опыте, не принимается, конечно, в расчет сопротивление корпуса аэроплана и других его частей, кроме крыльев²³.

245) Предполагая, что одна из величин второй части последнего уравнения изменяется, тогда как прочие остаются постоянными, скажем:

1) Работа двигателя в секунду должна быть пропорциональна весу аэроплана (со всем содержимым) в степени $3/2$, т. е. пропорциональна $P^{3/2}$.

2) Когда отношение $\frac{P}{S}$ неизменно, т. е. когда площадь крыльев S возрастает пропорционально весу P аэроплана, тогда работа T двигателя остается пропорциональной весу аэроплана P .

3) Работа T обратно пропорциональна квадратному корню из площади S крыльев, или (при квадратных крыльях) обратно пропорциональна их линейным размерам.

4) Работа T пропорциональна коэффициенту работы K_t , т. е. числам табл. 239.

Таблица

движении летательной машины					
15,0	17,5	20	25	30	35
0,333	0,366	0,395	0,465	0,545	0,679
0,317	0,333	0,359	0,431	0,542	0,635
0,288	0,320	0,349	0,414	0,486	0,596
0,396	0,400	0,409	0,455	0,528	0,625
0,452	0,465	0,465	0,429	0,575	0,659
1,784	0,859	0,694	0,567	0,623	0,686
и при угле в $40^\circ = 0,745$					

Следовательно, для уменьшения затрачиваемой работы надо выбрать кривизну, близкую к кривизне поверхности № 2.

5) Работа T обратно пропорциональна квадратному корню из коэффициента подъемной силы K_v . Значит, чтобы работа была наименьшей, надо коэффициент подъемной силы из табл. (236) брать наибольшим.

6) Чем больше коэффициент подъемной силы K_v , тем меньше может быть площадь крыльев S без нарушения величин работы T .

7) Из предыдущего и прямо из формулы 244 видно, что работа T пропорциональна частному $K_t : \sqrt{K_v}$, или так как $K_t = \frac{K_f}{K_v}$, то работа

пропорциональна $\frac{K_f}{\sqrt{K_v^3}}$.

Если бы была математическая зависимость между K_f и K_v , то можно бы найти наивыгоднейшее соотношение между этими коэффициентами.

246) Для отыскания минимума $\frac{K_t}{\sqrt{K_v}}$ мы должны взять числа крыла № 2 и отыскивать частные значения $\frac{K_t}{\sqrt{K_v}}$.

Тогда получим для разных углов наклона крыла № 2 следующие числа:

Углы в градусах	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	25	30
Из таблицы (239)	0,278	0,250	0,247	0,258	0,288	0,320	0,349	0,414	0,486
K_v	5,20	5,83	6,36	6,96	7,45	7,97	8,38	9,00	9,30
$K_t : K_v$	0,05340	0,04290	0,03883	0,03707	0,03865	0,04015	0,04600	0,05226	0,04165

247) Из этой таблицы видим, что минимум $\frac{K_t}{\sqrt{K_v}}$, а следовательно, и минимум работы двигателя T относится к наклону в $12,5^\circ$. Это и есть угол наивыгоднейшего наклона хорды изогнутой пластинки к направлению относительного воздушного потока.

248) Другие исследователи приходили к другим выводам о величине наивыгоднейшего наклона.

Так, г. Джевецкий, основываясь на трудах Дюшмена и Фруда относительно сопротивления воды, дал, по аналогии, и для воздуха наивыгоднейший угол в $1^\circ 50''$, что далеко от моих выводов. Тот же вывод ($1 - 2^\circ$) сделал и г. Федоров, основываясь на новейших данных относительно сопротивления воздуха.

Но профессор Жуковский, на основании опытов Лилиенталя, находит число в 15° .

Разбирая эту статью, г. Федоров приводит и свои собственные вычисления, на основании которых уже выводит для наивыгоднейшего угла наклона $12-15^\circ$. Г. Ширман дает для наивыгоднейшего угла 7° .

Впрочем, из табл. 246 видно, что отношение $\frac{K_t}{\sqrt{K_v}}$ между углами в $7\frac{1}{2}^\circ$ и 20° изменяется довольно мало (процентов на 16) и потому при разном наклоне в этих пределах требуется почти одна и та же работа T для летания, так что почти все предыдущие исследователи недалеко от истины.

Однако для больших скоростей движения и больших поверхностей наш вывод применим только приблизительно. Там, по законам трения (см. «Давление воздуха») наивыгоднейший угол наклона должен быть меньше $12\frac{1}{2}^\circ$. Вероятно, меньше будет и наивыгоднейшая кривизна.

249) Раз крыльям аэроплана полезно придавать известную кривизну, то очевидно, что то же самое полезно и для гребных винтов. Так, что с мнением Гирана Максима, хотя и основанным на опытах о том, что плоские гребные винты наиболее выгодны, я не могу согласиться.

251) Хотя мои некоторые выводы относительно пластинок и согласны с выводами Лилиенталя, но нельзя того же сказать относительно величины подъемной силы крыльев.

Для сил, действующих на изогнутую наилучшим образом пластинку ($1\frac{1}{12}$), Лилиенталь дает две формулы:

$$N = \eta \cdot 0,13 \cdot S \cdot V^2$$

и

$$T = \zeta \cdot 0,13 \cdot S \cdot V^2$$

Одна показывает величину нормальной к пластинке слагающей силы, а другая — величину составляющей силы ветра, действующей параллельно хорде нормального сечения пластинки.

Одним словом, одна слагающая перпендикулярна к хорде, а другая параллельна ей; η и ζ — коэффициенты, величина которых зависит от угла наклона пластинок к потоку. При угле наклона в 90° , $\eta = 1$, т. е. нормальная составляющая равна $N = 0,13 \cdot S \cdot V^2$; уже из этого видно, что Лилиенталь принимает формулу для силы давления ветра с коэффициентом устаревшим и, как доказано, крайне неверным.

Чтобы не считаться с этим, мы примем нормальную силу при угле наклона пластинки в 90° за единицу. Тогда нормальная сила, действующая на пластинку при других углах наклона, по Лилиенталю и по моим опытам, будет:

Углы	-9°	-4°	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	90°
По Лилиенталю	0	0,200	0,381	0,650	0,825	0,901	0,922	0,922	0,910	1
По моим опытам	—	0	0,186	0,342	0,513	0,701	0,890	1,025	1,095	1

При острых углах, какие я тут привожу, силы, нормальные к пластинке, лишь немного отличаются от приводимых мною (3-я строка) величин подъемной силы; см. табл. (236), из которой получены числа последней строки этой таблицы.

Правда, у Лилиенталья есть другая составляющая φ , но она, будучи при всех углах сравнительно незначительной, мало имеет влияния на выводы из последней таблицы. Из нее же мы видим, что подъемная сила крыла по Лилиенталю возникает, начиная от -9° , а у меня, начиная от -4° или -5° , что при угле наклона 0° подъемная сила по моим опытам вдвое меньше, чем по опытам Лилиенталья, и далее она у меня вообще меньше, чем у последнего.

Но разница тем меньше, чем углы более; начиная с 20° , разница совсем не велика. Далее же подъемная сила у меня несколько более, чем у Лилиенталья.

Что же касается абсолютной величины подъемной силы, то она по моим опытам, кроме этих поправок, еще почти вдвое меньше, вследствие того, что Лилиенталь принимает устаревший коэффициент силы, действующей на плоскую пластинку, нормальную к ветру ($0,13 \cdot S \cdot V^2$).

253) Формула (244) и таблица (246) указывают нам работу тяги при полете аэроплана (полезная работа); гребной винт, сопротивление корпуса аэроплана и проч., конечно, должны увеличить эту работу.

Но, с другой стороны, мы видим, что увеличение продолговатости крыла, в поперечном направлении к потоку, раз в 5 может почти вдвое увеличить силу, действующую на крыло при той же его площади.

Если вывод этот справедлив и для вогнутых пластинок, как он справедлив для плоских, то коэффициент подъемной силы K_v должен увеличиться в формуле (244), а вместе с тем и числа последней строки таблицы (246) должны уменьшиться.

Постоянный множитель в формуле (244) равен $\frac{K_t}{\sqrt{K_v}}$ или $\frac{K_t}{K_v \cdot \sqrt{K_v}}$. Для наивыгоднейшего продолговатого крыла, в лучшем случае, можем увеличить коэффициент K_v подъемной силы в 2 раза, отчего коэффициент в формуле (244) уменьшится в $2\sqrt{2}$, или в 2,83 раза, т. е. он будет равен 0,0131.

254) Значит, формула наивыгоднейшей минимальной работы аэроплана с неподвижными крыльями, прикрепленными к корпусу, будет

$$T = 0,0131 \sqrt{\frac{P^3}{S}} = 0,0131 \cdot P \sqrt{\frac{P}{S}}.$$

Благодаря же употреблению винта, сопротивлению корпуса аэроплана и его частей, эта вычисленная работа должна быть, по меньшей мере, утроена.

255) Для практических единиц коэффициент последней формулы будет не 0,0131. Чтобы получить его, надо обратиться к табл. 246; K_t не изменяется, но $\sqrt{K_v}$ (см. 236) надо положить равным не $\sqrt{48,5}$, а $\sqrt{0,0485}$, потому что K_v для перевода на практические единицы надо уменьшить в 1000 раз. Итак, практический коэффициент формулы 254 будет в 1000 раз больше, именно 0,414, а формула примет вид

$$T = 0,414 \cdot P \cdot \sqrt{\frac{P}{S}}.$$

Насколько далеки построенные до сих пор аэропланы от удовлетворения этой формуле, можно видеть на основании вычислений и данных относительно летательных машин.

Так, у аэроплана Максима $P = 3600$ кг и $S = 370$ м² (см. «Воздухоплавание». Ред. М. М. Поморцева, вып. 4, стр. 80). По формуле 255, на основании этих данных, вычислим: $T = 4658$ килограммометров в секунду, или около 62 лошадиных сил. Если же принять в расчет употребление винта, сопротивление корпуса и другие обстоятельства, то эту величину нужно утроить.

Действительно, у морских пароходов подобное число умножается (по Фруду) на 2,7; мы же утраиваем, потому что должны еще иметь в виду сопротивление корпуса аэроплана и тяжелой крыльев. Тогда получим идеально малую работу полета, в индикаторных лошадиных силах, равной 186.

У аппарата же Максима она доходила до 363 лошадиных сил, или вдвое больше; да и то результаты оказались сомнительными.

256) Для «Аэродрома» Ланглея $P = 13,6$ кг и $S = 8$ м².

Так что по нашей формуле, утраивая полученное число, вычислим: $3T = 23,9 \cdot 3 = 69,6$ килограмметра в секунду, что уже близко к работе «Аэродрома», равной 86,4 килограмметра в секунду (по расчету г. Ширмана; см. «Воздухоплавание», вып. 4, стр. 78).

257) Авион Адера имел площадь крыльев, не большую 50 кв. метров, а вес с нагрузкой — 500 кг. Для Авиона в таком случае найдем $3T = 1464 \times 3 = 4392$ килограмметра в секунду, или около 58 лошадиных индикаторных сил. На самом же деле он развивал около 40 нарицательных лошадиных сил. Поэтому, если бы поднялся при этих 40 силах, то он был бы чудом технического совершенства.

258) Не худо сравнить мои формулы с таковыми же, выведенными г. Ширманом («Воздухоплавание», вып. 4-й), на основании исследований Вельнера, Лилиенталь и Ренара.

Ранее (255) мы дали, для идеальных крыльев*, формулу работы тяги:

$$T = 0,414 \cdot P \cdot \sqrt{\frac{P}{S}}.$$

По Вельнеру, выходит:

$$T = 0,316 \cdot P \cdot \sqrt{\frac{P}{S}},$$

а по Лилиенталю:

$$T = 0,408 \cdot P \cdot \sqrt{\frac{P}{S}}.$$

Мне было бы понятно это, сравнительно, изумительное сходство выводов, если бы упомянутые ученые считались со значением продолговатости крыльев и принимали те же основания, что и я. Между тем как Лилиенталь, например, принимал коэффициент силы давления на плоскую пластинку в 0,13, вместо 0,071, как это делал я, согласно Кальете и Колардо.

259) По Ренару, для плоских крыльев, $T = 0,932 \cdot P \cdot \sqrt{\frac{P}{S}}.$

Чтобы сравнить эту формулу с нашими выводами, мы должны и для плоского квадратного крыла составить таблицу, подобную 246-й для цилиндрической поверхности № 2.

Из нее видно, что минимум работы T относится к углу наклона пластинки к горизонту в $12\frac{1}{2}^\circ$, т. е. угол тот же, что и для наилучшей вогнутой поверхности (№ 2).

* Последующие мои опыты показали, что цилиндрические крылья, с постоянной кривизной, не идеальны.— Автор.

Плоская квадратная пластинка

Углы в градусах	7,5	10	12,5	15	17,5	20	25
K_t	0,286	0,282	0,300	0,333	0,366	0,395	0,465
K_p	14,0	19,5	25,0	30,0	35,5	40,5	49,5
$\sqrt{K_p}$	3,74	4,42	5,00	5,477	5,96	6,36	7,04
$K_t : \sqrt{K_p}$	0,07647	0,063800	0,0600	0,06086	0,06140	0,06211	0,06605

260) В практических единицах, согласно 255, коэффициент формулы работы будет в $\sqrt{1000}$ раз более, чем из последней таблицы (0,0600), т. е. он будет равен 1,8974.

Это число больше Ренаровского в 2 раза.

Для продолговатого крыла полученный нами коэффициент работы (1,9), согласно 253, должен быть уменьшен в $2\sqrt{2}$, т. е. в 2,83 раза; тогда он будет равен 0,6705, что опять не совсем согласуется с коэффициентом Ренара.

Не объясняется ли эта разница, между прочим, и тем, что для опытов он брал менее продолговатые крылья. Вообще, с продолговатостью крыльев исследователи, как кажется, еще мало считаются.

261) Не нужно думать, как я уже говорил, что величина наивыгоднейшего наклона крыльев к ветру — есть нечто неизбежное. Напротив, с увеличением быстроты движения воздуха или пластинки, а также с увеличением ее площади, на основании моих давнишних опытов («Давление воздуха») и теперешних, коэффициент трения уменьшается, а вместе с ним должен уменьшаться и наивыгоднейший угол.

262) При очень больших поверхностях и скоростях можно руководствоваться формулой (154—155)

$$F = K \cdot i \cdot S \cdot V^2,$$

данной мною для небольших углов наклона в применении к прямоугольной пластинке, расположенной поперек потока (длинная сторона прямоугольника перпендикулярна направлению ветра). Тут трение почти совершенно исключается.

Формула выражает силу, нормальную к пластинке; коэффициент тяги, или горизонтальная составляющая, равен

$$K_f = K \cdot i \cdot \sin i,$$

где K — есть коэффициент, зависящий от продолговатости прямоугольника (154—155), а i — угол наклона пластинки к ветру; коэффициент подъемной силы, или вертикальная составляющая равна

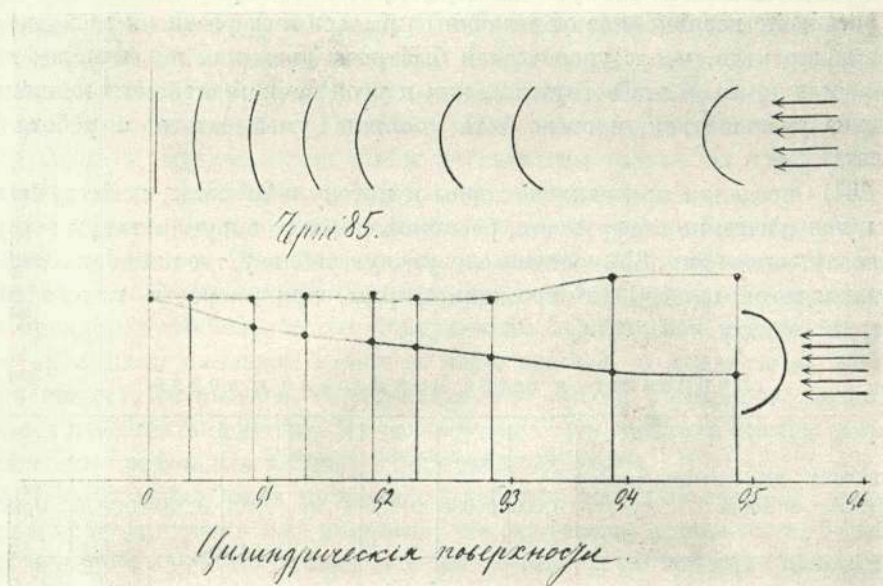
$$K_v^i = K \cdot i \cdot \cos i.$$

Следовательно

$$K_t = \frac{K_f}{K_v} = \frac{\sin i}{\cos i} = \operatorname{tg} i$$

и

$$\frac{K_t}{\sqrt{K_v}} = \frac{\operatorname{tg} i}{\sqrt{K i \cdot \cos i}}.$$



Черт. 85

Итак, функция эта или коэффициент работы полета (246) уменьшается непрерывно, с уменьшением угла наклона i . Действительно, ввиду малости угла i , можно положить $\operatorname{tg} i = i$, $\cos i = 1$; значит, $\frac{K_t}{\sqrt{K_v}} = \sqrt{\frac{i}{K}}$, т. е. коэффициент работы достигает минимума при $i = 0$.

Отсюда видно, что угол наивыгоднейшего наклона аэроплана (при плоских крыльях), в пределе, при отсутствии трения и лобового сопро-

тивления, равен нулю; в таком случае крылья примут горизонтальное положение и работа аэроплана уменьшается до нуля.

Но, во-первых, есть разного рода сопротивления и трения, избежать которых совершенно невозможно, во-вторых, имеем ли мы право применять формулу силы нормального давления

$$F = K \cdot i \cdot S \cdot V^2$$

для всяких, самых малых углов?

Крайний предел опытного применения есть $2 - 5^\circ$; ниже этой величины давление, как я заметил, сильно падает сравнительно с тем, которое следует по нашей и по другим формулам, кроме Ньютоновской, которая в этом случае, может быть, и имеет какой-нибудь смысл.

Навыгоднейшая вогнутость цилиндрических крыльев также едва ли есть нечто независимое от величины крыльев и скорости их движения; весьма вероятно, что с увеличением быстроты движения и величины поверхности крыльев эта вогнутость, как и угол невыгоднейшего наклона, должна уменьшаться, а стало быть должна уменьшаться и работа T полета.

267) Определяя при наклоне хорды к потоку в 90° силы, действующие на цилиндрические поверхности, расположенные то выпуклостью к ветру, то вогнутостью (фиг. 85), составим следующую таблицу, где показаны силы, приходящиеся на 100 см^2 проекции формы, при скорости потока в 1 метр в секунду.

Направление ветра нормально к хорде

Кривизна, или отношение стрелки к хорде	0,000	0,086	0,130	0,185	0,221	0,281	0,3870	0,485
Сила, приходящаяся на 100 см^2 проекции. Вогнутость обращена к ветру	74	72,9	74,4	75,6	74,1	72,7	82,6	82,2
То же. Выпуклость обращена к ветру	74	61,2	58,8	56,8	54,1	49,7	44,2	42,6
Отношение сил	1,000	1,192	1,266	1,332	1,371	1,443	1,868	1,930

**ПРОДОЛЖЕНИЕ ОТЧЕТА ОБ ОПЫТАХ
ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ ВОЗДУХА, ПРОИЗВЕДЕННЫХ в 1901 и 1902 годах
НА СРЕДСТВА ИМПЕРАТОРСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ***

273) Опыты над трением воздуха я производил при помощи круглых цилиндрических поверхностей, сделанных или из белой, блестящей жести толщиной в $\frac{1}{3}$ миллиметра или из рисовальной (слоновой) бумаги приблизительно такой же толщины ($\frac{1}{3}$ мм). Окружность основания всех цилиндров была одна и та же, именно 50 см.

Высота же сквозных цилиндров была разная; именно для цилиндров из жести с припаянными проволочными ножками следующая: 2, 3, 4, 5, 7 и 10 см; для цилиндров же из лучшей слоновой бумаги высота была такая: 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 100 см. Всего было 15 моделей. Модели длиной до 15 см укреплялись на одной ножке; модели большей длины — на двух. Два цилиндра длиной в 10 см — жестяной и бумажный — были употреблены для сравнения трения поверхностей в разных состояниях. Разница оказалась в пользу жести, но небольшая. При больших скоростях потока бумажные модели в 10 и 15 см оказались негодны, потому что чересчур гнулись, будучи легки, слабы и укреплены только на одной ножке; поэтому из последующих таблиц я их выключил.

274) Ножки всех цилиндров были сделаны из круглой проволоки толщиной в 1,38 мм. Жестяные цилиндры имели короткие ножки (10,5 см длины), потому что они были припаяны к нижней части обруча; ножки же бумажных цилиндрических поверхностей были длиной в 26 см, потому что проникали цилиндры насквозь через нижнюю и верхнюю их часть. При опытах, разумеется, образующие, или высота цилиндров, располагались параллельно потоку. По расчету (из 175) я составил кривую сопротивлений проволок и таблицу сопротивлений стоек.

275) Проверка чисел полученной таблицы непосредственным опытом над сопротивлением ножек показала, что они (числа) процентов на 9 больше, чем дает опыт. Но принимая в расчет некоторую толщину цилиндрических поверхностей, т. е. некоторое лобовое сопротивление их, я оставил числа таблицы неприкосновенными и вычитал их из общего сопротивления цилиндров.

Это сопротивление моделей несколько больше сопротивления трению еще и потому, что невозможно было полностью уничтожить их качания, что также увеличило сопротивление цилиндров.

Неполная правильность цилиндров также увеличивала их сопротивление.

* «Продолжение отчета об опытах по сопротивлению воздуха...» не было отправлено Циолковским в Академию Наук и осталось в его архиве. Печатается впервые с некоторыми сокращениями. (Ред.)

Поэтому полученные нами величины сопротивления во всяком случае гораздо больше величины трения (см. таблицу).

276) Следующая таблица показывает полученные мною числа сопротивлений цилиндров, за вычетом, как всегда, сопротивлений стоек.

Первая горизонтальная строка указывает вес груза в фунтах; первый вертикальный столбец — высоту цилиндров (или длину их вдоль потока) в сантиметрах, а второй — сумму внутренней и внешней поверхности каждого цилиндра в кв. сантиметрах.

Таблица

Высота цилиндров в см	Полная поверхность трения: внутренняя и внешняя		Грузы в фунтах												
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
2	200	Из жести	5,3	8,6	11,2	12,3	14,1	16,3	18,4	21,6	24,6	25,1	25,6	27,7	28,7
3	300		6,3	9,4	12,4	15,2	17,2	19,1	21,4	21,6	27,0	28,5	30,1	30,4	31,9
4	400		7,1	11,4	14,1	16,3	19,6	22,3	25,7	26,3	32,2	33,9	36,1	38,0	39,4
5	500		8,1	12,9	16,2	20,1	24,1	26,8	29,1	31,3	36,5	40,2	42,6	45,1	46,1
7	700		9,2	15,4	19,8	23,9	28,5	31,9	36,8	39,0	45,3	47,3	51,0	53,8	58,4
10	1000		11,7	18,6	25,4	31,2	34,6	39,4	44,2	49,2	51,3	54,8	59,0	69,2	65,9
20	2000	Из бумаги	15,0	27,2	38,2	47,4	57,4	67,0	73,4	84,0	99,6	105,0	115,2	128,8	129,2
30	3000		20,0	35,6	50,4	62,4	77,8	92,6	102,8	124,0	134,0	143,4	156,8	168,8	180,4
40	4000		25,6	46,0	64,0	82,8	103,0	117,8	135,4	151,0	174,0	191,4	204,8	221,6	237,2
50	5000		29,4	54,4	77,8	97,6	119,2	141,8	163,6	191,6	206,8	225,8	247,2	264,5	278,0
60	6000		36,0	65,0	92,4	119,2	147,2	172,4	194,0	216,4	246,8	274,6	284,8	306,4	325,4
70	7000		40,0	73,6	106,0	133,6	163,2	197,2	230,0	254,0	278,8	304,2	326,4	358,4	380,4
100	10000		55,0	98,0	140,8	180,2	225,0	259,6	299,6	332,4	366,0	409,0	429,6	476,0	504,4

Опыты производились от 21 до 24 авг. 1901 г. Температура 20° С, давление воздуха — 745—760 мм.

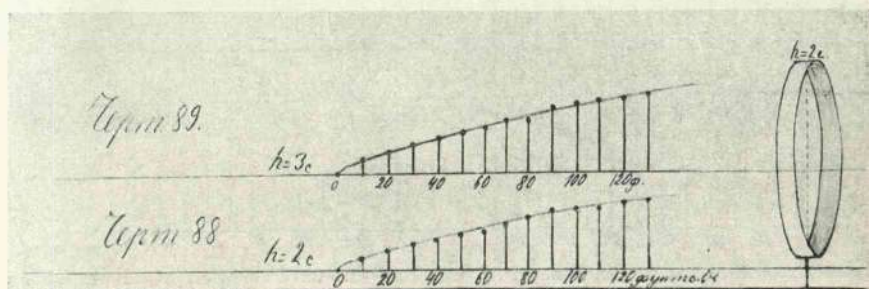
277) Из таблицы видно, что высота, или образующая цилиндров, изменялась от 2 см до 1 м, а площадь трения — от 200 до 10 000 см², или до 1 м².

Рассматривая любую горизонтальную строку таблицы, мы увидим, что величина трения для одной и той же площади (одной модели) возрастает менее быстро, чем груз, т. е. величина трения не пропорциональна квадрату скорости потока, а пропорциональна V^x , где x — переменная, меньшая двух. Так, из второй строки видно, что когда груз возрастает в 11 раз (от 10 до 110 фунтов), то величина сопротивления возрастает менее чем в 5 раз.

Но, впрочем, это возрастание становится все более и более пропорциональным квадрату скорости потока по мере увеличения длины цилиндра.

Так, при отношении грузов, равном 10 (из 2-го и 11-го столбца таблицы), для разных цилиндров (13 моделей) получим следующие отношения сопротивлений: 4,7; 4,5; 4,8; 5,0; 5,2; 4,7; 7,0; 7,2; 7,5; 7,7; 7,6; 7,6; 7,4*.

В общем, несомненно возрастание отношения с возрастанием размеров цилиндра и приближение этого отношения к некоторому пределу, — вероятно, к десяти (ибо таково отношение грузов). Можно думать, что при большой длине (теоретически — при бесконечной длине) поверхности величина трения пропорциональна квадрату скорости потока; отклонение же от этого закона тем более, чем менее длина цилиндра по направлению воздушного движения. Значит, величина x тем менее двух и ближе к единице, чем длина поверхности менее.



Черт. 88, 89

278) Теперь рассмотрим вертикальные столбцы или возрастание трения с увеличением длины, при одной и той же скорости потока.

Длина цилиндра и площадь трения возрастает у нас в 50 раз; но величина трения при этом увеличивается далеко не в 50 раз и притом, для разных скоростей потока, в различное число раз.

Так, для разных грузов, от 10 до 130 фунтов (из 2-й и последней строки), получим последовательно следующие отношения, при увеличении высоты цилиндра в 50 раз: 10,4; 11,4; 12,6; 14,7; 16,0; 16,0; 16,3; 15,4; 14,9; 16,3; 16,8; 17,2; 17,6.

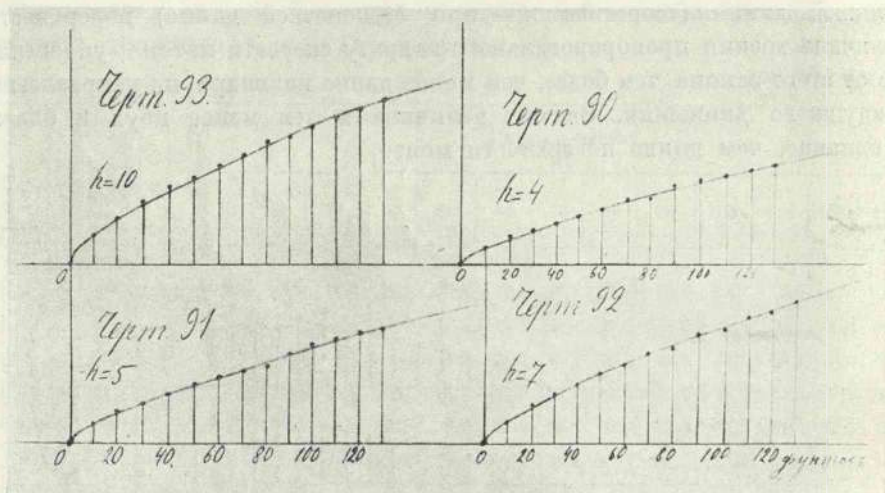
Отсюда видно, что при всех скоростях потока сопротивление от трения возрастает гораздо медленнее, чем площадь трения или длина поверхности по направлению потока, именно в 5—3 раза медленнее.

Сначала, при малых грузах, отношение возрастает довольно быстро; затем начинает колебаться и в общем возрастает очень медленно; достигнет ли при каких-нибудь скоростях потока это отношение 50, т. е.

* Скачок между числами 4,7 и 7 происходит отчасти оттого, что длина цилиндра увеличивается сразу в 2 раза [см. таблицу на стр. 194].

отношения поверхностей (или длин), — неизвестно, но возможно, что достигнет.

Итак, величина трения, при одной и той же скорости потока, пропорциональна l^y , где l — длина цилиндра, а y — показатель степени, мень-



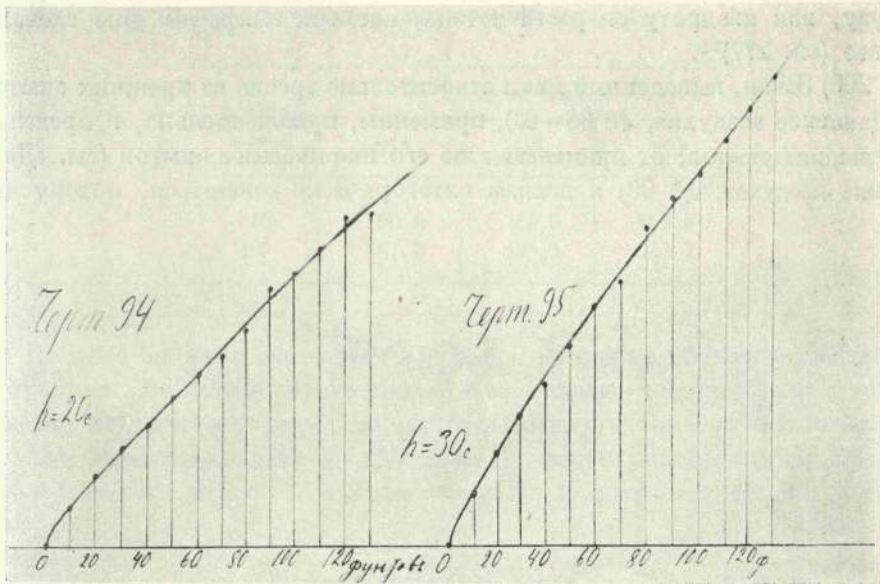
Черт. 90, 91, 92, 93

ший единицы; величина тем более отличается от единицы, чем скорость потока менее.

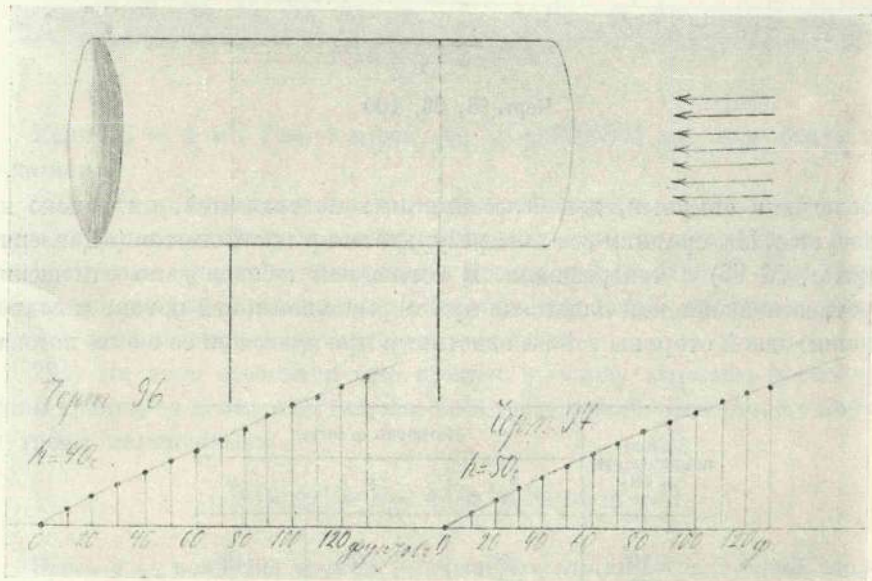
279) Каждая строка табл. (276) соответствует кривой, выражающей зависимость между величиною трения и скоростью потока. Абсциссы выражают вес груза в фунтах, а ординаты, в миллиметрах, выражают величину трения. Так, мы получим фигуры: 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95. Для цилиндров, начиная с 40 см длины, абсолютная величина трения чересчур велика и потому выражена не в целых миллиметрах, а в долях их. Сравнительно с предыдущими фигурами масштаб фигур (собственно только ординаты) 96, 97, 98, 99 и 100 следующей: $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{7}$, $\frac{1}{10}$.

Из фигур видно, что кривая трения для любого цилиндра выражается, как будто, дугою гиперболы.

280) Большинство кривых не меняет знака радиуса кривизны. Притом последний непрерывно возрастает с увеличением абсцисс или ординат. Чем больше длина цилиндра, тем дуга гиперболы ближе к прямой, т. е. тем вершина гиперболы дальше от начала координат. Из близости дуги к прямой видно, что при большой длине цилиндра трение пропорционально



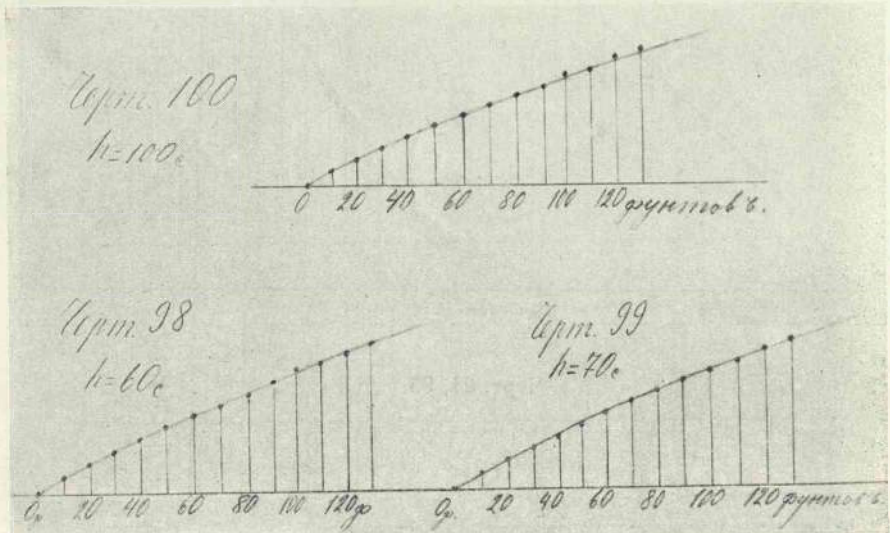
Черт. 94, 95



Черт. 96, 97

грузу, или квадрату скорости потока, каковой вывод мы уже сделали ранее (см. 277)²⁴.

290) Закон, выведенный мною относительно трения из прежних опытов («Давление воздуха», № 88—93), применим, приблизительно, в пределах тогдашних опытов; от применения же его вне пределов опытов (см. «Давление воздуха», № 93) я должен категорически отказаться, потому что



Черт. 98, 99, 100

с последними опытами, для более длинных поверхностей, он далеко не согласуется. Мы сравним все-таки результаты прежних опытов («Давление воздуха», № 93) с теперешними. В тогдашней таблице дано отношение сопротивления плоской пластинки при нормальном к ней потоке к сопротивлению одной стороны той же пластинки при движении ее вдоль потока.

Длина поверхности в см	Скорость в м/сек		
	1	2	4
10	68	90	119
100	160	212	279

Вот несколько чисел из таблицы прежних опытов (№ 93). Для длины поверхности в 100 см эти числа уже будут теоретические.

Из таблицы же теперешних опытов извлекаем:

Длина поверхности в см	Скорость в м/сек		
	1,14	1,97	3,95
10	80,6	116,5	162,5
100	167,3	193,0	233,7

Разница большая, но в такого рода опытах она не должна нас вводить в отчаяние. Во всяком случае числа этого последнего труда ближе к истине, так как основаны на более многочисленных и более точных опытах.

291) Практическая формула для силы трения одной стороны прямоугольника площадью S м² при скорости V метров в секунду имеет вид

$$F = \frac{K^3}{1000} \cdot S \cdot V^2 \text{ кг,}$$

где K — коэффициент, подобранный согласно скорости V и протяжению прямоугольника по направлению потока. Например, при длине в 1 метр и при скорости в 4 м/сек, получим

$$F = \frac{0,315}{1000} \cdot S \cdot V^2 \text{ кг.}$$

Если $S = 1$ м², $V = 4$ м/сек, то $F = 0,00504$ кг, или около пяти граммов.

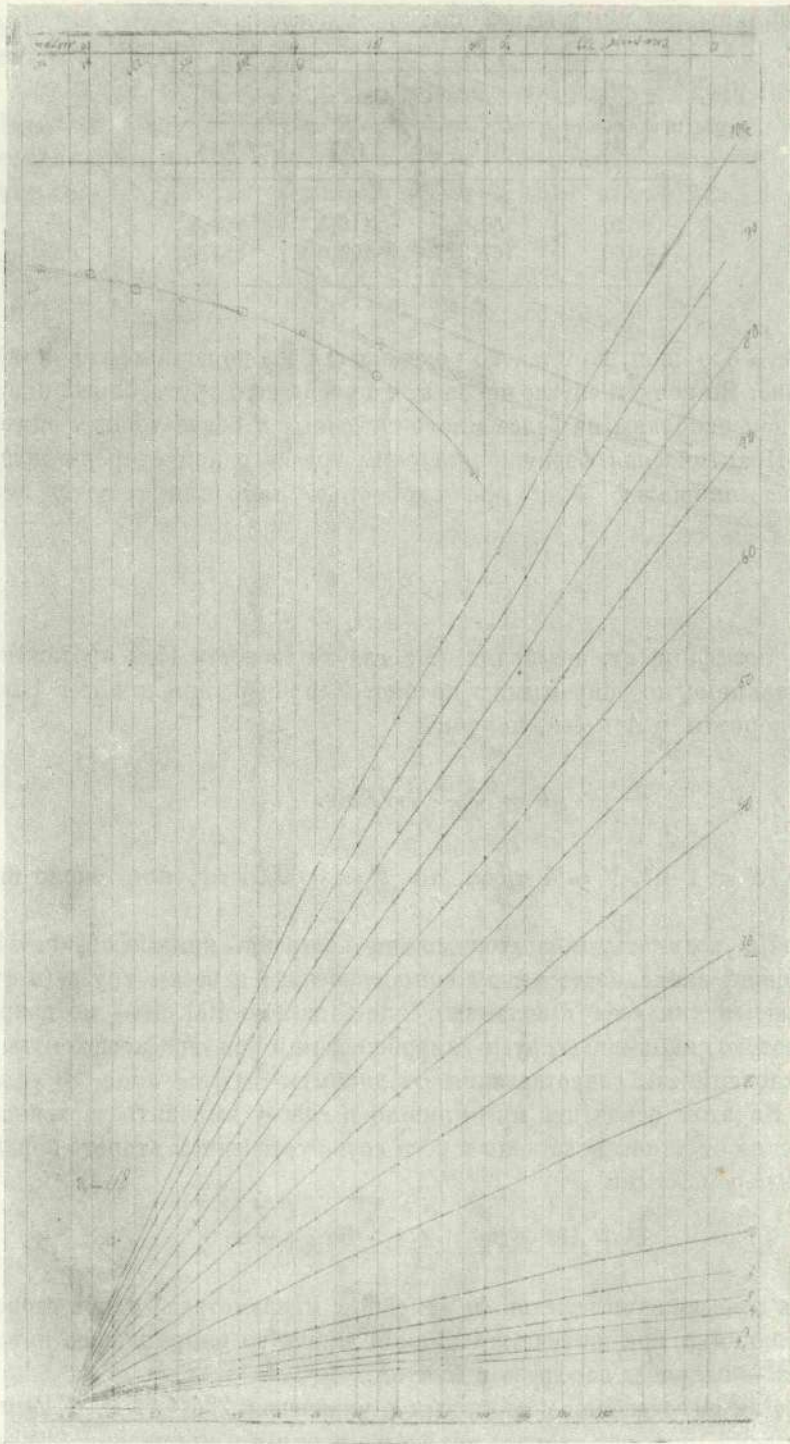
292) По результатам опытов можем построить кривые (фиг. 118), выражающие зависимость между сопротивлением и весом груза (в фунтах). Кривые для всех испытанных длин (от 2 до 100 см — по направлению потока) напоминают дуги гипербол, как и при графическом выражении зависимости сопротивления от длины.

294) На этом основании мне пришло в голову выразить зависимость силы трения от длины пластинки и веса груза уравнением второго порядка с тремя переменными

$$z^2 + Ax^2 + By^2 + Cz + Dxy + E = 0.$$

Здесь z — величина трения (в условных миллиметрах) одной стороны прямоугольника при ширине в 100 см и длине (по направлению потока) в y см; x — означает вес груза в фунтах.

295) Для определения постоянных в уравнении 294 (A , B , C , D и E) я подставлял пять раз частные значения x , y и z в уравнение 294.



Черт. 118

Получилось пять уравнений с пятью неизвестными (A , B , C , D и E). Вот взятые мною пять точек с их координатами.

Точки	1	2	3	4	5
Вес груза в фунтах, x	20	20	60	120	130
Длина по направлению движения в сантиметрах, y .	5	100	40	5	100
Величина трения в условных миллиметрах, z	12	100	118	44	506

296) Решая составленные нами пять уравнений, найдем следующие значения постоянных:

$$A = -1,0911; B = -0,2835; C = +1760,2; D = -85,686; \\ E = -11\,376,56.$$

Все постоянные отрицательны, кроме C .

297) Из уравнения (294) получим

$$z = \sqrt{-Ax^2 - By^2 - Dxy - E} + \frac{C^2}{4} - \frac{C}{2}.$$

Подставив сюда числовые коэффициенты, найдем все члены под знаком радикала положительными ($\frac{C}{2} = 880,1; \frac{C^2}{4} - E = 785\,952$).

Разница между опытом и вычислением по последней формуле получается тем более значительная, чем меньше x и y . Для x и y больших десяти формула достаточно точно выражает опыт; но для значений x и y менее 10 см и 10 фунтов нужно взять другую формулу и другие опытные точки для определения ее постоянных. Именно, можно взять уравнение конической поверхности, вершина которой совпадает с началом координат и которая проходит через оси x и y .

Уравнение ее будет

$$zy + Azy + Byx = 0.$$

Для определения постоянных A и B довольно взять две опытные точки; тогда найдем

$$A = \frac{3}{7} \text{ и } B = -\frac{11}{7},$$

т. е.

$$z = \frac{-Byx}{y + A} = \frac{11 \cdot yx}{7y + 3x}.$$

Формула для грузов больше 10 фунтов и длины больше 10 см дает результаты, сильно несогласующиеся с опытом, и потому не применима в таких случаях.

Если $y = 10$ и $v = 10$ м/сек, то K при этих или несколько больших величинах y и v выразится приблизительно так:

$$K = \frac{1}{10^4} \left(\sqrt{\frac{131 \cdot 133}{v^2 y} - \frac{1239}{v^2 y}} \right) = \frac{0,0362}{v \sqrt{y}} - \frac{0,1239}{v^2 y} = 0,00102.$$

298) Сила давления ветра, нормального к пластинке, при ширине ее в 100 см, длине в y сантиметров и при грузе в x фунтов, будет равна (в условных миллиметрах)

$$0,092 \times 100 \times y \cdot x = 9,2 \cdot xy = f \cdot xy.$$

Следовательно, коэффициент трения, или отношение величины силы трения к величине силы нормального давления на пластинку при одних и тех же условиях, выразится формулой

$$K = \sqrt{\frac{A}{f^2 y^2} - \frac{B}{f^2 x^2} - \frac{D}{f^2 xy} + \frac{C^2 - 4E}{4 \cdot f^2 x^2 y^2}} - \frac{C}{2fxy}.$$

305) Коэффициент трения, согласно 297 и 298, будет равен

$$K = \sqrt{\frac{A_2}{y^2} + \frac{B_2}{v^4} + \frac{D_2}{v^2 y} + \frac{C_2}{v^4 y^2} - \frac{E_2}{v^2 y}},$$

где A_2, B_2, D_2, C_2, E_2 — также постоянные положительные числа.

306) Эта формула имеет также вид

$$K = \sqrt{\frac{-A}{f^2 y^2} + \frac{-B}{f^2 g^2 v^4} + \frac{-D}{f^2 g v^2 y} + \frac{C^2 - 4E}{4 f^2 g^2 v^4 y^2}} - \frac{C}{2fgv^2 y}.$$

Здесь $f = 9,2$; $y = 7,72$; $f = 84,64$; $fg = 71,024$; $f \cdot g = 653,422$; $f^2 g^2 = 5075,1$; так что получаем для формулы 305: $A_2 = 0,00128913$; $B_2 = 0,00005586$; $D_2 = 0,131133$; $C_2 = 154,868$; $E_2 = 12,392$.

307) Если y выражать в метрах, то формула 306 будет иметь вид

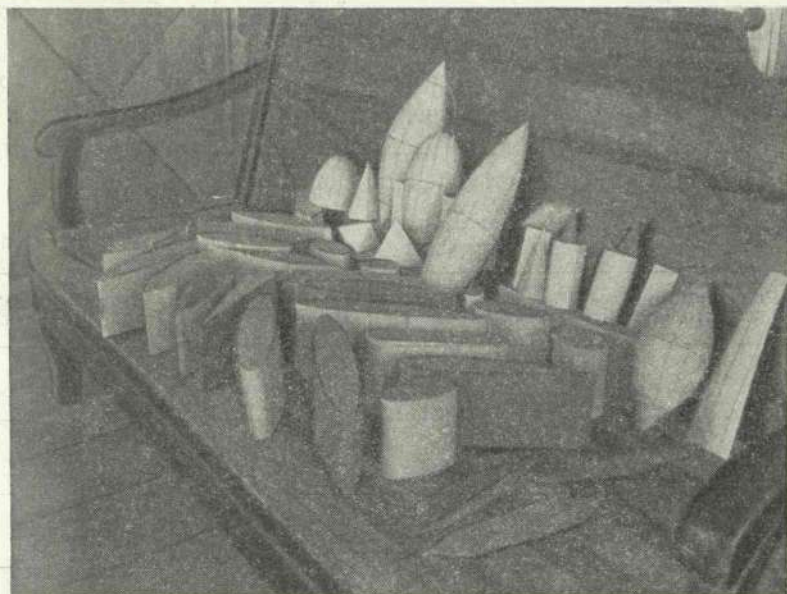
$$K = \frac{1}{10^4} \left\{ \sqrt{\frac{12,89}{y^2} + \frac{5586}{v^4} + \frac{131133}{v^2 y} + \frac{1548680}{v^4 y^2}} - \frac{1239}{v^2 y} \right\}$$

т. е. он имеет величину около $1/1000$. По теории, выведенной из прежних опытов («Давление воздуха», № 93), $K = 1/945$. Отсюда видно, что прежние формулы, по виду весьма непохожие на новые и более простые, дают результаты, не очень различающиеся от теперешних вычислений (по крайней мере при не очень значительных величинах v и y).

В последней формуле можно второй член отбросить, как сравнительно малый, и тогда получим еще более простую формулу

$$K = \frac{0,0362}{v\sqrt{y}},$$

применимую для средних величин v и y , больших 10. Из нее видно, что в таком случае, приблизительно, коэффициент трения обратно пропорционален скорости потока (закон Гагена) и обратно пропорционален



Черт. 119а

квадратному корню из длины y поверхности по направлению потока; т. е. абсолютная величина трения будет пропорциональна скорости v ветра и квадратному корню из длины y поверхности.

309) Сопротивление продолговатых тел вращения (вроде управляемого аэростата) состоит из двух частей: 1) сопротивления от инерции и 2) сопротивления от трения; последнее нам теперь известно и коэффициент трения даже формулирован:

$$K = \frac{0,0362}{v\sqrt{y}},$$

где подразумевается трение прямоугольника или цилиндра, длина которого по направлению потока равна y метров, скорость ветра v м/сек. Абсолютная величина силы трения (в килограммах) наружной стороны

круглого цилиндра, диаметр основания которого равен D , а длина — y , будет по 43:

$$K \cdot 0,071 \cdot S \cdot v^2 = K \cdot 0,071 (\pi \cdot D \cdot y) v^2 = \frac{0,0362 \cdot 0,071}{v \cdot \sqrt{y}} \cdot \pi \cdot D \cdot y \cdot v^2 = \\ = (0,0362 \cdot 0,071 \cdot \pi) \cdot D \cdot \sqrt{y} \cdot v = 0,0080 \cdot 7237 \cdot D \cdot \sqrt{y} \cdot v.$$

Если вообразим сквозной круглый цилиндр такой же длины y и такого же диаметра, как тело вращения, то трение цилиндра не будет во столько же раз больше трения тела, во сколько раз площадь цилиндра больше площади тела. Тут нужен (к предыдущей формуле) особый поправочный коэффициент.

310) Для определения его я произвел ряд опытов над величиною трения плоских поверхностей, ограниченных дугами окружностей (черт. 119).

Вот таблица этих поверхностей, которые слегка были изогнуты, так что составляли как бы часть прежних опытных цилиндров.

Таблица

№ п/п	Длина по направлению потока в см	Ширина в см	Продолговатость	Периметр—двойная ширина
1	28,1	28,1	1,000	56,4
2	40,6	25,7	1,580	51,6
3	34,5	14,0	2,464	28,2
4	37,1	12,5	2,968	25,2
5	56	15,7	3,567	31,6
6	70	15,9	4,402	32,0

311) Поверхности эти располагались, как обыкновенно, в средней части потока, вдоль его направления. Стойки употреблялись те же, что и для цилиндров в 26 см длины.

312) Вычитая сопротивление стоек, получим следующее сопротивление поверхности, приходящееся на 100 см периметра или двойной ширины поверхности (мы полагаем, что величина трения пропорциональна ширине поверхности).

313) Принимая величину приращения трения пропорциональной приращению длины прямоугольника (при небольшом приращении

10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1000	1540	1333	1230	1184	1120	1051	1025	9980	9930
166	1253	1102	1087	9933	98667	98381	98000	97404	97333
1420	1000	9600	9584	9584	9584	9584	9584	9584	9584
1206	9600	9448	9400	9374	9374	9374	9374	9374	9374
1029	9571	94619	9400	9374	9374	9374	9374	9374	9374
9800	9400	9374	9374	9374	9374	9374	9374	9374	9374
9660	9540	9577	9480	9433	94237	94237	94237	94237	94237
9580	9472	94622	94427	94219	94019	93852	93800	93620	93560
9400	9400	9333	94150	9393	93852	93800	93800	93800	93800
94296	94400	94110	94015	93927	93852	93800	93800	93800	93800
9420	9438	94031	93912	93722	93662	93600	93553	93500	93478
94094	9400	93912	93836	93727	93654	93590	93533	93478	93420
94100	94135	93908	93788	93596	93525	93481	93417	93375	93318
94444	94058	93859	93722	93535	93454	93389	93338	93298	93232
94400	94000	93813	93680	93576	93493	93406	93305	93232	93186
9411	961	977	928	955	79	302	324	348	395
9411	961	977	928	955	79	302	324	348	395

Таблица

Груз (фунт.)	10	20	30	40
1	18,9	32,27	49,82	64,18
2	22,20	37,40	54,07	68,41
3				58,51
4				66,27
5	23,73	43,67	62,66	79,11
6	30,00	56,56	80,00	99,40

погрешность ничтожна), определим величину трения прямоугольников при постоянной двойной ширине в 100 см и разной длине, согласно табл. (310).

Сравнив теперь трение заостренной поверхности с трением прямоугольника той же длины и ширины, получим следующие соотношения:

Таблица

№ п/п	Продолговатость	10	20	30	40 фунтов
1	1,00	0,900	0,933	1,013	1,024
2	1,58	0,8476	0,8037	0,8223	0,8144
3	2,46				0,8070
4	2,97				0,7531
5	3,57	0,7084	0,7194	0,7320	0,7152
6	4,40	0,7463	0,7695	0,7692	0,7378

314) Из таблицы видим, что коэффициент этот вообще меньше единицы, что и логично, потому что площадь криволинейной фигуры меньше, чем

прямоугольника. Для круга вывод сомнительный: коэффициент чересчур велик, но это объясняется отчасти большим сопротивлением его ребер, имеющих 1 мм толщины. Сопротивлением этих ребер и разной величиною наклона их к потоку, может быть, объясняется и небольшая разница между коэффициентами фигур разной продолговатости. Эти коэффициенты, исключая круг и беря среднюю величину их, последовательно будут:

Продолговатость:	1,58	2,46	2,97	3,57	4,40
Коэффициент:	0,822	0,807	0,753	0,719	0,756

СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА И ВОЗДУХОПЛАВАНИЕ*

В 1899 г. я обратился с просьбой в Императорскую Академию Наук о выдаче мне средств для производства опытов по сопротивлению воздуха. При этом я указал на предыдущие мои опыты, описанные в «Вестнике опытной физики» (есть и отдельное издание: «Давление воздуха...») и в «Трудах Московского отделения Общества любителей естествознания».

Академия поручила рассмотрение моих работ академику М. А. Рыкачеву. Вследствие его благоприятного отзыва и ходатайства перед Академией, последняя решила выдать мне пособие (470 руб.) на производство новых опытов, программа которых была также представлена мною в Академию. Это было в мае 1900 г. Я принялся тогда же за сооружение большой воздуходувной машины (вроде веялки: крыльчатая воздуходувка или вентилятор), дававшей поток в аршин, высоты и ширины. Сделаны были и измерительные приборы,— и все это чуть не 6 раз переделывалось и перестраивалось, пока не получился воздушный поток достаточно удовлетворительный.

К концу 1900 г. я мог начать клейку моделей и производство опытов. К концу следующего года (16 декабря 1901 г.), я уже выполнил часть предполагаемой программы и представил о сделанных опытах отчет в Академию. Этот отчет составлял только извлечение из моей рукописи и состоял из 80 писчих листов текста и 58 таблиц и чертежей. В предлагаемой статье я желал бы только поделиться с интересующимися наиболее важным и наиболее практическим, что можно вывести из моих работ.

Ни описание приборов, ни чертежи их, ни описание производства опытов — ничто это не может найти тут места. Кто же хочет получить об этом некоторое понятие, тот пусть обратится к моему отдельному изданию («Давление воздуха...»), хотя там чертеж главной машины оказался неверным.

В докладе Академии Наук я не только еще не выполнил предполагаемую программу опытов и работ, но далеко не исчерпал и не решил еще окончательно и тех вопросов, о которых я трактовал в докладе. Работы еще очень много, когда я ее окончу и решу те вопросы, ко-

* Впервые было напечатано в журнале «Научное обозрение», № 5, 1902.

торые мною подняты. По всей вероятности, придется предпринять новые труды, с лучшими приборами, для получения, в некоторых случаях, более точных результатов.

Считаю тут нелишним привести разъяснение некоторых наиболее употребляемых мною далее слов.

Продолговатость тела есть отношение длины его к диаметру наибольшего поперечного сечения. Под диаметром тут подразумевается диаметр круга, равновеликого поперечному сечению тела. Проекция тела есть площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную к направлению воздушного потока. Величина проекции, поэтому, конечно, зависит от положения тела относительно потока.

Число, показывающее, во сколько раз сила давления ветра на плоскую проекцию тела больше сопротивления самого тела, при одинаковых условиях, я называю полезностью формы; потому что, в применении к воздухоплаванию, это число действительно выражает степень выгоды данного тела в отношении легкости рассечения им воздуха. Обратное отношение я называю коэффициентом сопротивления.

Все наши числа и данные относятся к плотности воздуха в 0,0012 плотности воды.

Я также называю коэффициентом K число в формуле

$$P = \frac{K}{1000} \cdot S \cdot V^2,$$

определяющей в килограммах силу давления P на какую-либо поверхность.

В этой формуле S большей частью есть проекция тела (не всегда) и выражается в квадратных метрах (всегда); V есть скорость потока и всегда выражает его секундную скорость в метрах; K есть величина переменная и зависящая от S и V . Она определяется опытом и содержится в приведенных таблицах.

Продолговатость прямоугольника есть отношение его размера по направлению, нормальному к потоку, к размеру по направлению потока. Иногда же, просто,— отношение длины к ширине.

ПЛОСКИЕ ФИГУРЫ.

НАПРАВЛЕНИЕ ВЕТРА НОРМАЛЬНО К ФИГУРЕ

1. Силы давления ветра на равновеликие (т. е. имеющие одну и ту же площадь) непродолговатые фигуры без отверстий равны.

Например, сила давления ветра определенной скорости на круг и равновеликий ему квадрат равны.

2. При одной и той же площади, сила давления ветра определенной скорости на продолговатые фигуры, как прямоугольник, эллипс, и на

сквозные, как кольцо, решетка, больше, чем на сплошные и непродолговатые (см. 1). Разница в силах давления, при одних и тех же площади и скорости ветра, доходит до 40%.

Этим объясняется хорошее действие парусов с отверстиями.

3. Сила давления ветра на фигуру, изменяющуюся подобно самой себе, пропорциональна ее площади и квадрату скорости потока. Такому закону, например, подчиняются квадрат, круг, эллипс с постоянным отношением осей и прямоугольник с постоянным отношением сторон или с неизменной продолговатостью.

4. Практическая формула для силы давления на фигуру, изменяющуюся подобно самой себе, есть

$$P = \frac{K}{1000} \cdot S \cdot V^2,$$

где P есть сила давления в килограммах, K — коэффициент, определяемый из опыта и постоянный для известной формы и плотности воздуха, S — площадь в квадратных метрах, V — скорость ветра в метрах в секунду.

5. В случае фигуры не сквозной и непродолговатой (см. 1) я принимаю, почти согласно Кальете и Колардо, K равным 73 для плотности воздуха, близкой к 0,0012 плотности воды.

Продолговатость прямоугольника	K	Продолговатость прямоугольника	K	Продолговатость прямоугольника	K
1	73	8	90	16	95,7
1,5	74	9	91	17	96,1
2	76,5	10	92	18	96,5
3	80,5	11	92,8	19	96,9
4	83,5	12	93,5	20	97,2
5	85,5	13	94,1	30	98,4
6	87	14	94,7	40	99,4
7	89	15	95,2	50	100,1

6. Сила давления на прямоугольник при постоянной его площади и неизменной скорости ветра увеличивается с увеличением его продолговатости; так что K в предыдущей формуле изменяется сообразно продолговатости. Опыт приводит к такой зависимости коэффициента K от продолговатости прямоугольника (см. табл. на стр. 210).

Эту зависимость я выражаю кривой, откладывая по оси абсцисс продолговатость, а по оси ординат — величину K . С помощью такой кривой можно отыскать K и для всякой продолговатости.

Из кривой и таблицы видно: сила давления на квадрат и на мало продолговатый прямоугольник, при одних и тех же площади и скорости ветра, почти одинакова — до продолговатости 1,3; затем, с дальнейшим увеличением продолговатости, сила давления возрастает сначала довольно быстро, а затем все медленнее и медленнее, приближаясь к пределу, превосходящему силу давления на квадрат процентов на 40.

7. Для определения силы давления на прямоугольник можно употребить формулу (4), подобрав из таблицы или по кривой коэффициент, соответствующий продолговатости прямоугольника. Думаю, что эта же формула применима и к эллипсу.

НОРМАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ НА ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ ПЛАСТИНКИ, НАКЛОНЕННЫЕ К ВОЗДУШНОМУ ПОТОКУ

8. Равнодействующая всех сил давления ветра на наклонную пластинку почти перпендикулярна к ней; об этой силе я и буду говорить, почему и называю ее нормальной силой давления.

9. Сила давления на прямоугольник или другую фигуру, неизменным образом расположенную относительно потока, хотя бы и наклоненную к нему под определенным углом, пропорциональна квадрату скорости потока.

10. Сила давления ветра на прямоугольник (тут же подразумевается и квадрат), одна из сторон которого (длинная или короткая, что не все равно) перпендикулярна к направлению потока, при скорости его в один метр в секунду и при единице площади, выражена в следующей таблице. Числа ее выражают также коэффициент K для формулы (4), которая, на основании предыдущего, годится и для определения силы давления на наклонный квадрат или прямоугольник.

11. Если угол наклона прямоугольника составляет 90° , то коэффициент K , для формулы (4), лучше брать из таблицы (6).

12. Принимая угол за абсциссу, а коэффициент K за ординату, можем зависимость между углом наклона и силой давления выразить кривой, особой для всякой продолговатости. В таблице продолговатость выражается (условно) отрицательно в том случае, когда короткая сторона прямоугольника перпендикулярна к потоку, и положительно, — когда длинная

сторона нормальна к направлению потока. По кривым этим можно найти давление, соответствующее любому углу наклона.

	Продолговатость	Наклон к потоку в градусах														
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
25×5 - Короткая сторона прямо- угольника нормальна к потоку	-5	3	77	13	21	30	40	50	59,2	69	79	85	86	84,5	84	85
	-4	4	11	18	26	34	44	54	62,7	72	79	83	83,5	82,5	82,5	82
	-3	5	12	20	29	40	51	60,5	68	75	78,6	79,5	79,5	79,5	79,7	80,0
	-2	6	14	24	36	48	58,5	70	78	81	82	81,3	80,5	79	78	78
10×10 (квадрат)	+1	9	21	32	44	54,5	63	67,7	70,5	72,5	73,6	74,8	75	74,8	73,7	73,6
5×10	+2	12	27	37	49	63,3	74,5	81,3	86,2	89,1	90,1	89,5	88,5	87,3	85,5	83,8
15×15	+3	17	32	39,5	52	68	80,3	89,6	94,5	96,5	96,1	94,5	91,5	88,3	83,5	78,8
15×20	+4	17,5	35,5	42	55,4	72	84,2	93,6	98,5	100,5	99,8	97,5	93,5	88,5	82,5	76,5
15×25	+5	19	36	44	54,5	72	84,5	94,5	100,5	102,5	101,5	98,5	93,5	87,5	80,5	73,5

13. Принимая же за абсциссы продолговатость от -5 до $+5$, получим ряд кривых, каждая из которых выражает зависимость между продолговатостью и силой давления при неизменном наклоне.

14. Как те, так и другие кривые представляют сечения одной и той же поверхности, уравнение которой $z = F(x, y)$ я не буду определять до более точных опытов, с более совершенными аппаратами. В этом уравнении показано, что сила давления z или коэффициент K есть функция наклона x пластинки к потоку и продолговатости y прямоугольника.

15. Рассматривая столбцы таблицы, видим, что при неизменном угле наклона, градусов до 25, коэффициент K непрерывно возрастает с возрастанием продолговатости от -5 до $+5$. Так, при продолговатости 5 и угле наклона в 10° сила давления на одну и ту же пластинку будет в 5 раз больше, если длинная ее сторона будет перпендикулярна к потоку, чем в том случае, когда к потоку перпендикулярна короткая ее сторона.

16. Из таблицы также видно, что разница в коэффициентах K в таком случае будет тем больше, чем наклон пластинки к потоку меньше и чем пластинка менее продолговата.

17. Ланглей и другие нашли, что сила давления на одну и ту же пластинку, при одном и том же наклоне, зависит от ее расположения в потоке; но сколько-нибудь точной зависимости тут не нашли и не выразили ее ни таблицами, ни кривыми.

Также неизвестна и зависимость коэффициента K для продолговатой пластинки от ее продолговатости, выраженная мною в таблице (6).

Обыкновенно (да пожалуй и всегда, насколько мне известно) принимается в расчет только площадь пластинки и наклон ее к направлению потока; значение же продолговатости игнорируется как неизвестное, хотя и существующее²⁵.

18. Из кривых, построенных по таблице (10), видно, что сила давления на прямоугольное крыло, длинная сторона которого перпендикулярна к направлению потока, выражается следующей простой формулой:

$$P = \frac{K}{1000} i S v^2,$$

если только угол наклона крыла к ветру не превышает 10—15°. В этой формуле i есть угол наклона в градусах, P — сила давления в килограммах, S — площадь в квадратных метрах. v — скорость потока в метрах в секунду, а K есть коэффициент, величина которого для прямоугольников разной продолговатости выражается следующей таблицей.

Продолговатость прямоугольника, длинная сторона которого перпенди- кулярна к потоку	Коэффициент K . Наклон не более 15°	Продолговатость прямоугольника длинная сторона которого перпенди- кулярна к потоку	Коэффициент K . Наклон не более 15°
0,00	2,10	3,25	3,31
1,25	2,14	3,50	3,28
1,50	2,28	3,75	3,44
1,75	2,50	4,00	3,50
2,00	2,70	4,25	3,54
2,25	2,86	4,50	3,57
2,50	3,00	4,75	3,59
2,75	3,11	5,00	3,60
3,00	3,20		

19. Из всего предыдущего видно, почему плоские крылья насекомых расположены длинной своей стороной перпендикулярно к встречному воздушному потоку (или к направлению полета).

20. Последняя формула применима к вычислениям, относящимся к полету насекомых или аэроплана, наклон плоских крыльев которого к потоку не превышает 15° .

Заметим, что под v можно подразумевать не только скорость ветра, но и скорость движения пластинки в неподвижном воздухе, или, точнее, в спокойной атмосфере. Можно даже подразумевать и то и другое, одним словом, v есть относительная скорость модели и воздуха. Это замечание относится и ко всем другим случаям сопротивления.

21. Силу давления²⁶ на всякую наклонную к потоку плоскую фигуру ученые определяют до сих пор одной какой-либо формулой. Так, известны формулы Ланглей — Дюшмена, Ньютона, Лесли, лорда Рейля. Я думаю теперь, что некоторые из этих формул совсем негодны, другие применимы только к квадрату или, приблизительно, к другой какой-нибудь непродолговатой форме, как, например, круг. Такова формула Рейля, которая при острых углах наклона, градусов до 10, дает числа, близкие к моим опытам, и формула Ланглей, которая согласуется с моими числами при углах менее острых и немного вообще противоречит моим опытам.

**СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРЯМОГО КРУГЛОГО ЦИЛИНДРА, ОСЬ КОТОРОГО
(ИЛИ ВЫСОТА): а) ПАРАЛЛЕЛЬНА НАПРАВЛЕНИЮ ПОТОКА,
б) ПЕРПЕНДИКУЛЯРНА К НЕМУ И в) НАКЛОННА**

22. Сопротивление круглого цилиндра, ось которого параллельна направлению потока, выражается следующей таблицей.

Площадь S в формуле (4) означает в данном случае площадь основания круглого цилиндра или площадь основания какой-нибудь прямой призмы с малопродолговатым основанием (в квадратных метрах).

Продолговатость цилиндра, или отношение высоты его к диаметру основания	Коэффициент K для формулы (4)	Продолговатость цилиндра, или отношение высоты его к диаметру основания	Коэффициент K для формулы (4)	Продолговатость цилиндра, или отношение высоты его к диаметру основания	Коэффициент K для формулы (4)
0,0	73,6	0,9	53,0	3,0	62,5
0,2	73,6	1,0	51,5	3,5	64,5
0,3	73,4	1,2	50,5	4,0	66,0
0,4	72,5	1,4	50,7	4,5	67,0

Продолжение таблицы

Продолговатость цилиндра, или отношение высоты его к диаметру основания	Коэффициент K для формулы (4)	Продолговатость цилиндра, или отношение высоты его к диаметру основания	Коэффициент K для формулы (4)	Продолговатость цилиндра, или отношение высоты его к диаметру основания	Коэффициент K для формулы (4)
0,5	68,0	1,6	51,8	5,0	68,0
0,6	62,5	1,8	54,1	5,5	68,5
0,7	57,5	2,0	56,5	6,0	69,0
0,8	54,6	2,5	60,0		

23. Я производил опыты с цилиндрами разной величины и убедился, что приведенная таблица только приблизительно верна, если применять ее к цилиндрам, имеющим в диаметре основания больше 10 сантиметров и, в особенности, меньше; также если и скорость ветра сильно отличается от одного метра в секунду.

24. Из таблицы видно, что сопротивление при оси цилиндра, параллельной потоку, сначала уменьшается с увеличением продолговатости цилиндра, затем непрерывно, хотя и медленно, возрастает. Аналогичное явление замечено Дюбуа и Дюшменом для сопротивления тел в воде.

25. Если направление потока перпендикулярно к оси, то коэффициент сопротивления K выражается таблицей:

Продолговатость, или отношение высоты к диаметру	Коэффициент K для формулы (4)	Отношение сопротивления к силе давления на проекцию	Продолговатость, или отношение высоты к диаметру	Коэффициент K для формулы (4)	Отношение сопротивления к силе давления на проекцию	Продолговатость, или отношение высоты к диаметру	Коэффициент K для формулы (4)	Отношение сопротивления к силе давления на проекцию
0,2	33,8	0,460	2,0	40,6	0,552	4,4	46,4	—
0,3	34,2	—	2,2	41,1	0,558	4,6	46,7	—
0,4	34,7	—	2,4	41,6	—	4,8	46,9	—
0,5	35,0	0,475	2,6	42,3	—	5,0	47,1	0,640
0,6	35,4	—	2,8	42,8	—	5,2	47,3	—
0,7	35,7	—	3,0	43,3	0,588	5,4	47,4	—
0,8	36,1	—	3,2	44,0	—	5,6	47,5	—
1,0	37,1	0,504	3,4	44,5	—	5,8	47,6	—

Продолжение таблицы

Продолговатость, или отношение высоты к диаметру	Коэффициент K для формулы (4)	Отношение сопротивления к силе давления на проекцию	Продолговатость, или отношение высоты к диаметру	Коэффициент K для формулы (4)	Отношение сопротивления к силе давления на проекцию	Продолговатость, или отношение высоты к диаметру	Коэффициент K для формулы (4)	Отношение сопротивления к силе давления на проекцию
1,2	37,7	—	3,6	45,0	—	6,0	47,7	0,648
1,4	38,5	0,523	3,8	45,4	0,617	6,2	47,7	—
1,6	39,8	0,534	4,0	45,8	0,622			
1,8	39,8	—	4,2	46,2	—			

Площадь S , входящая в формулу (4), есть в данном случае площадь продолговатого осевого сечения цилиндра. Как в этой, так и в предыдущей таблице K будет уменьшаться с увеличением скорости потока и диаметра основания цилиндра (выше 10 см) и, наоборот, K будет больше, если диаметр основания цилиндра будет меньше 10 см, а также и скорость V меньше одного метра в секунду. Но в последнем случае (уменьшения V и D) ошибка будет больше.

26. Из таблицы можно вывести, что сопротивление, приходящееся на единицу площади продольного сечения цилиндра, возрастает непрерывно с удлинённостью цилиндра, стремясь к постоянному пределу. По крайней мере это справедливо, начиная с продолговатости 0,2; явление это отчасти аналогично явлению, наблюдающемуся для прямоугольной пластинки (см. 6).

27. Сопротивление круглой проволоки разной толщины выражается таблицей:

Толщина проволоки в миллиметрах	Коэффициенты K к формуле (4), относящиеся к скорости потока в метрах в секунду:			Толщина проволоки в миллиметрах	Коэффициенты K к формуле (4), относящиеся к скорости потока в метрах в секунду:		
	1 $\frac{м}{сек}$	2 $\frac{м}{сек}$	3 $\frac{м}{сек}$		1 $\frac{м}{сек}$	2 $\frac{м}{сек}$	3 $\frac{м}{сек}$
0,5	95	70	61,0	6	65	59,5	55,5
1	85	67,5	59	7	64,7	59,0	55,5
2	75	64	57,5	8	64,5	58	55,5
3	70,5	63	56,5	9	64	58	55,5
4	67,5	61,0	55,5	10	64	58	55,5
5	66	60,0	55,5				

Например, при скорости ветра, близкой к 3 метрам в секунду, сопротивление проволоки толщиной в 1 мм, в килограммах, будет: $P = \frac{59}{1000} \times S \cdot V^2$, где S есть площадь продольного осевого сечения проволоки в квадратных метрах. При скорости, большей 3 метров в секунду, K будет несколько менее.

28. Замечательно, что сопротивление тонкой проволоки, при небольшой скорости ветра, может быть больше, чем сила давления на квадратную пластинку, равновеликую площади наибольшего продольного сечения проволоки. Действительно, для квадратной пластинки K равно 73 (см. 5), а для проволоки в некоторых случаях больше (см. таблицу).

29. Я произвел еще много опытов с сопротивлением цилиндров и убедился, что это сопротивление, помимо прочего, зависит также от диаметра основания и скорости потока, что видно из последней таблицы.

В моих опытах коэффициент сопротивления колебался от 0,46 до 1,29. При большей разнице в диаметрах и скоростях это колебание было бы еще значительней. Из сказанного видно, что вопрос о сопротивлении даже такого простого тела, как прямой круглый цилиндр, — вопрос сложный, попытку решить который мы отложим до полного выяснения законов трения. Также видно, насколько несостоятельны обычные теоретические вычисления коэффициента сопротивления, которые дают (при всякой основной формуле) определенную величину коэффициента, независимо от скорости потока, продолговатости цилиндра и диаметра его основания (см. 67).

30. Сопротивление цилиндра бесконечно большой длины, ось которого наклонна к направлению потока, выражается соединением предыдущей таблицы (27) и новой, здесь предлагаемой:

Угол наклона оси цилиндра к потоку в градусах	Поток горизонтален		Угол наклона оси цилиндра к потоку в градусах	Поток горизонтален	
	коэффициент k_1 горизонтальной составляющей сопротивления	коэффициент k_2 вертикаль- ной состав- ляющей		коэффициент k_1 горизонтальной составляющей сопротивления	коэффициент k_2 вертикаль- ной состав- ляющей
0	0,06823	0,0000	50	0,5340	0,3361
10	0,09063	0,06103	60	0,7065	0,3263
20	0,1417	0,1296	70	0,8704	0,2717
30	0,2356	0,2034	80	0,9816	0,1609
40	0,3644	0,2863	90	1,0000	0,0000

Таким образом, составляющие сопротивления наклонной к потоку проволоки определяются формулами

$$P_1 = \frac{K}{1000} \cdot k_1 \cdot S \cdot v^2$$

и

$$P_2 = \frac{K}{1000} \cdot k_2 \cdot S \cdot v^2,$$

где K взято из таблицы 27, а k_1 и k_2 — из последней таблицы. Под S надо подразумевать площадь осевого сечения цилиндра в кв. метрах. Таблицы эти могут применяться для определения силы давления ветра на проволоку или бечевку, удерживающую змей (аэроплан) или аэростат, а также для определения формы ее изгиба и вообще силы давления на все наклонные цилиндрические части каких-либо сооружений.

31. Сопротивление части боковой поверхности прямого круглого цилиндра, взятой между двумя образующими, когда длина дуги сечения, нормального к образующим, постепенно увеличивается, выражается следующей таблицей.

Отношение стрелки к хорде	K в случае, когда вогнутость обращена к ветру	K в случае, когда выпуклость обращена к ветру	Отношение обоих сопротивлений	Отношение стрелки к хорде	K в случае, когда вогнутость обращена к ветру	K в случае, когда выпуклость обращена к ветру	Отношение обоих сопротивлений
0,0	74	74	1,00	0,3	76	49	1,55
0,1	74	60	1,23	0,4	82	44	1,78
0,2	74	55	1,35	0,5	84	42	2,00

Четырехугольник, составленный образующими и хордами оснований, имел во всех испытанных моделях форму квадрата.

Сечение поверхности, нормальное к образующей, дает дугу круга. Первый столбец показывает отношение величины стрелки этой дуги к хорде ее.

Из таблицы видно, что даже значительная вогнутость (до 0,3) мало увеличивает сопротивление поверхности.

32. Отсюда видно, что вогнутость крыла птицы, при вертикальном движении ее в покойной атмосфере, мало полезна птице. Значение этой вогнутости разъяснится нам далее.

Напротив, сопротивление выпуклых цилиндрических поверхностей быстро уменьшается с увеличением их выпуклости.

Отношение сопротивлений для одной и той же поверхности, поставленной выпуклостью против ветра или вогнутостью против ветра, доходит до двух (см. последний столбец).

33. В формуле 4, когда определяем сопротивление цилиндрической поверхности, под S надо подразумевать площадь проекции цилиндра на плоскость, перпендикулярную к направлению потока.

34. Опыт показывает, что сопротивление полуцилиндрической поверхности, поставленной боком, только в 1,7 раза меньше, чем в том случае, когда она обращена выпуклостью к ветру (осевое сечение нормально к потоку).

КВАДРАТНЫЕ ПЛАСТИНКИ, ЦИЛИНДРИЧЕСКИ ИЗОГНУТЫЕ (ТАК, ЧТО СОСТАВЛЯЮТ ЧАСТЬ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРЯМОГО КРУГЛОГО ЦИЛИНДРА, МЕЖДУ ДВУМЯ ОБРАЗУЮЩИМИ) И НАКЛОННЫЕ К НАПРАВЛЕНИЮ ПОТОКА ПОД РАЗНЫМИ УГЛАМИ

35. Цилиндрические поверхности располагались так, что их образующие (или ось цилиндра) были нормальны к направлению потока. Составляющая сопротивления по направлению ветра и составляющая по направлению, перпендикулярному к ветру и к образующим (или к оси цилиндрической поверхности), определялись мною путем опыта. Если вообразить себе цилиндрическое крыло, образующие которого горизонтальны, то первую силу, по направлению ветра, можно назвать тягой (лобовым сопротивлением); вторую же мы назовем подъемной силой крыла, потому что она стремится двигать крыло по вертикальному направлению. В следующей таблице [см. стр. 220] даны величины тяги и подъемной силы и, кроме того, отношение подъемной силы к тяге или величине подъемной силы, приходящейся на единицу силы тяги.

36. Если сделать сечение цилиндрической поверхности плоскостью, нормальной к оси цилиндра, то в сечении получится дуга круга, имеющая стрелку и хорду. Отношение длин этих линий (вогнутость) выражено в первом столбце таблицы.

Под наклоном следует понимать наклон плоскости, проходящей через хорды, к направлению потока (см. 1-ю строку).

37. Таблица выражает коэффициент K для формулы 4, где под S надо разуметь в случае, когда отношение стрелки к хорде равно $\frac{1}{2}$, площадь проекции поверхности на плоскость хорды. Для других же поверхностей S означает площадь самой кривой поверхности.

38. Из таблицы видно, что наибольшая подъемная сила, для всех поверхностей, относится к наклону их, близкому к 35° .

Странно, что подъемная сила всех цилиндрических крыльев, обращенных вогнутостью к ветру, сохраняется и при нулевом их наклоне к ветру, т. е. при отсутствии наклона. С помощью кривых изменения подъемной

Выпуклость или отношение к хорде		0	2,5	5	7,5	1,0	12,5	15	17,5	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
Углы в градусах																			
Плоскость		0	4,4	9,3	14,0	19,5	25,0	30,0	35,5	40,5	49,5	55,0	56,0	54,5	47,0	36,6	25,5	13,0	0
			4,5	5,0	6,0	7,5	9,5	12,5	15,5	19,0	28,0	39,0	47,0	53,5	62,0	70,5	75,0	75,0	74,0
		2	2,2	2,8	4,0	5,5	7,5	10,0	13,0	16,0	23,0	30,0	38,0	45,6	56,5	65,0	70,0	72,5	73,5
			3,00	3,30	3,57	3,51	3,53	3,16	3,00	2,79	2,32	1,85	1,56	1,32	—	—	—	—	—
Отношение подъемной силы к тяге		0	2	3,32	3,50	3,50	3,33	3,00	2,73	2,53	2,15	1,80	1,47	1,19	—	—	—	—	0
1/32		11	13,5	16,5	21,4	26,5	33,5	39,5	46,5	53,0	59,0	72,0	7,35	70,5	57,5	44,0	30,0	15,0	0
		4,00	4,5	5,0	6,0	7,5	9,5	12,5	15,5	19,0	28,0	39,0	47,0	53,5	62,0	70,5	75,0	75,0	74,0
		2,75	3,00	3,30	3,57	3,51	3,53	3,16	3,00	2,79	2,32	1,85	1,56	1,32	—	—	—	—	0
1/12		14,7	20,5	27,0	34,0	40,5	48,5	55,5	63,5	70,3	81,0	86,5	84,7	84,5	60,0	44,5	30,0	15,5	0
		7,0	7,0	7,5	8,5	10,0	12,5	16,0	20,3	24,5	33,5	42,0	50,5	58,3	64,0	71,0	75,0	76,0	74,0
		2,10	2,93	3,60	4,00	4,05	3,88	3,47	3,13	2,87	2,42	2,06	1,68	1,45	—	—	—	—	0
1/8		11,0	18,5	25,5	32,0	39,0	46,0	53,0	60,0	66,0	77,0	83,3	84,0	80,5	63,0	44,5	30,0	15,0	0
		10,0	11,0	12,5	14,0	16,5	18,5	21,0	24,0	27,0	35,0	44,0	52,5	60,5	64,5	69,5	74,0	76,0	75,0
		1,0	1,68	2,48	2,29	2,36	2,49	2,52	2,50	2,44	2,20	1,89	1,60	1,33	—	—	—	—	—
1/7		10,0	18,0	24,5	31,0	37,5	4,40	50,5	56,0	61,5	71,5	79,0	82,0	82,0	70,0	50,4	32,5	16,5	0
		12,3	13,3	14,7	16,5	18,5	20,5	22,8	26,0	28,6	30,7	45,4	54,0	62,0	61,5	69,5	74,5	76,3	76,0
		0,813	1,35	1,67	1,88	2,27	2,15	2,21	2,15	2,15	2,33	1,74	1,52	1,32	—	—	—	—	—
1/2		12,5	12,3	12,5	13,5	15,6	18,5	25,5	35,5	49,0	82,0	95,5	99,5	100,0	95,0	81,0	42,0	19,3	0
		24,6	23,8	23,5	23,8	24,5	25,5	27,5	30,5	34,0	46,5	59,5	68,3	74,5	82,5	85,7	87,0	87,5	86,0
		0,51	0,52	0,53	0,57	0,61	0,73	0,93	1,164	1,440	17,64	1,605	1,458	1,342	1,151	—	—	—	—
0,083=1/12. Подъемная сила		-14,8	—	+2	—	+12,5	—	+21,5	—	+28,8	34,0	32,5	39,2	39,8	37,5	31,8	23,5	13	0

0,083=1/12. Подъемная сила

силы я нашел, что для отношения стрелки к хорде в $\frac{1}{12}$ подъемная сила исчезает лишь при отрицательном наклоне, равном минус $4\frac{1}{2}^\circ$. По Лилиенталю же, производившему опыты для той же вогнутости в $\frac{1}{12}$, — лишь при минус 9° .

39. Подъемная сила крыла, обращенного выпуклостью к ветру, чрезвычайно мала (см. последнюю строку таблицы).

40. Вот выводы, полученные мною с помощью построения кривых и вычислений.

а) Наивыгоднейшая вогнутость цилиндрической поверхности, в применении к аэроплану или птицам, близка к $\frac{1}{15}$; по Лилиенталю же, к $\frac{1}{12}$.

Вогнутость эта облегчает работу летания, сравнительно с плоскими крыльями, раза в два. Присоединяя сюда еще выгоды продолговатости крыльев, найдем, что то и другое облегчает работу летания птиц раза в 4.

У насекомых вес крыльев составляет ничтожную долю их веса и не обременяет насекомое. Мудрость природы ограничивается здесь лишь применением продолговатости крыльев. На высшей ступени животного мира и экономия в весе крыльев крайне важна, так как вес крыльев тяжелых птиц составляет не малую долю их веса; и вот тут природа вторично умудряется, придавая их крыльям еще и вогнутость и тем уменьшая их вес и поверхность.

41. б) Наивыгоднейший наклон цилиндрического крыла составляет $12\frac{1}{2}^\circ$. Впрочем, работа аэроплана изменяется не более как на 16%, при изменении угла наклона аэроплана к потоку в пределах $7\frac{1}{2}$ и 20° . Тут подразумевается отсутствие всяких сопротивлений, кроме сопротивления крыльев. В противном случае угол будет более $12\frac{1}{2}^\circ$.

42. в) Для наивыгоднейшей работы гребного винта в воздухе его лопасти не должны быть плоскими, что противоречит опытам Гирама Максима с гребными винтами разного рода.

43. г) Наименьшая работа аэроплана, с неподвижными крыльями, имеющими наивыгоднейшие — наклон, продолговатость и вогнутость (конечно, при простой цилиндрической форме), выражается формулой

$$T = 0,414P\sqrt{\frac{P}{S}},$$

где T есть работа тяги в килограммометрах, не считая других сопротивлений, кроме крыльев (влияние винта и т. д.); P есть вес снаряда со всем содержимым в килограммах; S — поверхность крыльев в квадратных метрах.

Полная наименьшая работа аэроплана, принимая в расчет все сопротивления и потери, на основании аналогий с сопротивлением в воде,

по Фруду, приблизительно, будет равна

$$T = 1,242 P \sqrt{\frac{P}{S}}.$$

Формула эта почти удовлетворяет данным о летательных машинах (аэропланах) Максима, Ланглея и Адера. Если же аппараты Максима и Адера не летали, то это могло быть оттого, что крылья их не согласовались с наивыгоднейшими условиями для наименьшей работы полета.

ПРЯМЫЕ ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ ЦИЛИНДРЫ

44. Испытывались исключительно прямые эллиптические цилиндры, образующие которых располагались перпендикулярно к потоку. Одна из осей основания при этом располагается вдоль потока. Отношение этой оси к другой, нормальной к потоку, я называю продолговатостью цилиндра.

Когда цилиндры располагались длинной осью эллиптического основания вдоль потока, то продолговатость цилиндра была больше единицы, в противном случае — меньше. Продолговатость наших цилиндров колебалась от 0,164 до 8,63. Высота всех цилиндров составляла 10 см, малая ось эллипса, или ширина, раза в два меньше.

45. Тут я привожу коэффициент K в формуле 4, вычисленный для трех скоростей потока: в 1, 2 и 3 м/сек.

46. Коэффициент K в формуле (4)

$$P = \frac{K}{1000} \cdot S \cdot V^2$$

должен быть выбран сообразно продолговатости цилиндра и скорости потока.

Для скорости, большей 3 м/сек, K будет меньше, чем в столбце таблицы с заголовком (3).

При скорости же, меньшей одного метра в секунду, K , напротив, будет больше, чем в столбце с заголовком (1).

Под S надо разуметь площадь проекции цилиндра в квадратных метрах.

47. Формула применяется к цилиндрам таких же приблизительно размеров, как наши. Для больших размеров K будет меньше, и наоборот. Если отношение высоты цилиндра к ширине будет иное, коэффициент будет также немного изменяться.

48. Из таблицы видно, что при увеличении продолговатости цилиндра его сопротивление уменьшается до значения продолговатости, равного 6, а затем при дальнейшем ее увеличении начинает увеличиваться. Это замечается при всех испытанных скоростях потока.

49. Далее видно, что коэффициент K уменьшается с увеличением скорости потока; так что сопротивление возрастает не так быстро, как квадрат скорости потока.

При продолговатости, немного большей или меньшей единицы (т. е. когда эллиптический цилиндр близок к прямому круглому цилиндру), коэффициент K почти не изменяется, что еще лучше видеть, построив кривую сопротивления K в зависимости от продолговатости цилиндра.

50. Полезность формы есть отвлеченное число, показывающее, во сколько раз сила давления на квадрат, равновеликий площади проекции тела, больше сопротивления самого тела, при тех же условиях.

Полезность цилиндров варьировала в пределах наших опытов от 1 до 4,8. Полезность формы цилиндров возрастает с увеличением их продолговатости (только до продолговатости, равной 6), скорости потока, абсолютных размеров и с уменьшением высоты сравнительно с шириною.

Продолговатость	K			Продолговатость	K		
	Скорость потока в метрах в секунду				Скорость потока в метрах в секунду		
	1	2	3		1	2	3
0,2	70,0			3,2	22,0	20,0	18,0
0,3	65,5			3,4	21,6	19,6	17,5
0,4	60,5			3,6	21,1	19,1	16,8
0,5	55,5			3,8	20,9	18,7	16,4
0,6	51,0			4,0	20,6	18,4	16,0
0,7	46,5			4,2	20,3	18,1	15,7
0,8	44,5			4,4	20,2	17,8	15,4
0,9	43,5			4,6	20,2	17,6	15,1
1,0	43,0			4,8	20,2	17,6	15,0
1,1	42,5			5,0	20,1	17,5	15,0
1,2	41,0			5,2	20,1	17,6	14,9
1,3	35,0			5,4	20,0	17,6	14,9
1,4	33,0	32,0	31,0	5,6	20,0	17,5	14,8
1,6	31,0	29,5	28,0	5,8	19,9	17,5	14,7
1,8	29,0	27,5	26,0	6,0	19,9	17,5	14,6
2,0	28,0	26,0	24,5	6,5	20,0	17,7	14,7
2,2	26,5	24,5	23,0	7,0	20,6	18,0	15,2
2,4	25,5	23,5	22,0	7,5	21,0	18,5	15,6
2,6	24,4	22,4	21,6	8,0	21,4	19,0	15,9
2,8	23,5	21,5	19,5	8,5	22,0	19,5	16,3
3,0	22,8	20,6	18,8	9,0	22,8	20,4	16,6

УДЛИНЕННЫЕ ПРЯМЫЕ ЦИЛИНДРЫ И ПРИЗМЫ РАЗНООБРАЗНЫХ ФОРМ

51. Продолговатость всех сравниваемых призм и цилиндров была почти одинакова и близка к 5.

Отношение высоты к наибольшей ширине, как и у эллиптических цилиндров, равнялось 2. Результаты опытов выражены в следующей таблице.

Форма основания цилиндра или призмы Все основания симметричны относительно потока Фигуры криволинейные не имеют углов с боков	Скорость потока в метрах в секунду	Коэффициент для формулы (4). Положение наиболее выгодное	Коэффициент при обратном положении модели	Полезность формы	То же, но при обратном положении модели
1	2	3	4	5	6
Прямоугольник	2 метра в секунду	58,85	—	1,251	—
Прямоугольник, имеющий на обоих концах углы в 55°	»	29,20	—	2,52	
То же, но на одном конце полукруг. Полукругом к ветру и обратно	»	28,05	27,95	2,62	2,63
То же, но с обоих концов полукруги	»	26,12		2,82	
Равнобедренный треугольник (клин). Острым углом к ветру и обратно	»	23,10	26,85	3,187	1,29
Ромб, удлиненный	»	16,69	—	4,345	—
Симметричный четырехугольник; передний угол равен 30°, задний 20°	»	—	—	—	—
Большим углом вперед и обратно	»	16,67	18,20	4,41	4,04
Эллипс	3 метра в секунду	15,24	—	4,83	—
Дуги окружностей равных радиусов	»	12,51	—	5,89	—
Передняя часть (обращенная к ветру) эллиптическая, задняя ограничена дугами окружностей	»	13,56	14,90	5,43	4,94
Передняя часть ограничена дугами меньших радиусов, чем задняя	»	12,51	14,51	5,89	5,08
Передняя часть представляет эллипс менее продолговатый, чем задняя	»	14,21	16,29	5,18	4,52
Подражание птицам и рыбам. Голова острая и с боков немного вдавленная	»	12,66	16,79	5,82	4,31
То же, но голова эллиптическая	»	12,40	16,54	5,94	4,45
То же, но голова острая и ограничена дугами окружностей	»	12,40	15,14	5,94	4,88

52. Из таблицы видно, что некоторые угловатые тела дают полезность формы, лишь немного уступающую полезности эллиптического цилиндра. Вообще последний представляет форму, далеко не самую лучшую в отношении сопротивления.

Наивысшая полезность, при скорости потока в 3 м/сек, доходит до 5,94, а при скорости в 4 м/сек — до 7. Наибольшая полезность чаще получается у тел, передняя часть которых, обращенная к потоку, тупее задней.

Любопытно сравнить полученные нами числа с данными о сопротивлении воды движению речных плоскодонных судов, которые тоже можно принимать за прямые цилиндры с криволинейными основаниями, только, сравнительно, очень низкие.

Для хорошо построенных речных пароходов принимается коэффициент сопротивления (см. в начале статьи объяснения употребляемых здесь терминов) от 0,16 до 0,20. Если, согласно Дюбуа и Дюшмену, для плоской пластинки, движущейся перпендикулярно своей плоскости, принять этот коэффициент равным 1,43, то полезность форм лучших речных пароходов будет колебаться между 9 и 7,15. Средняя полезность составит около 8,4, что не так далеко от полезности (5,94) лучшей из наших форм, при

Скорость в метрах в секунду	Эллиптический цилиндр		Тело наилучшей формы	
	К	Полезность	К	Полезность
1	19,0	3,874	19,00	3,874
$\sqrt{2}$	18,0	4,089	17,25	4,267
$\sqrt{3}$	17,33		16,17	
2	16,75	4,394	15,12	4,866
$\sqrt{5}$	16,02		14,30	
$\sqrt{6}$	15,75		13,58	
$\sqrt{7}$	15,36		13,07	
$\sqrt{8}$	15,00		12,51	
3	14,67	5,018	12,22	6,022
$\sqrt{10}$	14,44		11,90	
$\sqrt{11}$	14,14		11,59	
$\sqrt{12}$	13,88		11,33	
$\sqrt{13}$	13,64		11,12	
$\sqrt{14}$	13,38		10,89	
$\sqrt{15}$	13,17		10,70	
4	12,97	5,676	10,50	7,010

скорости потока в 3 метра в секунду. При скорости в 4 м/сек эта полезность уже достигает 7, что еще ближе к полезности пароходов.

Полезность пароходов несколько выше полезности наших моделей не столько от их формы, сколько от величины их размеров, которые, как увидим, имеют влияние на коэффициент сопротивления.

53. Сопротивление эллиптического цилиндра с продолговатостью 5,7 и наилучшей, птицеподобной (в разрезе) формы с продолговатостью 4,7 выражено в таблице [см. стр. 225].

Из таблицы видно, что коэффициенты сопротивления, с увеличением скорости, уменьшаются, а полезность, напротив, возрастает. При небольшой скорости полезность у обоих приводимых тел одинакова, но чем скорость больше, тем больше обнаруживается разница в пользу наилучшей формы.

54. Как здесь, так и всюду, обнаруживается некоторая аналогия между явлениями сопротивления в воде и в воздухе, хотя и кажется, что столь разнородные стихии, как вода и воздух, не должны бы давать сходных явлений.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ОБРАЗОВАННЫХ ВРАЩЕНИЕМ ДУГИ ОКРУЖНОСТИ ВОКРУГ ЕЕ ХОРДЫ ПРИ ПОТОКЕ, НАПРАВЛЕННОМ ВДОЛЬ ОСИ

55. Из опытов с такими поверхностями видно, что сопротивление формы возрастает не так быстро, как квадрат скорости потока, что замечено нами и в отношении продолговатых цилиндров, хотя и не в такой степени, как для тел вращения (непрерывное уменьшение коэффициента K с увеличением скорости потока).

56. Опыты производились с телами, продолговатость которых изменялась от 2,3 до 7,4, а диаметр среднего поперечного сечения у всех тел был близок к 10 сантиметрам.

Наименьшее сопротивление (при любой скорости потока) оказывается у тела с продолговатостью 3,33. Это значит, что сопротивление тела, при неизменной скорости потока, быстро падает с увеличением его продолговатости (например, от единицы) до величины 3,33. С дальнейшим же увеличением продолговатости сопротивление тела опять начинает возрастать и, повидимому, возрастает безгранично с длиной тела. При другой форме наимыгоднейшая продолговатость может быть иная: так, у птиц, считая и хвост, она больше.

57. Если квадрат скорости потока v^2 принять за абсциссу, а сопротивление какой-либо определенной формы за ординату, то зависимость между сопротивлением y и квадратом скорости потока x выразится дугой гиперболы. Начало координат будет на кривой, на некотором расстоянии от ее вершины. Оси координат будут параллельны осям гиперболы.

58. Чем тело продолговатее, тем дуга кривой имеет меньшую кривизну (хотя кривизна эта, вообще, величина переменная у гиперболы), т. е. начало координат дальше от вершины гиперболы.

59. Уравнение этой кривой будет

$$y = \sqrt{Ax^2 + Bx + C - D}.$$

Постоянные A , B , C и D определены для тел всех продолговатостей от 2,3 до 7,4.

60. Полезность формы U_f выражается формулой

$$U_f = \frac{9,2 \cdot x}{\sqrt{Ax^2 + Bx + C - D}}.$$

В пределе, когда скорость возрастает до бесконечной величины, x или v^2 также делается бесконечно велико, и формула принимает вид

$$U_f = \frac{9,2}{A}.$$

61. По ней, для предельной утилизации формы U_f , найдем такие числа для разных продолговатостей:

Продолговатость	2,3	3,3	4,1	5,0	6,3
U_f	30,50	31,40	19,33	13,45	12,83

т. е. наибольшая полезность оказывается у формы с продолговатостью 3,33.

62. Полезность формы при небольших скоростях ветра (от 1 до 10 метров в секунду) приводится в нижеследующей таблице.

Продолговатость	Скорость в метрах в секунду	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2,30	4,6	6,3	8,5	10,8	12,3	13,4	14,1	14,7	15,0	15,3
3,33	7,9	9,8	11,7	14,0	16,0	17,1	18,0	18,7	19,1	19,4	
4,15	7,6	9,2	11,0	12,5	13,4	14,0	14,4	14,7	14,9	15,2	
5,04	7,9	8,2	9,4	10,4	11,2	11,7	12,0	12,2	12,4	12,5	
6,31	7,9	8,2	8,8	9,5	10,1	10,5	10,7	10,7	11,0	11,1	
7,40	5,9	6,5	7,2	7,7	8,0	8,2	8,3	8,4	8,4	8,4	

63. Из таблицы видно: наибольшая полезность оказывается у формы с продолговатостью 3,3, что замечается при всякой неизменной скорости потока. Далее видно, что полезность формы, при изменении скорости потока, тем больше изменяется, чем тело тупее, т. е. чем продолговатость его менее. Может быть это справедливо только до известной степени тупизны, например, до продолговатости не большей двух (что мне пока неизвестно).

При скорости 4 м/сек полезность наилучшей формы (собственно, наиболее благоприятной продолговатости) доходит до 14; при 10 м/сек — до $19\frac{1}{2}$.

О многом еще говорят и выражающие законы кривые, но об этом, не рассматривая самих кривых, говорить трудно.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОДОБНЫХ ПРОДОЛГОВАТЫХ ТЕЛ (Т. Е. ТЕЛ, ИМЕЮЩИХ РАЗНУЮ ВЕЛИЧИНУ, НО ОДНУ И ТУ ЖЕ ФОРМУ)

64. Опыты с плавными в продольном направлении телами, поперечный разрез которых имел вид квадрата, показали, что полезность формы увеличивается с увеличением их размера (без изменения их вида и продолговатости).

Следующая таблица выражает результаты опытов с телами подобной формы, продолговатость которых составляла около 4:

Скорость в метрах в секунду	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	1	$\sqrt{2}$	2	$2\sqrt{2}$	4	
Площадь проекции тела в кв. см	17,6	4,7	4,4	4,9	6,9	7,4	7,9
	66	4,7	35,1	5,4	7,1	8,2	9,5
	263	5,4	6,3	6,9	8,0	8,8	9,9

Из таблицы видно, что полезность возрастает не только с увеличением скорости, но также и с увеличением размеров тел.

65. Этот вывод показывает, что найденная нами полезность формы продолговатых тел вращения не есть наибольшая, при данной скорости и продолговатости тела, — напротив, она должна еще несомненно возрасти с увеличением размеров тел до размеров, например, аэростата.

Из всего сказанного о продолговатых телах простейшей формы (55) следует, что их сопротивление, или полезность, или, наконец, коэффициент K есть неизвестная функция скорости ветра v , продолговатости тела и его абсолютных размеров.

Попытку решения этого вопроса я представляю в Академию Наук в следующем году, вместе с отчетом о новых опытах, составляющих продолжение моих теперешних работ.

66. До сих пор сопротивление всех тел, находящихся в равномерном потоке воздуха, а иногда и воды, определялось большею частью путем вычисления, причем всегда оказывалось, что коэффициент сопротивления зависит только от формы тела, но нисколько не зависит от его размеров и скорости потока; иначе говоря, оказывалось, что сопротивление подобно изменяющихся тел пропорционально квадрату скорости потока и площади проекции тела на плоскость, перпендикулярную к потоку.

Теперь мы видим, насколько эти выводы общепринятой теории неосновательны.

67. Фундаментом для определения сопротивления какой-либо формы принималось давление на наклонную плоскость. Поверхность всякого тела можно представить себе состоящей из множества плоских граней. Произведя двойное интегрирование, получим полную силу давления на тело. Первое заблуждение состояло в том, что не принимали в расчет трения, так что всегда оказывалось, что с удлинением тела сопротивление среды уменьшается безгранично, что на опыте никогда не оправдывается. Идем далее. Есть много формул, определяющих давление на наклонную элементарную площадку. Если принять в основание отвергнутую теперь всеми, как крайне противоречащую опытам, формулу Ньютона для давления на наклонную плоскость, то получим результаты, вообще неверные, но иногда не далекие от истины. Так, опыт дает для коэффициента сопротивления шара около 0,43, теория же — 0,5. Может быть, благодаря этому, на формулу Ньютона сотни лет смотрели с некоторым доверием; масса студентов за это время написали диссертации на тему о сопротивлении и получили ученые степени. Но вот формула Ньютона выброшена за борт, ухватились за другие формулы, определяющие довольно верно давление на наклонную непродолговатую плоскость; стали применять и их к определению давления на поверхности многогранные и кривые, но увы, результаты получились горше прежних. Несогласие с опытами достигло 100 и 300% (см. мою работу «Давление воздуха...»).

Из последствий применения тех и других формул видно, что прием общепринятый вообще никуда негоден и составляет второе заблуждение: нужны новые взгляды на явление сопротивления и опыты, которые только и могут проверить верность этих новых взглядов.

ДВУГРАННЫЙ УГОЛ

68. Двугранный угол я составил из двух равных квадратов, каждый поверхностью в 100 см². Угол располагался в потоке симметрично, так что ребро было нормально к направлению потока. Величина угла

изменялась от 0 до 100° . причем угол ставился то ребром к потоку, то, наоборот, — отверстием. Опыты производились при скорости ветра в 1 метр в секунду. Результаты, в виде коэффициентов K для формулы 4, приведены в следующей таблице. В последней ее строке показаны сопротивления граней того же двугранного угла, расположенных отдельно в потоке, на некотором расстоянии друг от друга, но без изменения угла наклона.

Величина двугранного угла в градусах . . .		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Коэффициент K	Ребро обращено к ветру	4	6	13	22	31	41,5	52,3	64,4	71,4	88	99,5
	Отверстие обращено к ветру	4	11	24	40	58	74	90	105	115,5	129	136,5
	Грани разделены без изменения их взаимного наклона	4	5,6	11	20	31	46	60	75,4	91	102	112,5

Таблица эта отличается немного от посланной в Академию Наук вследствие того, что тут данные опыта обработаны посредством кривых, что я всегда почти и делал для отчета в Академию, кроме этого случая.

Из таблицы видно, что сопротивление разделенных граней сначала немного менее, чем двугранного угла, обращенного ребром к ветру, а затем более, причем разница достигает при 80° до 28%.

Начальная незначительная разница может быть и следствием неточности опытов.

Сравнивая вторую и третью строки таблицы, видим, что сопротивление двугранного угла, обращенного ребром к ветру, сначала почти вдвое более, чем при обратном положении, а затем, при увеличении угла, отношение сопротивлений становится меньшим.

ДАВЛЕНИЕ НА ПЛОСКОСТЬ ПРИ ЕЕ НОРМАЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ В ВОЗДУХЕ*

ОТ РЕДАКТОРА II ТОМА ИЗБРАННЫХ СОЧИНЕНИЙ

Первая часть книги «Давление на плоскость» посвящена термодинамике газов; выводится работа для сжатия и расширения при адиабатическом и изометрическом процессах. Циолковский вводит здесь взамен обыкновенно принятого показателя степени адиабаты $k = \frac{C_p}{C_v}$, где C_p и C_v — теплоемкости при постоянном давлении и объеме, другой коэффициент A (новое обозначение редакции — B). Для этого коэффициента имеет место соотношение $V \cdot T^A = \text{const}$, причем V — удельный объем и T — абс. температура.

Циолковский не пользуется газовой постоянной R , взамен которой им были введены давление газов при единице плотности и единице температуры, а также плотность при единице давления и единице температуры. Первая величина есть газовая постоянная, вторая — обратная ей величина.

Сделанные редакцией примечания относительно связи указанных трех величин с общепринятыми делают формулы Циолковского легко применимыми к любым газам.

Формы таблиц, приводимых Циолковским для сжатия и расширения газов, представляют интерес.

Вторая часть книги посвящена определению давления встречного потока. Циолковским рассматриваются три ступени точности определения давления на плоскость, поставленную перпендикулярно к направлению движения потока, а именно:

- а) давление потока по обыкновенной формуле для малых скоростей полета (31);
- б) давление, предполагая, что плотность сжатого воздуха перед пластинкой пропорциональна давлению воздуха на единицу площади (32) и (34)
- в) давление, предполагая, что плотность сжатого воздуха перед пластинкой соответствует адиабатическому сжатию (37).

Полученные данные представляют для больших скоростей только грубое приближение.

К концу книги Циолковский дает без специального расчета таблицу допускаемых скоростей полета для тел разной продолговатости.

Ввиду того, что в литературе имеется весьма мало данных относительно движения при больших скоростях, данная часть книги представляет интерес для дальнейшего развития теории.

Ф. Цандер

* Впервые напечатано в 1930 г. в Калуге, отдельной брошюрой, изданной автором. Переиздано во II томе Избранных сочинений К. Э. Циолковского, ГОНТИ, 1932.

ОБОЗНАЧЕНИЕ ВЕЛИЧИН

Формулы (1)–(30). Работа — L . Давление на единицу площади — p . Объем — V . Абсолютная температура — T . Удельный объемный вес — γ . Те же величины с индексом — постоянные. Механический эквивалент тепла $A = \frac{1}{427}$. Теплоемкость, или удельная теплота при постоянном объеме — C_v . Вес газа — G . Удельная теплота водорода — C_{vH} . Молекулярный вес газа — μ . То же водорода — μ_H .

Формулы (31)–(45). p_a означает давление атмосферы, а p_n — сверхдавление на пластинку, движущуюся нормально к своей плоскости. Скорость — c . Ускорение силы земного тяготения — g .

ИЗМЕНЕНИЕ ОБЪЕМА ГАЗА

Сначала обратимся к изложению явлений, происходящих при изменении объема газа. Это необходимо при определении сопротивления воздуха движению плоской пластинки.

РАБОТА, СОВЕРШАЕМАЯ ГАЗОМ
ПРИ ЕГО АДИАБАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ И РАСШИРЕНИИ

Имеем некоторый объем V_1 совершенного газа удельного веса γ_1 , при давлении на единицу площади p_1 и абсолютной температуре T_1 . Газ расширился или сжался без потери тепла, и те же величины стали иными, а именно:

$$V, \gamma, p, T,$$

При этом он совершил некоторую работу L , соответствующую изменению его температуры.

На этих основах можем составить следующие известные уравнения:

$$dL = pdV \quad (1)$$

(d — знак дифференциала).

$$p_1 = p_{11} T_1 \gamma_1, \quad (2)$$

где p_{11} означает давление газа при единице удельного веса и единице температуры.

Таким образом,

$$p_{11} = p_1 : (\gamma_1 T_1)^*, \quad (3)$$

$$\gamma : \gamma_1 = V_1 : V \quad (4)$$

масса газа, конечно, неизменна). Кроме того,

$$dL = G \cdot C_v \frac{dT}{A}. \quad (5)$$

* Это — уравнение состояния газа, и p_{11} представляет собой газовую постоянную, которую обыкновенно обозначают буквой R . — Прим. ред. Цандера.

Тут обозначаем: вес газа G , его теплоемкость, или удельную теплоту при постоянном объеме — C_v и механический эквивалент тепла — A .

Для веса газа имеем

$$G = \gamma_1 \cdot V_1. \tag{6}$$

Решая уравнения (1) — (6), найдем

$$\ln\left(\frac{V}{V_1}\right) = \frac{C_v}{p_{11}A} \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T}\right). \tag{7}$$

Это есть зависимость объема от абсолютной температуры на случай расширения газа. На случай сжатия имеем

$$\ln\left(\frac{V_1}{V}\right) = \frac{C_v}{p_{11}A} \cdot \ln\left(\frac{T}{T_1}\right). \tag{8}$$

Для воздуха $C_v = 0,169$; $\gamma = 0,00129$; $T_1 = 273^\circ$ (по Цельсию — нуль); $p_1 = 10,33 \frac{m}{m^2}$; $\frac{1}{A} = 427$. Значит, $p_{11} = 29,26$; $1 : p_{11} = \gamma_{11} = 0,0343$; $C_v : (p_{11} \cdot A) = 2,481$;

$$p_{11}A : C_v = 0,4032,$$

где γ_{11} — удельный вес газа при единице давления и температуры.

Следовательно,

$$\ln(V_1 : V) = 2,481 \cdot \ln(T : T_1), \tag{9}$$

$$\ln(T : T_1) = 0,4032 \cdot \ln(V_1 : V). \tag{10}$$

На основании последней формулы составим таблицу:

$\frac{V_1}{V}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\frac{T_1}{T}$	1,32	1,56	1,75	1,91	2,06	2,19	2,31	2,42	2,53	2,63

Следовательно, при каждом сжатии воздуха в 6 раз его абсолютная температура увеличивается в 2 раза с лишком. И обратно — при разрежении в 6 раз она уменьшается в 2 раза.

Так как p_{11} не зависит от плотности, объема и температуры воздуха, то какой бы ни был объем воздуха и как бы ни был он разрежен или плотен, сокращение объема в определенное число раз (например, в 10) всегда вызывает также определенное изменение абсолютной температуры в определенное число раз (по таблице в 2,53 раза).

На основании этого даем следующую приблизительную таблицу:

Разрежение				Сжатие				
1296	216	36	6	1	6	36	216	1296
Охлаждение				Нагревание				
18,7	37,5	75	150	300	600	1200	2400	4800
-254,3	-235,5	-198	-123	+27	327	923	2123	4527
15,6	31,2	62,5	125	250	500	1000	2000	4000
12,5	25	50	100	200	400	800	1600	3200
9,3	18,7	37,5	75	150	300	600	1200	2400
6,2	12,5	25	50	100	200	400	800	1600
3,1	6,2	12,5	25	50	100	200	400	800
1,6	3,1	6,2	12,5	25	50	100	200	400

Кроме третьей строки с температурой по Цельсию, здесь даны только абсолютные температуры. Из таблицы видно, что сжатие обыкновенного воздуха (на уровне океана) может легко довести его температуру до 2000—3000° Ц. Если же дан разреженный газ высот, то температура от сжатия может дойти до нескольких десятков тысяч градусов, смотря по плотности и начальной температуре данного газа: чем меньше плотность, тем более высокая температура возможна, потому что возможно многократное уплотнение. Разреженный воздух высот нагревается от сжатия слабее, если он очень холоден.

Но в атмосфере мы не имеем воздуха с температурой ниже 80° холода, что соответствует довольно высокой абсолютной температуре в 193° .

Положим для краткости (см. 3):

$$C_v : (A \cdot p_{11}) = C_v \gamma_1 \cdot T_1 : (p_1 A) = B^* \quad (11)$$

Тогда из тех же основных уравнений (1)–(6) найдем

$$V : V_1 = (T_1 : T)^B, \quad (12)$$

$$T : T_1 = (V_1 : V)^{1+B}, \quad (13)$$

$$p : p_1 = (T : T_1)^{B+1}, \quad (14)$$

$$T : T_1 = (p : p_1)^{1/(B+1)} \quad (15)$$

$$\gamma : \gamma_1 = (T : T_1)^B, \quad (16)$$

$$T : T_1 = (\gamma : \gamma_1)^{1/B}, \quad (17)$$

$$p : p_1 = (\gamma : \gamma_1)^{1+(1/B)} \quad (18)$$

$$\gamma : \gamma_1 = (p : p_1)^{B/(1+B)} \quad (19)$$

$$L = G \cdot C_v \cdot T \cdot \left(1 - \frac{T}{T_1}\right) : A, \quad (20)$$

$$L = B \cdot p_1 \cdot V_1 \cdot [1 - (V_1 : V)^{1+B}]. \quad (21)$$

Формулы (12) и (13) показывают изменение объема в зависимости от изменения температуры и обратно — изменение температуры в зависимости от изменения объема. В двигателях приходится сжимать воздух для усиленной работы моторов также и тогда, когда он очень разрежен. Вот одно из применений этих формул.

Формула (19) дает изменение плотности в зависимости от изменения давления. Эту формулу можно применить к определению сопротивления пластинки при быстром нормальном ее движении.

Сжимая газ, мы совершаем работу. Величину ее необходимо знать. Для этого служат формулы (20) и (21).

Формулы (13), (14) и (16) можно написать в одной строке:

$$T : T_1 = (V_1 : V)^{1+B} = (p : p_1)^{1/(B+1)} = (\gamma : \gamma_1)^{1/B}. \quad (22)$$

* Величина B связана с показателем степени адиабаты $k = \frac{C_p}{C_v}$, где C_p и C_v — удельные емкости соответственно при постоянном давлении и постоянном объеме, формулой $B = \frac{1}{k-1}$. — Прим. ред. Цандера.

Для всех «постоянных» газов, как известно, имеем

$$C_v = C_{vH} \cdot \frac{\mu_H^*}{\mu}, \quad (23)$$

$$\gamma = \gamma_H \cdot \frac{\mu}{\mu_H}. \quad (24)$$

Здесь выражена зависимость удельной теплоты C_v и удельного веса какого-нибудь газа γ от удельной теплоты и удельного веса водорода C_{vH} и γ_H и молекулярных их весов μ и μ_H . Из формул (23), (24), (3) и (11) теперь найдем

$$B = C_{vH} \cdot \gamma_H T_1 : (p_1 \cdot A). \quad (25)$$

Но произведение $C_{vH} \cdot \gamma_H$ постоянно, поэтому и B постоянно. Следовательно, все выведенные формулы и законы одинаково применяются ко всем постоянным газам.

Во всех формулах (12)—(21) мы видим зависимость отношений от B . По формуле (25)** для всех постоянных газов B зависит от температуры T_1 .

Для воздуха на уровне океана и при нулевой температуре по Цельсию $B = 2,481$; $1 : B = 0,403$; $B + 1 = 3,48$; $1 + \frac{1}{B} = 1,403$; $1 : (B + 1) = 0,287$; $B : (B + 1) = 0,713$ (см. 11, 25).

Теперь вместо формулы (22) найдем

$$\begin{aligned} T : T_1 &= (V_1 : V)^{0,403} = (p : p_1)^{0,287} = (\gamma : \gamma_1)^{0,403} = \\ &= \sqrt[2,48]{V_1 : V} = \sqrt[3,48]{p : p_1} = \sqrt[2,48]{\gamma : \gamma_1}. \end{aligned}$$

Значит, для воздуха изменение абсолютной температуры обратно пропорционально корню степени 2,48 из изменения объема или прямо пропорционально корню степени 3,48 из изменения давления, или прямо пропорционально корню степени 2,48 из изменения плотности.

РАБОТА ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ СОСТОЯНИЯ

Допустим, что газ имеет постоянную температуру T , несмотря на изменение его объема. Это может быть на деле, если изменение объема происходит медленно, так что газ успевает охладиться или нагреваться

* Это относится только к газам с одинаковой атомностью; для идеальных одноатомных газов молекулярная теплоемкость равна при постоянном объеме 3, для двухатомных — 5, а для многоатомных получается еще больше.— *Прим. ред. Цандера.*

** Это имеет место ввиду того, что удельная теплота C_v возрастает с температурой.— *Прим. ред. Цандера.*

внешней средой. Это бывает еще тогда, когда принимают соответствующие меры для выравнивания температуры газа.

Тогда в уравнениях (1)—(14) $T = T_1$ и будет постоянной величиной. Из этих уравнений мы получим

$$dL = p_{11} \cdot T_1 \cdot \gamma_1 \cdot V_1 \cdot \frac{dV}{V}, \quad (26)$$

или на основании формулы (3)

$$dL = p_1 \cdot V_1 \cdot \frac{dV}{V}.$$

Интегрируя, найдем

$$L = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln V + \text{const.}$$

Если $V = V_1$, то $L = 0$; поэтому

$$L = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln \left(\frac{V}{V_1} \right). \quad (27)$$

Если газ расширяется ($V > V_1$), то работа будет положительна, т. е. она выделяется. Если же газ сжимается ($V < V_1$), то работа поглощается, ибо нужна внешняя работа, чтобы его сжать, и поэтому она будет отрицательна*.

СРАВНЕНИЕ РАБОТ ПРИ АДИАБАТИЧЕСКОМ И ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИЯХ СОСТОЯНИЯ

Если бы давление было постоянным, то работа при расширении газа от объема V_1 до объема V была бы

$$L_1 = p_1 (V - V_1) = p_1 \cdot V_1 \left(\frac{V}{V_1} - 1 \right). \quad (28)$$

Деля почленно уравнение (27) на уравнение (28), получим относительную работу изменения объема при постоянной температуре

$$L : L_1 = \ln \left(\frac{V}{V_1} \right) : \left(\frac{V}{V_1} - 1 \right). \quad (29)$$

Поступая так же с формулами (21) и (28), получим относительную работу при расширении и сжатии, без потери и приобретения газом тепла извне (адиабатическом)

$$L : L_1 = B \left[1 - \left(\frac{V}{V_1} \right)^{1:B} \right] : \left(\frac{V}{V_1} - 1 \right). \quad (30)$$

* Из формулы (11) видим, что $B = C_v : (A p_{11})$; но $p_{11} = R$ обратно пропорционально молекулярному весу, поэтому R пропорционально молекулярной теплоемкости C_v , которая по (23) для идеальных газов одинаковой атомности — постоянная величина. Поэтому и B для реальных газов практически есть приблизительно постоянная величина.—Прим. ред. Цандера.

Здесь $1 : B = 0,403$.

Формулы (28), (29) и (30) дают нам возможность составить таблицу относительных работ при изменении объема: 1) при постоянном давлении, 2) при постоянной температуре и 3) при адиабатическом процессе.

Все работы в таблице принимаем положительными. Чтобы получить истинные работы, конечно, нужно их умножить на работу по формуле (28). Например, для воздуха при нормальных условиях можем положить: $T_1 = +273$ (0° по Ц); $\gamma_1 = 0,0013$; $p_1 = 10,3 \frac{\text{т}}{\text{м}^2}$; $p_{11} = 29,26$.

Теперь вычислим

$$L_1 = p_1 V \left(\frac{V}{V_1} - 1 \right) = 10,3 V \left(\frac{V}{V_1} - 1 \right) \text{ тм.}$$

Например, при тройном расширении $L_1 = 20,6 \text{ тм} = 20600 \text{ кгм}$.

Разберем предлагаемую ниже таблицу. Она состоит из двух частей. Первая относится к сжатию газа, вторая — к его расширению. Первая строка указывает на краткое изменение объема, вторая — на относительное разностное изменение объема и одновременно — на работу при постоянном давлении.

За единицу работы во всей таблице принимается работа изменения объема на единицу при постоянном давлении ($10,3 \frac{\text{т}}{\text{м}^2}$).

Третья строка относится к работе сжатия при постоянной температуре, пятая — к переменной температуре.

Обратимся к работе сжатия. Мы видим, что благодаря непрерывно возрастающему давлению работа сжатия гораздо больше, чем при постоянном давлении.

Так, при сжатии в 1000 раз она возрастает от этого почти в семь раз. При естественном же (не устраненном) повышении температуры, также при сокращении в 1000 раз, она уже увеличивается в 37 раз. Чем меньше сжатие, тем эти уклонения меньше.

Строка седьмая указывает, во сколько раз работа сжатия больше благодаря повышению температуры от сжатия газа. Так, при сокращении в 1000 раз работа увеличивается в 5,4 раза вследствие нагревания газа.

Теперь обратимся к части таблицы, относящейся к разрежению газа. Тут выделяемая работа гораздо меньше, чем при постоянном давлении. Четвертая строка показывает, во сколько раз она меньше при постоянной температуре (или при искусственном подогревании газа извне). Так, при расширении в 10 раз она почти в 4 раза меньше, чем при постоянном давлении. Если же происходит естественное охлаждение, то при том же сокращении она в 6 раз меньше (шестая строка).

Все же при постоянной температуре работа бесконечного расширения газа беспредельна, хотя и растет медленно с увеличением объема

С ж а т и е

1.	1000	100	10	5	4	3	2
2. $(V:V_1) - 1$	0,999	0,99	0,9	0,8	0,75	0,667	0,5
3. По формуле (29)	6,90	4,65	2,62	2,01	1,84	1,65	1,39
4. Обратное отношение	—	—	—	—	—	—	—
5. По формуле (30)	37,2	13,54	4,22	2,83	2,48	2,08	1,59
6. Обратное отношение	—	—	—	—	—	—	—
7. Отношение (30):(29)	5,4	2,9	1,6	1,4	1,3	1,25	1,2
8. Обратное отношение	—	—	—	—	—	—	—

[формула (27)]. Напротив, работа, выделяемая расширяющимся и естественно охлаждающимся газом, совершенно ограничена, несмотря на бесконечное увеличение его объема [формулы (20) и (21)].

Р а с ш и р е н и е

1.	2	3	4	5	10	100	1000
2. $(V:V_1) - 1$	1	2	3	4	9	99	999
3. По формуле (29)	0,693	0,549	0,460	0,402	0,256	0,046	0,0069
4. Обратное отношение	1,44	1,82	2,17	2,49	3,91	21,7	145,0
5. По формуле (30)	0,600	0,459	0,355	0,295	0,166	0,0211	0,00233
6. Обратное отношение	1,67	1,82	2,82	3,39	6,02	47,4	429,0
7. Отношение (30):(29)	0,87	0,85	0,77	0,73	0,65	0,46	0,34
8. Обратное отношение	1,14	1,2	1,3	1,4	1,5	2,2	2,9

Восьмая строка указывает влияние естественного охлаждения на выделяемую расширяющимся газом работу. При небольшом расширении это влияние невелико, но чем сильнее расширение, тем оно значительней. Так, при расширении в 1000 раз естественная работа расширения газа (при свободном понижении температуры) почти в 3 раза меньше, чем при искусственно неизменной температуре.

Надо ли говорить, что наша таблица применима ко всем идеальным газам и перегретым непостоянным газам и парам. Она относится также ко всем плотностям и ко всем температурам, при которых постоянство газа еще не нарушается.

ДАВЛЕНИЕ ВСТРЕЧНОГО ВОЗДУХА. ПРИБЛИЖЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПОТОКА ВОЗДУХА

Аэроплан движется с большой быстротой в разреженных слоях воздуха. Поэтому воздух на носу сжимается и тем может уменьшить работу компрессора. На воздух в носовом сечении самолета действует давление встречного потока, такое же, как на плоскую пластинку, нормальную к

потоку. Как же велико это давление при разных скоростях движения аэроплана?

Предупреждаю, что все последующие расчеты нельзя считать ни точными, ни строго научными. Хорошо, если они дадут хотя бы некоторое понятие о величине давления на плоскость, нормальную к потоку.

Когда воздух впереди плоскости мало уплотняется, то можем принять известную формулу

$$p_n = \frac{c^2}{2g} \cdot \gamma_a, \quad (31)$$

где скорость не должна превышать 100 м/сек. Она выведена также и мной для сопротивления воздуха от инерции*.

В этой формуле p_n означает сверхдавление, g — ускорение силы земного тяготения, а γ_a — удельный (объемный) вес воздуха.

Если же скорость больше 100 м/сек, то воздух перед плоскостью от сильного давления уплотняется, и формула (31) дает большую погрешность. В ней удельный вес γ_a надо заменить по формуле

$$\gamma_a = \gamma_1 \left(\frac{p_n + p_a}{p_a} \right), \quad (32)$$

где γ_1 — плотность спокойного воздуха, а p_a — атмосферное давление.

Из (31) и (32) получим

$$p_n = \frac{c^2}{2g} \cdot \gamma_1 \cdot \frac{p_n + p_a}{p_a}. \quad (33)$$

Отсюда

$$p_n = \frac{c^2}{2g} \cdot \gamma_1 \cdot \left(1 - \frac{\gamma_a}{p_a} \cdot \frac{c^2}{2g} \right). \quad (34)$$

При малой скорости c из этой формулы получается формула (31).

Из формулы (34) видно, что скорость не может быть очень большой; необходимо условие

$$c < \sqrt{2g \cdot p_a : \gamma_a}. \quad (35)$$

Положим, что $g = 10 \text{ м}^2/\text{сек}$; $p_a = 10 \text{ т}/\text{м}^2$; $\gamma_a = 0,0013$. Тогда по (35) вычислим $c < 392 \text{ м}/\text{сек}$.

Очевидно, при этой скорости как бы получается бесконечное сгущение, а потому дальнейшее увеличение скорости невозможно. Но это ошибка, во-первых, потому, что газы непостоянны и потому не могут бесконечно уплотняться; во-вторых, потому, что мы не приняли во внимание нагревание от сжатия газа.

* См. «Труды Об-ва любителей естествознания». Физ. отд., 4, М., 1891.

Но возвратимся пока к последним формулам. Давление по (34) больше, чем по (31) во столько раз:

$$P_{n(34)} : P_{n(31)} = 1 : \left(1 - \frac{\gamma_a}{\rho_a} \cdot \frac{c^2}{2g} \right). \tag{36}$$

Уравнения (31), (34) и (36) дают нам следующую таблицу:

Скорость в м/сек	50	100	150	200	250	300	350	392
$P_{n(31)}$	0,162	0,65	1,46	2,60	4,06	5,85	7,96	10,0
$P_{n(34)}$	0,165	0,695	1,7	3,5	6,85	14	39	Бесконечно
Отношение	1,016	1,070	1,171	1,35	1,68	2,41	4,90	Бесконечно
$\frac{P_{n(34)}}{P_{n(31)}}$								

Вторая строка показывает давление потока в т/м² по формуле (31). Третья — то же по формуле (34). Четвертая — отношение этих давлений. По формуле (34), конечно, давление больше вследствие принятого в расчет сжатия воздуха. Так, при скорости 50 м/сек ошибка равна 1,6%, а при 100 м/сек — 7%, при 250 м/сек ошибка уже достигает 68%.

Ясно, что формулу (31) можно применять только до скорости в 100 м/сек. По формулу (34) также нельзя применять для больших скоростей. Действительно, при скорости 350 м/сек давление воздуха равно 3,9 т/м², отчего воздух нагревается, становится менее плотным и давление от этого уменьшается. Из таблицы видно, что при уплотнении газа вчетверо абсолютная температура увеличивается в 1,75 раза. Во столько же раз разрежается воздух и уменьшается давление.

ДАВЛЕНИЕ НА ПЛАСТИНКУ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА ПО ЗАКОНУ АДИАБАТЫ

Чтобы получить более верную формулу для давления, надо принять во внимание увеличение температуры от сжатия воздуха. Формула (19) дает

$$\gamma = \gamma_a \cdot (p : p_a)^{B : (1+B)}.$$

Но тут

$$p = p_a + p_n,$$

где p_a — давление в спокойной атмосфере, а p_n — сверхдавление. Из последних формул и формулы (31) получаем уравнение

$$p_n = \frac{c^2}{2g} \cdot \gamma_a \cdot \left(\frac{p_n + p_a}{p_a} \right)^{B : (1+B)} \quad (37)$$

Если p_n , или сверхдавление во много раз больше давления в спокойном воздухе p_a , то можно положить

$$p_n = \frac{c^2}{2g} \cdot \gamma_a \cdot \left(\frac{p_n}{p_a} \right)^{B : (1+B)}; \quad (38)$$

отсюда, определяя неизвестное p_n , найдем

$$p_n = \left(\frac{\gamma_a}{2g} \right)^{B+1} \cdot \left(\frac{c^2 B+2}{p_a^B} \right). \quad (39)$$

Из предыдущего известно, что $B=2,481$; следовательно

$$p_n : p_a = K \cdot c^{6,96}, \quad (40)$$

или, приблизительно, имеем

$$p_n : p_a = K \cdot c^7;$$

здесь

$$K = [(\gamma_a : p_a) : 2g]^{B+1}. \quad (41)$$

На уровне океана и при нулевой температуре можем положить: $\gamma_a = 0,0013$; $g = 10$; $p_a = 10$. Тогда найдем, что $K = 89 \cdot 10^{-20}$.

Положив, например, $c = 400$ м/сек, найдем

$$p_n : p_a = 1,46,$$

или

$$p_n = 14,6 \text{ т/м}^2.$$

По формуле (31) при той же почти скорости найдем $p_n = 10$ т/м², а по формуле (34) — бесконечное давление.

Зная отношение давлений (40) и предполагая, что сверхдавление p_n столь большое, что можно принимать

$$p_n : p = 1,$$

где p — абсолютное давление сжатого воздуха, можем вычислить по формулам (15) и (18) отношение абсолютных температур $T : T_1$ и отношение удельных весов $\gamma : \gamma_a$.

При нулевой температуре и при уровне океана получим

$$p_n : p_a = p : p_a = 89 \cdot 10^{-20} \cdot c^7.$$

Также

$$T : T_a = (p : p_a)^{1 : (B+1)} = (p : p_a)^{0,287} = 6,61 \cdot 10^{-6} \cdot c^2.$$

Далее

$$\gamma : \gamma_a = (p : p_a)^{B : (1+B)} = 1,35 \cdot 10^{-13} \cdot c^{5,01},$$

или приблизительно $1,35 \cdot 10^{-13} \cdot c^5$.

Из последних двух равенств видно, что абсолютная температура возрастает пропорционально квадрату скорости, а плотность — пропорционально пятой степени той же скорости.

Все это дает нам возможность составить следующую таблицу:

Скорость в км/сек						
0,4	0,5	1	2	3	4	5
Отношение давлений ($p : p_a$) на уровне океана и при нулевой температуре						
1,46	6,95	889,6	113 920	1 946 000	14 580 000	69 530 000
Отношение абсолютных температур $T : T_a$						
1,0576	1,65	6,61	26,44	59,49	105,76	165,25
Соответствующая абсолютная температура T						
289	450	1804	7218	16 241	28 870	65 100
Отношение плотностей $\gamma : \gamma_a$						
1,38	4,31	138	4420	33 530	141 400	431 200

Из формул (41) и дальнейших видно, что отношение давлений, температур и плотностей не изменяется при неизменном отношении $\gamma_a : p_a$. Это значит, что таблица относится ко всяким слоям атмосферы, т. е. ко всякому разрежению или сжатию газа, лишь бы начальная температура невозмущенного воздуха оставалась неизменной. Большие числа этой таблицы мы можем применять к разреженным слоям воздуха, например, где он разрежен в тысячи и миллионы раз, т. е. на больших высотах.

При скорости в 400 м/сек давление достигает уже почти 1,5 ат, абсолютная температура доходит до 289°, или 16°, а плотность возрастает в 1,38 раза; при скорости в 0,5 км/сек температура еще не высока (177°) и воздух еще не может светиться. Тут он уплотняется в 4,3 раза; при скорости в 1 км/сек воздух должен бы накалять тело до свечения. Уплотнение его достигает 138.

При скорости в 2 км/сек и выше вычисленное уплотнение не оправдывается на уровне океана ввиду непостоянства газа. Но на высотах это может отчасти оправдаться также и в отношении высоких температур. Положим, например, что воздух разрежен в тысячу раз. Тогда он может сгуститься в 500 раз без нарушения идеальных свойств постоянного газа (принимая в расчет очень высокую нагретость). Значит, возможна скорость в 5 км/сек и увеличение плотности в 431 200 раз. При этом его абсолютная температура достигает 65 000°.

Тут невольно приходит в голову воспользоваться высокой температурой сжатых, очень разреженных газов для разных целей. Не разложатся ли, например, двухатомные газы в одноатомные? Не проявятся ли радиоактивные явления?

Применение таблиц и формул возможно при еще больших скоростях, если пластинка будет двигаться в еще более редких слоях воздуха.

Впрочем, нужно помнить, что чем больше скорость пластинки и степень сгущения среды, — даже в разреженных слоях атмосферы, — тем числа, даваемые нашими формулами, более истинных. Действительно, они были бы верны, если бы соблюдалось подобие плотностей. При небольших скоростях плотность среды кругом и далеко почти постоянна. При этих именно условиях формулы будут правильны. Но при больших скоростях уплотнение бывает только поблизости движущейся пластинки. Чем дальше от нее, тем меньше возмущается плотность. Крайняя неравномерность плотностей заставляет в наши формулы вводить переменный коэффициент, меньший единицы, который тем дальше от единицы, чем скорость пластинки больше. Предлагаем математикам произвести более точные исследования над сопротивлением пластинки с целью нахождения поправочного коэффициента к этим формулам сопротивления.

Итак, числа таблицы тем более преувеличены, чем скорость больше.

Из (37) для всяких скоростей и давлений получим

$$\frac{p_n}{p_a} = c^2 \left(\frac{\gamma_a}{2g \cdot p_a} \right) \cdot \left(\frac{p_n}{p_a} + 1 \right)^{B : (1+B)}. \quad (42)$$

Значит

$$c = \sqrt{\frac{(p_n : p_a) 2g \cdot p_a}{\gamma_a \left(\frac{p_n}{p_a} + 1 \right)^{B : (B+1)}}}. \quad (43)$$

Для больших же давлений из формулы (39) получили бы

$$c^2 = (p : p_a)^{1 : (B+1)} \cdot (2g \cdot p_a : \gamma_a). \quad (44)$$

Воспользуемся формулой (43) для всяких скоростей. Но в ней отношение $p_n : p_a$ для больших давлений надо выразить через отношение плотностей $\gamma : \gamma_a$ посредством формулы (18). Тогда найдем

$$c^2 = \frac{2g p_a}{\gamma_a} \cdot \frac{(\gamma : \gamma_a)^{(B+1) : B}}{[(\gamma : \gamma_a)^{(B+1) : B} + 1]^{B : (2+2B)}}. \quad (45)$$

Положим $g = 10$; $p_a = 10$; $\gamma_a = 0,0013$; $B = 2,48$; $B : (2 + 2B) = 3,356$; $B : (1 + B) = 0,713$; $(1 + B) : B = 1,403$.

Теперь по формулам (42) и (45) составим таблицу.

$P_n : P_a$	0,4	0,3	0,5	1,0	1,5	2	3
$\gamma : \gamma_a$	1,07	1,205	1,33	1,64	1,92	2,19	2,69
Скорость в м/сек	108,5	178	217	277	313	339	375
Необходимое разрежение	1,18	3,17	4,71	7,67	9,80	11,5	14,1
$P_n : P_a$	5	7	10	20	50	100	200
$\gamma : \gamma_a$	3,58	4,40	5,53	8,70	16,3	26,9	43,9
Скорость в м/сек	420	448	479	537	605	687	759
Необходимое разрежение	17,6	20,1	24,9	28,8	36,6	47,2	57,6
$P_n : P_a$	500	1000	5000	10 000	50 000	100 000	500 000
$\gamma : \gamma_a$	84,1	138	435	711	2240	3670	11 600
Скорость в м/сек	871	955	1200	1340	1780	1860	2470
Необходимое разрежение	75,9	91,2	144	180	317	346	610
$P_n : P_a$	1 000 000	5 000 000	10 000 000	50 000 000	100 000 000	500 000 000	
$\gamma : \gamma_a$	19 000	59 900	98 800	309 000	506 000	1 600 000	
Скорость в м/сек	590	3440	3630	4780	5040	6640	
Необходимое разрежение	671	1183	1318	2285	2540	4409	

Из таблицы видим, что до скорости в 955 м/сек сгущение от встречного потока недостаточно для работы моторов. Но после этого оно даже гораздо больше, чем нужно. Например, при скорости в 1200 м/сек сгущение будет 435, т. е. оно будет в три раза больше, чем нужно, отчего работа моторов может увеличиться в 3 раза: было бы только горючее, да крепкие рабочие цилиндры. При скорости в 1860 м/сек по той же таблице сгущение будет в 11 раз сильнее. Значит, при скорости 1000 м/сек компрессоры окажутся излишними. Жаль, что температура чересчур велика. Так, при скорости 1 км/сек она достигает 1500° Ц.

Впрочем, мы указали, что сгущение и температура должны быть много ниже.

Поговорим еще о формулах для сопротивления воздуха нормально движущейся пластинке. Только при скорости до 200 — 300 м/сек они могут считаться сносными [см. табл. на стр. 245]. При больших же скоростях они дают преувеличенные давления, плотности и температуры. Но за исключением лучшего приходится пользоваться и этим.

Снаряды в атмосфере едва ли будут приобретать скорость больше 1 км/сек. И при этом, по таблице, плотность окружающего пластинку воздуха увеличивается в 138 раз.

Возможно ли экономное движение при этих условиях?

Дело в том, что снаряды не имеют тупых концов, в особенности спереди.

По таблице скорость в 300 м/сек уплотняет воздух перед пластинкой только в 2 раза. Следовательно, такая скорость вполне терпима для шаров: уплотнения среды перед ними почти не будет.

ДОПУСКАЕМАЯ СКОРОСТЬ ПОЛЕТА ДЛЯ ТЕЛ РАЗНОЙ ПРОДОЛГОВАТОСТИ

Для плавно обтекаемого тела, вдвое более продолговатого, чем шар, уже будет допустима скорость в 600 м/сек без заметного сгущения среды. Рассуждая так, составим таблицу.

Продолговатость тел, или отношение длины их к поперечнику									
1	2	3	4	5	6	8	10	15	20
Допустимая экономная скорость в км/сек									
0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,4	3	4,5	6

При этих скоростях заметного сгущения среды не будет, а потому не будет и увеличенного, непомерного расходования энергии при движении птицеподобного снаряда.

На больших высотах корма даже может обрываться плоскостью; но нам приходится летать и вниз. Поэтому плоский хвост неудобен. Он

неудобен также и в отношении конструктивном. Но часть его, где выходят жерла конических труб, выбрасывающих продукты горения, поневоле будет плоской.

ПОЛЕТ МЕТЕОРОВ. НАГРЕВ ИХ

Обратимся теперь к табл. [стр. 245] с целью показать некоторую ее правдоподобность.

Метеоры или космические камни, пролетая атмосферу, накаляются и испускают свет. Причина — в задержке движения атмосферой, так что весь минерал от этого нагревается: энергия движения переходит в теплоту. Другая причина — в сгущении воздуха перед камнем. Так как камень неправильной формы, то уплотнение и температура воздуха будут гораздо меньше, чем по таблице. Так, при скорости в 5 км/сек среда уплотняется в 400 000 раз, а температура ее доходит до 65 000°. Принимая во внимание огромную скорость аэролитов (до 50 км/сек и более), это сгущение и температура должны бы оправдаться.

Но надо помнить, что такое сгущение и температура появляются не сразу, а постепенно: нужно время и длинный путь в среде, чтобы достигнуть данных таблицы. Атмосфера же ограничена, а болиды большей частью пролетают в ней путь не больше 100 км. На высоте 100 км воздух поразительно разрежен. Ну, положим, в миллион раз. Если 100 км этого воздуха сократить в 1 м, то получится среда плотностью в 0,1 плотности атмосферы у уровня океана.

Понятно, что ни сгущения, ни температуры, указанной в таблице, не получится. Сопротивление воздуха будет так мало, что и самый метеор не накалится: он пролетит незаметным и темным.

Вот почему нужна определенная высота, чтобы метеор накалился и был виден. Граница падающих звезд 100—200 км. Выше они не видны. Воздух там так мало сгущается болидами, что не светится.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Журнал Русского физ.-хим. об-ва, 1882, т. XIV, вып. 8, отдел первый, часть физич., стр. 480

ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА 40-го ЗАСЕДАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РУССКОГО ФИЗ.-ХИМ. ОБЩЕСТВА от 26/X 1882 г.

6) Проф. П. П. Ф а н - д е р - Ф л и т представляет статью о теории газов преподавателя уездного училища в гор. Боровске Калужской губернии, г. Циолковского, сообщает, что хотя статья сама по себе не представляет ничего нового, выводы в ней не вполне точны, но тем не менее она обнаруживает в авторе большие способности и трудолюбие, так как автор не воспитывался в учебном заведении и своими знаниями обязан исключительно самому себе; единственным источником для представленного сочинения автору служили некоторые элементарные учебники механики, курс наблюдательной физики проф. Петрушевского и «Основы химии» проф. Менделеева.

Ввиду этого желательно содействовать дальнейшему самообразованию автора.

Общество постановило ходатайствовать перед попечителем Петербургского или Московского округа о переводе г. Циолковского, если он того пожелает, в такой город, в котором он мог бы пользоваться научными пособиями.

Приложение 2

Журнал Русского физ.-хим. об-ва, 1897, т. XXIV, часть физич., вып. 9, отд. 1, стр. 350

ПРОТОКОЛ 168 (218)-го ЗАСЕДАНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РУССКОГО ФИЗИКО-ХИМИЧ. ОБЩЕСТВА 23 сентября 1897 г.

Председательствует Ф. Ф. Петрушевский

§ 2. Делопроизводитель читает письмо, полученное от г. Циолковского из Калуги, с кратким описанием проекта опытов, которые г. Циолковский намерен выполнить для определения давления движущегося воздуха на

тела вращения и сопротивления, представляемого движению таких тел. Ссылаясь на все свои прежние работы по вопросу об управляемом аэростате, г. Циолковский просит Отделение рассмотреть проект этих его опытов и в случае, если они найдены будут важными и интересными, ассигновать ему из средств Отделения двести рублей на выполнение их.

Постановлено передать проект г. Циолковского для рассмотрения Комиссии, составленной из Д. К. Бобылева, В. В. Лермонтова и И. В. Мещерского, и просить г. Циолковского прислать в Комиссию более подробное описание своих приборов и предлагаемых им опытов.

Приложение 3

Журнал Русского физ.-хим. об-ва. 1898, т. XXX, часть физич., вып. 1, отд. 1, стр. 28

ПРОТОКОЛ 170 (220)-го ЗАСЕДАНИЯ ФИЗ. ОТДЕЛЕНИЯ РУССКОГО ФИЗИКО-ХИМИЧ. ОБЩЕСТВА

11 ноября 1897 г.

Председательствует Ф. Ф. Петрушевский

§ 3. Делопроизводитель, от имени проф. Д. Н. Бобылева, сообщает о решении, к которому пришла Комиссия, рассматривавшая проект опытов по исследованию сопротивления воздуха, разработанный г. Циолковским. Комиссия пришла к заключению, что в той форме, в которой предлагает произвести опыты г. Циолковский, опыты не могут привести к результатам практической важности. Для последней цели необходимо производить такие опыты в значительно большем масштабе, на что потребовались бы значительные средства, которыми Общество в настоящее время не располагает. Ввиду сказанного, Комиссия предлагает уведомить г. Циолковского о том, что Общество не может помочь ему материальными средствами для производства его опытов, мотивируя отказ вышесказанными соображениями.

После непродолжительного обсуждения вопроса постановлено ответить г. Циолковскому в указанном духе.

Приложение 4

1899 г., 10 сентября

Его превосходительству, Господину Вице-президенту Императорской Академии Наук от Константина Циолковского, автора трудов по воздухоплаванию и физической астрономии (Адрес: Калуга, Георгиевская ул., дом Сперанской).

Прошу ваше превосходительство сообщить Академии Наук о моих последних опытах по сопротивлению воздуха, описанных в «Вестнике опытной физики» (Одесса, № 269—272, 1898—1899 гг.).

Оттисков статьи не имею, а журнал весь разошелся, и потому-то не посылаю самого описания опытов, о чем весьма скорблю и извиняюсь.

Пусть компетентные господа члены Академии почтят мои труды их рассмотрением и оценкою.

Если таковая окажется благоприятной для меня, то не могу ли я тогда надеяться на материальное содействие Академии к производству новых опытов по сопротивлению воздуха: более обширных, многочисленных, точных, разнообразных, с большей величины потоком воздуха и с большею скоростью.

Еще в 1891 г., в IV томе «Трудов Отд. физич. наук Импер. Московского Общества любителей естествознания» поместил я описание произведенных мною тогда опытов. С тех пор мысль произвести весьма точные и обширные опыты по сопротивлению не оставляет меня, и я льщу себе надеждой, что высшее ученое учреждение России не откажется меня поддержать.

Результаты опытов будут высланы в Академию и описание их с чертежами и вычислениями может быть напечатано в «Записках Академии» (если того буду достоин).

С совершенным и глубоким почтением остаюсь Константин Циолковский.

Фотографии со всех приборов и моделей (после производства новых опытов) будут высланы в Академию.

Архив АН СССР,
фонд 38, оп. 2, № 633,
лл. 4, 2

Приложение 5

ПРОТОКОЛ ЗАСЕДАНИЯ АКАДЕМИИ НАУК ОТ 22 сентября 1899 г.
ИМПЕРАТОРСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ.
X-е ЗАСЕДАНИЕ 22 сентября 1899 г.

242. Г. Циолковский, автор трудов по воздухоплаванию и физической астрономии, письмом на имя вице-президента Академии от 10 сентября, сообщает о последних опытах по сопротивлению воздуха (см. «Вестник опытной физики», Одесса, № 269—272, 1898 и 1899 гг.) и просит Академию, в случае признания за ними научной ценности, оказать ему материальное содействие для производства дальнейших опытов.

Положено передать письмо г. Циолковского на рассмотрение академику М. А. Рыкачеву.

Приложение 6

ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА ЗАСЕДАНИЯ ИМПЕРАТОРСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК.
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ, № XI,
от 6 октября 1899 г.

§ 270

Академик М. А. Рыкачев, во исполнение § 242 прот. засед. от 22 сент., представил Отделению о записке г. Циолковского отзыв следующего содержания:

«Автор просит Академию оказать ему материальное содействие для продолжения его опытов над сопротивлением воздуха, описанных в его статье «Давление воздуха на поверхности, введенные в искусственный воздушный поток», помещенной в № 269—272 Вестника опытной физики и элементарной математики.

«Опыты эти заслуживают полного внимания Академии, как по идее, так и по разнообразию опытов. Несмотря на примитивные домашние средства, какими пользовался автор, он достиг все же весьма интересных результатов.

«Для образования потока воздуха г. Циолковский пользуется воздуходувною машиною, вроде веялки, приводимую в движение грузами разной величины ($1/2$ ф., 1 ф., 2 ф., 4 ф., 8 ф., 16 ф.).

«Для того, чтобы выбрасываемому воздуху придать одно общее направление, в отверстие воздуходувки вставляется открытый с двух сторон ящик, разгороженный тонкими горизонтальными и вертикальными пластинками, направляющими воздух параллельными струями, так что из ящика воздух выходит наружу одним горизонтальным потоком. В средину этого потока, в небольшом расстоянии от воздуходувки, ставят испытываемую модель. Площадь сечения потока — 1200 кв. сант., а площадь сечения испытываемого тела не более 80 кв. сант. Модель ставится на столбике, прикрепляемые к ящику, плавающему в воде другого сосуда, неподвижно укрепленного на столе. С этим же столом неизменно связана опора, на которой свободно качается, как маятник, тонкая легкая стрелка. Весьма подвижной и легкий рычаг соединяет эту стрелку со столбиками, на которых ставится модель; при малейшем давлении на модель, последняя, на своем пловучем ящике, приходит в движение и отклоняет стрелку до тех пор, пока тяжесть отклоненной стрелки не уравнивает давления. Величина отклонения, определяемая помощью поставленной позади стрелки неподвижной горизонтальной линейки, разделенной на миллиметры, и служит для определения давления на модель; абсолютные величины давления, соответствующие определенному отклонению стрелки, измерялись помощью грузиков, привешиваемых на нитке, прикрепленной к пловучему ящику и перекинутой через блок. Для определения скорости потока при различных грузах, приводивших в движение воздуходувку, автор

измерял давление, производимое потоком на пластинки, поставленные нормально к потоку, и затем вычислял скорость по формуле Кальете и Колардо, которые определяли соотношение между давлением и скоростями при прямолинейном движении пластинки. Между прочим, автор определил давление воздуха на пластинку при разных углах наклона, через каждые 5° , причем получил неожиданный результат, что при движении пластинки под углом около 50° к направлению потока получается нормальное давление на пластинку более, чем при положении пластинки перпендикулярно к направлению потока. Опыты были произведены над правильными призмами, над цилиндрическими поверхностями с разнообразным сечением, над многогранниками, над шаром, над продолговатыми телами вращения и проч. Автор определил зависимость сопротивления от скорости потока и от продолговатости формы. Весьма интересны опыты, произведенные с целью определения влияния кормовой части; оказывается, что для продолговатого тела, у которого один конец сферический, а другой острый конический (аэростат Шварца), получается значительно меньшее сопротивление при обращении к ветру сферическим концом, чем коническим. Насколько автору удалось получить надежные результаты, видно из того согласия, которое обнаружилось при испытании давления на квадратную пластинку при скоростях потока, получаемых приведением в движение колеса воздуходувки грузами, постепенно удваиваемыми. Давление на пластинку при этом получилось: 4,5; 9; 18; 36,5; 73; 145, т. е. изменения происходили почти совершенно точно так, как по теории этого можно было ожидать. Часть опытов была посвящена определению трения воздуха о пластинку, расположенную параллельно потоку. Опыты производились с моделями малых размеров и при небольших скоростях потока воздуха; наконец не было произведено испытание над скоростью потока в разных частях его сечения. По всем этим причинам, производство опытов в более широких размерах и более точными приборами было бы крайне желательно, и я позволяю себе просить Отделение исполнить просьбу автора и оказать ему материальную поддержку из фонда, предназначенного на ученые потребности.

Отделение постановило просить академика М. А. Рыкачева войти в сношение с г. Циолковским и запросить у него как программу предполагаемых им опытов, так и смету расходов, предупредив его, что смета должна быть составлена возможно экономнее, ввиду ограниченности средств Академии.

Приложение 7

ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА ЗАСЕДАНИЯ ИМПЕРАТОРСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК.
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ,
№ XVI, от 15 декабря 1899 г.

§ 384

Академик М. А. Рыкачев, во исполнение постановления Отделения (§ 270), представил составленную г. Циолковским подробную программу предполагаемых им опытов над сопротивлением воздуха и смету потребных на это расходов. По этой смете, на выполнение всех намеченных программ опытов потребуется расходов приблизительно в 1000 руб., но г. Циолковский готов довольствоваться, согласно его заявлению, всякою материальною поддержкою, какую Академия найдет возможным ему оказать. Ввиду внимания, с каким Отделение отнеслось к этим интересным опытам, академик М. А. Рыкачев просит Конференцию, при распределении кредита 1900 г. на ученые потребности Академии, обсудить вопрос о том, какое пособие могло бы быть выдано г. Циолковскому.

Положено рассмотреть этот вопрос в соединенном заседании I и III Отделений, имеющем быть 12 января 1900 г.

Архив АН СССР,
фонд 1, оп. 1а, № 146

Приложение 8

ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА ЗАСЕДАНИЯ ИМПЕРАТОРСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК.
СОЕДИНЕННОЕ ЗАСЕДАНИЕ I И III ОТДЕЛЕНИЙ, от 12 января 1900 г.

3) Слушали Академика М. А. Рыкачева

«Относительно содействия со стороны Академии г. Циолковскому при производстве им опытов по сопротивлению воздуха (см. § 384 протокола заседания Физико-математического отделения от 15 декабря 1899 г.). Выполнение всех намеченных в представленной г. Циолковским программе опытов обойдется в 1000 рублей, но г. Циолковский готов довольствоваться, согласно его заявлению, и меньшим пособием. Академик М. А. Рыкачев признает желательным ассигновать г. Циолковскому в текущем 1900 году на производство всех проектированных им опытов тысячу рублей».

Соединенное собрание постановило:

3) Академику М. А. Рыкачеву на производство г. Циолковским опытов по сопротивлению воздуха [выдать] 470 руб.

Архив АН СССР,
фонд 1, оп. 1а, № 147

Приложение 9

Сокращенный доклад Константина Циолковского (адрес: Калуга, Георгиевская ул., дом. Победина) в императорскую Академию Наук об опытах по сопротивлению воздуха, производимых на средства Академии с марта 1900 г. до 1-го декабря 1901 г. К этому докладу прилагаются: 58 таблиц-чертежей (86 чертежей), свод выводов из отчета и сырой материал — ряды чисел, записанных моим помощником во время опытов, послуживших основанием для моих работ (24 листа).

Чертежи представляют копии с подлинных чертежей, хранящихся у меня. Копии сделаны более грубо, но приноровлены к легкому их рассмотрению, а если нужно, и к напечатанию их.

Свод выводов из отчета полезен для быстрого обозрения трудов и оценки их. Сырой материал в виде рядов чисел указывает на степень колебания стрелки во время наблюдений.

Для своих опытов я просил у Академии 1000 рублей. Академия предложила мне 470. Я взял эти деньги с великою благодарностью и радостью и решился на эти средства произвести все предлагаемые мною в проекте опыты.

Даст бог силы и здоровья — я исполню предполагаемое хотя бы и с помощью своих личных довольно скудных средств.

Хочет или не хочет этого Академия — от своих изысканий я не отступлюсь.

Но все же мне желательно, чтобы Академия меня поддержала не только нравственно, но и материально, что возможно только в таком случае, если представленные мною работы, в глазах Академии, заслуживают того.

Итак, жду суда Академии и помощи, сообразной этому суду. Ему я покоряюсь безропотно, но опыты свои ни в каком случае не оставляю, потому что позволительно иметь и свое собственное мнение, по которому я за опытами своими признаю некоторое значение.

Извещение о дальнейших своих трудах, если Академия не отвергнет их, приготовлю к декабрю следующего 1902 г.

Если Академия удостоит мой труд напечатания, то покорнейше прошу о распоряжении выслать мне корректуру.

Прошу далее, покорнейше, по рассмотрению об оценке моих работ, сообщить мне мнение и решение Академии в лице ее высокоуважаемых сочленов.

Для меня это крайне важно, потому что определит мне дальнейший мой путь по отношению к распространению моих открытий по сопротивлению воздуха.

С глубочайшим уважением

остаюсь

К. Циолковский

Печатается с подлинного письма К. Э. Циолковского. Оно было написано на первом листе посланной им в Академию Наук рукописи и вернулось вместе с нею к нему. Ныне хранится в его архиве в Московском отделе Архива Академии Наук СССР, фонд 555.

Приложение 10

ПИСЬМО К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО АКАДЕМИКУ М. А. РЫКАЧЕВУ

1 сентября 1901 г.

Ваше превосходительство.

Вот уже более года я усиленно работаю над опытами по сопротивлению воздуха, но работа моя далеко еще не закончена. Описание и разработка уже произведенных опытов занимают в беловом отчете, приготовляемом для Академии, более 60 листов, а к ним еще листов 20 чертежей (изображение приборов и кривые сопротивлений). И несмотря на это, программа предполагаемых исследований еще не исчерпана. Я даже не могу с уверенностью сказать, когда это случится. Но я одно знаю, что я много работал и кое-что сделал. Посоветуйте, пожалуйста, что теперь делать: продолжать опыты или сделать перерыв на 3 месяца с тем, чтобы приготовить копию с отчета для представления ее в декабре 1901 г. в Императорскую Академию Наук.

Я склоняюсь к последнему, потому что здоровье мое не совсем надежно, и бог один знает, что будет в следующем году.

Я хочу, чтобы отчет где-нибудь печатался, и потому прошу Вас посоветовать мне что-нибудь и в этом отношении.

С совершенным уважением остаюсь к Вам

К. Циолковский

Для меня началась пора учительской деятельности, которая у меня хотя и отнимает немного времени, но отнимает много сил; потому что к делу преподавания я так же равнодушен, как и к своим опытам.

Несмотря на это и другие неблагоприятные условия, у меня есть надежда закончить все работы к декабрю 1902 года. Адрес: Калуга, Георгиевская ул., д. Победина. К. Циолковскому.

Приложение 11

ОТВЕТ АКАД. М. А. РЫКАЧЕВА К. Э. ЦИОЛКОВСКОМУ

Директор Николаевской Главной
Физической Обсерватории
26 сентября 1901 г.

Копия
В г. Калугу.
Георгиевская улица, д. Победина.
Его высокопревосходительству
К. Циолковскому

Милостивый государь,

Вернувшись из командировки, получил Ваше любезное письмо от 1 сентября 1901 г.

Спешу ответить, что по моему мнению конечно лучше на время приостановить Ваши опыты, чтобы обработать то, что уже сделано. Когда отчет будет написан, если Вам благоугодно будет мне его прислать, я готов исполнить Вашу просьбу обдумать, где бы его можно было напечатать.

С искренним пожеланием Вам прежде всего здоровья, а затем успеха в Ваших трудах остаюсь

Преданный Вам

М. Рыкачев.

Архив АН СССР,
фонд 38, оп. 2,
№ 633

Приложение 12

ПИСЬМО К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО АКАД. М. А. РЫКАЧЕВУ

Калуга

1902 г., 6 марта

Ваше превосходительство.

Вот уже прошло $2\frac{1}{2}$ месяца, как я имел честь представить мой отчет о сопротивлении воздуха в Имп. Академию Наук. В настоящее время меня начинает разбирать беспокойство о судьбе отчета. Тотчас по отправке его я бодро принялся за новые опыты по сопротивлению. Но чем более протекало времени, тем более мучительное чувство мною овладевало. Извините, что я Вас тревожу может быть преждевременно, но будьте снисходительны к моему чувству, к моему тяжелому душевному состоянию, от которого у меня опускаются руки, и будьте добры сообщить, как принят отчет или что Вы о нем сообщили. Могу ли я надеяться, что он будет напечатан, могу ли я надеяться на материальную или хоть нравственную поддержку со стороны Императорской Академии Наук.

С моими приборами мне решительно в моей квартире повернуться негде. Я мечтаю о построении обсерватории по сопротивлению воздуха, где бы можно хранить все машины, приборы и инструменты для производства моделей.

При малейшей поддержке со стороны Академии, мне кажется, я мог бы осуществить свою мечту (конечно не без моих личных ничтожных средств).

В такой обсерватории по сопротивлению воздуха удобно было бы повторять опыты для ученых, желающих проверить эти опыты. В ней удобно было бы хранить модели и производить опыты неопределенное число лет, потому что дело это великое, чрезвычайно великое, как океан...

Нельзя ли сделать что-нибудь с помощью его императорского высочества господина президента Академии. Я думаю, что многое зависит от Вашего мнения о моих трудах. Примите уверение в моем совершенном почтении к Вам.

К. Циолковский

Адрес: Калуга, Женское епархиальное училище, преподавателю физики К. Циолковскому.

Архив АН СССР,
фонд 38, оп. 2,
№ 633, лл. 4, 5

БИБЛИОГРАФИЯ

Составил Б. Н. Воробьев

РАБОТЫ К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО ПО ВОПРОСАМ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА, НАПЕЧАТАННЫЕ ДО ИЗДАНИЯ НАСТОЯЩЕГО ТОМА

1. Давление жидкости на равномерно движущуюся в ней плоскость. Напечатано в IV томе Трудов Отделения физических наук Общества любителей естествознания за 1891 г. (2 рис.).

Издана в том же году Отдельным оттиском (13 стр.) с присоединением напечатанной в том же томе его статьи «Как предохранить хрупкие и нежные вещи от толчков и ударов» (стр. 15—18).

2. Аэроплан, или птицеподобная (авиационная) летательная машина. Статья в журнале «Наука и жизнь» (Москва) за 1894 г., № 43—46 (10 рис.).

Издана в 1895 г. отдельным оттиском.

3. Письмо в редакцию журнала «Технический сборник» (С.-Петербург) за 1896 г. об ошибках, допущенных проф. М. М. Поморцевым в расчетах сопротивления воздуха в его работе «Привязной, свободный и управляемый аэростаты. Механические условия их равновесия и движения». СПб., 1895 г.

4. Самостоятельное горизонтальное движение управляемого аэростата (новые формулы сопротивления воздуха и движения аэростата). Статья в журнале «Вестник опытной физики и элементарной математики» (Одесса), 1897, № 258—259 (3 рис.).

Отдельный оттиск статьи напечатан в 1895 г. в виде брошюры (3 стр.).

5. Давление воздуха на поверхности, введенные в искусственный воздушный поток. Статья в журнале «Вестник опытной физики и элементарной математики» (Одесса), 1898, № 269—272.

Отдельный оттиск этой работы издан в 1899 г. (48 стр.).

6. Вопросы воздухоплавания (по поводу трудов по воздухоплаванию VII Отдела Русского технического общества за период с 1895—1900 гг.). Статья в журнале «Научное обозрение», (СПб.), 1900, № 10.

Отдельный оттиск этой работы издан в 1900 г. (16 стр.).

7. Рецензия на книгу д-ра К. Я. Данилевского «Управляемый летательный снаряд» (1900, Харьков) в журнале «Научное обозрение» (СПб.), 1901, № 5.

8. Рецензия на книгу Д. Чумакова «Основы к решению задачи воздухоплавания» (Асхабад, 1901) в журнале «Научное обозрение», 1901, № 9.

9. Сопротивление воздуха и воздухоплавание. Статья в журнале «Научное обозрение», (СПб.), 1902, № 5.

Отдельный оттиск этой работы выпущен в 1902 г. (20 стр.).

10. Глава XIV «Сопротивление воздуха» в большой работе К. Э. Циолковского «Аэростат и аэроплан», печатавшейся в журнале «Воздухоплаватель» за 1905—1908 гг. Глава XIV напечатана в № 8 за 1908 г.

11. Устройство летательного аппарата насекомых и птиц и способы их полета (с 5 рис.) — статья в журнале «Техника воздухоплавания» (СПб., орган VII Отдела Русского технического общества), 1912, № 3.

Отдельный оттиск этой статьи был напечатан в том же 1912 г.

12. Сопротивление воздуха и скорый поезд. Калуга, 1927 г., издание автора (72 стр., 3 рис.).

13. Изданные труды К. Э. Циолковского (брошюра). Калуга, 1927 г., изд. автора, 24 стр. В этой написанной К. Э. брошюре имеется ряд аннотаций к его работам по сопротивлению воздуха.

14. Давление на плоскость при ее нормальном движении в воздухе. Калуга, 1930, изд. автора (48 стр.).

Эта же работа перепечатана во II томе «Избранных трудов К. Э. Циолковского», изд. ОНТИ, 1934 г., под редакцией Ф. А. Цандера (стр. 112).

15. Планер и ветер. Статья в № 3 журнала «Техника молодежи», 1935.

ПРИМЕЧАНИЯ*

«ДАВЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ НА РАВНОМЕРНО ДВИЖУЩУЮСЯ В НЕЙ ПЛОСКОСТЬ»

¹ Это предисловие находилось в рукописном экземпляре работы. В печати оно появляется впервые. 21.

² Циолковскому принадлежит первое теоретическое и экспериментальное исследование влияния продолговатости (по современной терминологии — удлинения) крыла на аэродинамические силы. Следует отметить, что это исследование было выполнено еще в 1890—1891 гг., т. е. задолго до создания современной теории крыла. 23.

«ОБЪЯСНЕНИЯ ВИХРЕОБРАЗНЫХ ДВИЖЕНИЙ В ВОЗДУХЕ И ВОДЕ»

³ Статья представляет собой добавление Циолковского к его работе «Давление жидкости на равномерно движущуюся в ней плоскость». Это добавление печатается впервые. Здесь Циолковский, развивая гипотезу, положенную им в основу работы «Давление жидкости...», приходит к выводу о существовании двух противоположных течений при обтекании препятствия, которые и образуют круговое движение, наблюдающееся в действительности. Таким образом, еще раз подтверждается его исходная гипотеза. Изложенные в этой статье представления Циолковского о возвратном течении за препятствием, относящиеся к 1891 г., надолго опередили дальнейшее развитие аэродинамики. 30

«АЭРОПЛАН ИЛИ ПТИЦЕПОДОБНАЯ (АВИАЦИОННАЯ) ЛЕТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА»

⁴ Следует обратить внимание на оригинальную постановку К. Э. Циолковским вопроса о роли поступательного движения при полете на аппаратах тяжелее воздуха. Им показано как теоретически, так и экспериментально (при помощи построенного им прибора — вертушки), что работа поддержания в воздухе аппарата, имеющего машущие крылья, уменьшается при возрастании скорости поступательного движения. 41.

⁵ Циолковским была впервые в мировой литературе выдвинута идея применения на самолете соосных воздушных винтов, вращающихся в противоположные стороны. 44.

⁶ Заслуживает быть отмеченным, что, как видно из текста, Циолковский еще в 1890—1894 гг. выступает как убежденный сторонник применения на летательных

* Цифра, стоящая в конце каждого примечания, указывает страницу, к которой оно относится.

аппаратах бензиновых двигателей внутреннего сгорания. Эти взгляды являются для того времени бесспорно прогрессивными взглядами и надолго опережают начало фактического применения таких двигателей на самолетах. 44.

⁷ Здесь впервые (в тексте и в дальнейших чертежах—фиг. 2—4) Циолковский дает схему аэроплана, весьма близкую к современной. Необходимо отметить следующие основные особенности этой схемы, которые отличают ее от всех других, ранее предложенных и осуществленных: в этой схеме имеются удобообтекаемый фюзеляж (корпус), безрасчалочные, свободнонесущие крылья, изогнутые как в продольном, так и в поперечном разрезах, соосные, вращающиеся в противоположных направлениях воздушные винты и бензиновые двигатели внутреннего сгорания. Такая схема аэроплана никем ранее не была предложена или осуществлена; Циолковский же не только дал эту схему, но и подробно ее исследовал как с точки зрения аэродинамической, так и с точки зрения прочности конструкции. Все это дает основание признать бесспорный приоритет Циолковского в создании современной схемы моноплана со свободнонесущими крыльями. 44.

⁸ В этом разделе Циолковским впервые в авиационной литературе разработан ряд элементов аэродинамического расчета самолета. 45.

⁹ Автор понимает под P_2 вес двигателей, которые необходимы были бы для движения при отсутствии подъемной силы; P_1 есть добавочный вес двигателей, связанный с дополнительным лобовым сопротивлением, которое возникает при наличии подъемной силы. 48.

¹⁰ Фиг. 3 и 4 представляют большой интерес, так как здесь Циолковским впервые дана схема монопланного свободнонесущего крыла, толщина которого убывает при удалении от места крепления к концам (равнопрочного). Фиг. 4 интересна, кроме того, еще и потому, что здесь впервые изображена схема самолета типа «чайка», которая обладает, как известно, рядом аэродинамических преимуществ. Циолковским эта схема предложена в 1894 г., т. е. задолго до ее первого применения на практике. 52.

¹¹ Здесь впервые в авиационной литературе К. Э. Циолковским изложена идея применения гироскопа на самолете в качестве простейшего автопилота. Циолковский предлагает здесь также схему электромагнитного автоматического управления рулями. Известно, кроме того, что ранее (в работе «Аэростат, металлический, управляемый», вып. II, Калуга, 1893) им была разработана схема электромагнитного автоматического управления для дирижабля. Эти факты позволяют установить приоритет Циолковского как основоположника авиационной электроавтоматики. 73.

«ДАВЛЕНИЕ ВОЗДУХА НА ПОВЕРХНОСТИ, ВВЕДЕННЫЕ В ИСКУССТВЕННЫЙ ПОТОК»

¹² Построенная К. Э. Циолковским в 1896—1897 гг. лопастная «воздуховка» является первой в России аэродинамической трубой.

К. Э. Циолковский создал также измерительное оборудование для нее и, в частности, аэродинамические весы поплавкового типа, обладавшие, как видно из описания, высокой чувствительностью и большой точностью. При помощи аэродинамической трубы, измерительного оборудования и пользуясь самостоятельно разработанной им методикой эксперимента, Циолковский впервые в истории науки выполнил систематическое экспериментальное исследование лобового сопротивления и подъемной силы тел разной геометрической формы, в том числе моделей крыльев и корпусов дирижаблей. В результате этого исследования К. Э. Циолковским был установлен ряд важнейших законов аэродинамики, относящихся к влиянию геометрических параметров тела, и критериев динамического подобия на сопротивление среды. Таким образом, К. Э. Циол-

ковский с полным правом может быть назван основоположником современной экспериментальной аэродинамики.

Экспериментальные исследования К. Э. Циолковского в области аэродинамики, выполненные при помощи построенных им аэродинамических труб, изложены в настоящей работе («Давление воздуха на поверхности, введенные в искусственный поток») и в двух следующих работах, помещенных в этом же томе («Отчет К. Э. Циолковского Российской Академии Наук об опытах по сопротивлению воздуха» и «Сопротивление воздуха и воздухоплавание»). 91.

¹³ Автор пренебрегает здесь и в дальнейшем составляющей силы сопротивления, направленной вдоль пластинки. 97.

¹⁴ Циолковский впервые устанавливает здесь законы трения для воздушной среды. Им впервые доказано здесь опытным путем, что сила трения воздуха отнюдь не пропорциональна площади поверхности, подвергающейся трению, и квадрату скорости потока, как это предполагалось до него. Циолковский сумел с поразительной точностью определить малую величину силы трения воздуха о поверхность модели. Замечательное экспериментальное искусство Циолковского и его интуиция сказались и в обработке опытов. Выбрав степенные законы для зависимости силы трения от скорости потока и размеров модели, Циолковский отчетливо установил, что в формулу для коэффициента трения скорость и размер (длина) пластинки входят с одним и тем же показателем степени, как это и должно быть согласно теории динамического подобия.

Численные величины коэффициентов трения, определенные К. Э. Циолковским, близки к тем величинам, которые были найдены значительно позднее методами теории пограничного слоя. Формула (89) в современных обозначениях эквивалентна следующей формуле:

$$c_{\text{хтр}} = \frac{T}{\rho \frac{V^2}{2} L} = \frac{0,61}{\left(\frac{VL}{\nu}\right)^{0,4}} = \frac{0,61}{R^{0,4}},$$

где $R = \frac{VL}{\nu}$; результаты вычислений по этой формуле оказываются близкими к результатам,¹ которые получаются по известной формуле теории пограничного слоя (для ламинарного движения в слое):

$$c_{\text{хтр}} = \frac{1,328}{R^{0,5}}. \quad 101$$

«ОТЧЕТ К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ОБ ОПЫТАХ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ ВОЗДУХА»

¹⁵ К. Э. Циолковский впервые осуществил таким образом выравнивание потока в аэродинамической трубе при помощи решетки, состоящей из ориентируемых перегородок. 124.

¹⁶ Циолковский впервые устанавливает здесь факт возрастания сопротивления пластинки при наличии в ней вырезов. 137.

¹⁷ Параграфы 45—46, как и ряд параграфов в дальнейшем тексте, в рукописи Циолковского отсутствуют. Повидимому, это является пропуском в нумерации. 138.

¹⁸ Запимаясь с 1885 г. аэростатами, К. Э. Циолковский всегда интересовался сопротивлением тел вращения. Ему принадлежит первое экспериментальное исследование удобообтекаемых тел вращения и установление зависимости сопротивления этих тел от их продолговатости, размеров, скорости движения и других параметров. Результаты

этого исследования были им изложены частью в работе «Давление воздуха на поверхности, введенные в искусственный поток», но наиболее полно в настоящей работе.

Следует кстати отметить, что самый термин «продолговатость», применявшийся К. Э., лучше передает соответствующее понятие, нежели принятый в настоящее время термин «удлинение». 143.

¹⁹ Автор пренебрегает здесь составляющей силы сопротивления, направленной вдоль пластинки. 147.

²⁰ К. Э. Циолковскому принадлежит не только первое по времени теоретическое исследование влияния продолговатости крыла (по теперешней терминологии — удлинения) на аэродинамические силы, действующие на него, но и первое детальное исследование влияния продолговатости опытным путем.

В тексте изложены основные результаты опытов Циолковского по определению силы давления на пластинки разного удлинения. Следует обратить внимание на то, что Циолковский изменял удлинения пластинки в весьма широких пределах и экспериментировал, в частности, и с пластинками малого удлинения; он первый указал на значение крыльев малого удлинения, которые на практике стали применяться гораздо позднее. 152.

²¹ Автор пренебрегает здесь трением воздуха о боковую поверхность цилиндра. 158.

²² Объяснение этого парадоксального явления было впервые дано проф. Жуковским, который указал, что причиной большего сопротивления тела в движущейся жидкости являются вихри, которые образуются на твердых поверхностях, ограничивающих жидкость (например, на стенках канала). 160 и 137.

²³ Циолковским здесь впервые изложены некоторые элементы аэродинамического расчета самолета. 184.

²⁴ Опыты К. Э. Циолковского с цилиндрами большой длины (до 1 м), расположенными осью вдоль потока, дали ему возможность, как видно из текста, значительно дополнить зависимости, выведенные им ранее (в работе «Давление воздуха на поверхности, введенные в искусственный поток»), и установить основные законы турбулентного трения. 198.

«СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА И ВОЗДУХОПЛАВАНИЕ»

²⁵ Как уже указывалось в примечании к стр. 152, Циолковским были впервые установлены зависимости между удлинением крыла и действующими на него силами. В тексте изложены в сжатом виде основные выводы Циолковского по этому вопросу, полученные им в результате опытов со второй аэродинамической трубой. 213.

²⁶ Термин «давление» Циолковский применял также в смысле «сопротивление» и в смысле «сила давления». Здесь и везде в дальнейшем эти три понятия разграничены. 214.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
<i>Н. Я. Фабрикант</i> . О работах К. Э. Циолковского по аэродинамике	5

А Э Р О Д И Н А М И К А

Давление жидкости на равномерно движущуюся в ней плоскость	21
Объяснение вихреобразных движений в воздухе и воде	30
Устройство летательного аппарата насекомых и птиц и способы их полета	31
Аэроплан или птицеподобная (авиационная) летательная машина	40
Первые опыты К. Э. Циолковского по сопротивлению воздуха (1895—1896) до сооружения им аэродинамической трубы	74
Первое описание К. Э. Циолковским его аэродинамической трубы, посланное 12 октября 1897 г. в Русское физико-химическое общество в Петербурге .	79
Давление воздуха на поверхности, введенные в искусственный воздушный поток	89
Отчет К. Э. Циолковского Российской Академии наук об опытах по сопро- тивлению воздуха, произведенных им на средства Академии в 1900— 1901 гг.	121
Сопротивление воздуха и воздухоплавание	208
Давление на плоскость при ее нормальном движении в воздухе	231

П Р И Л О Ж Е Н И Я

Приложения 1—12	251
Библиография	261
Примечания	263

Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Академии Наук СССР

*

Редактор—составитель тома
инженер *Б. Н. Воробьев*
Научный редактор тома
профессор *Н. Я. Фабрикант*

*

Редактор издательства *В. В. Маслеников*
Технический редактор *А. А. Киселева*
Переплет, титул художника *Е. И. Когана*
Корректор *Т. С. Петрикова*

*

РИСО АН СССР № 4521. Т-07262. Издат. № 3023
Тип. заказ № 1013. Подп. к печ. 29.IX 1951 г.
Формат бум. 70×108^{1/16}. Печ. л. 22,95 + 1 вкл.
Бум. л. 8,37. Уч.-издат. л. 17,75. Тираж 3000.
Цена в переплете 18 руб.

2-я тип. Издательства Академии Наук СССР
Москва, Шубинский пер., д. 10

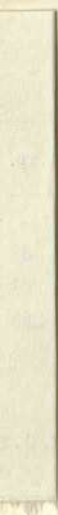
ИСПРАВЛЕНИЯ и ОПЕЧАТКИ

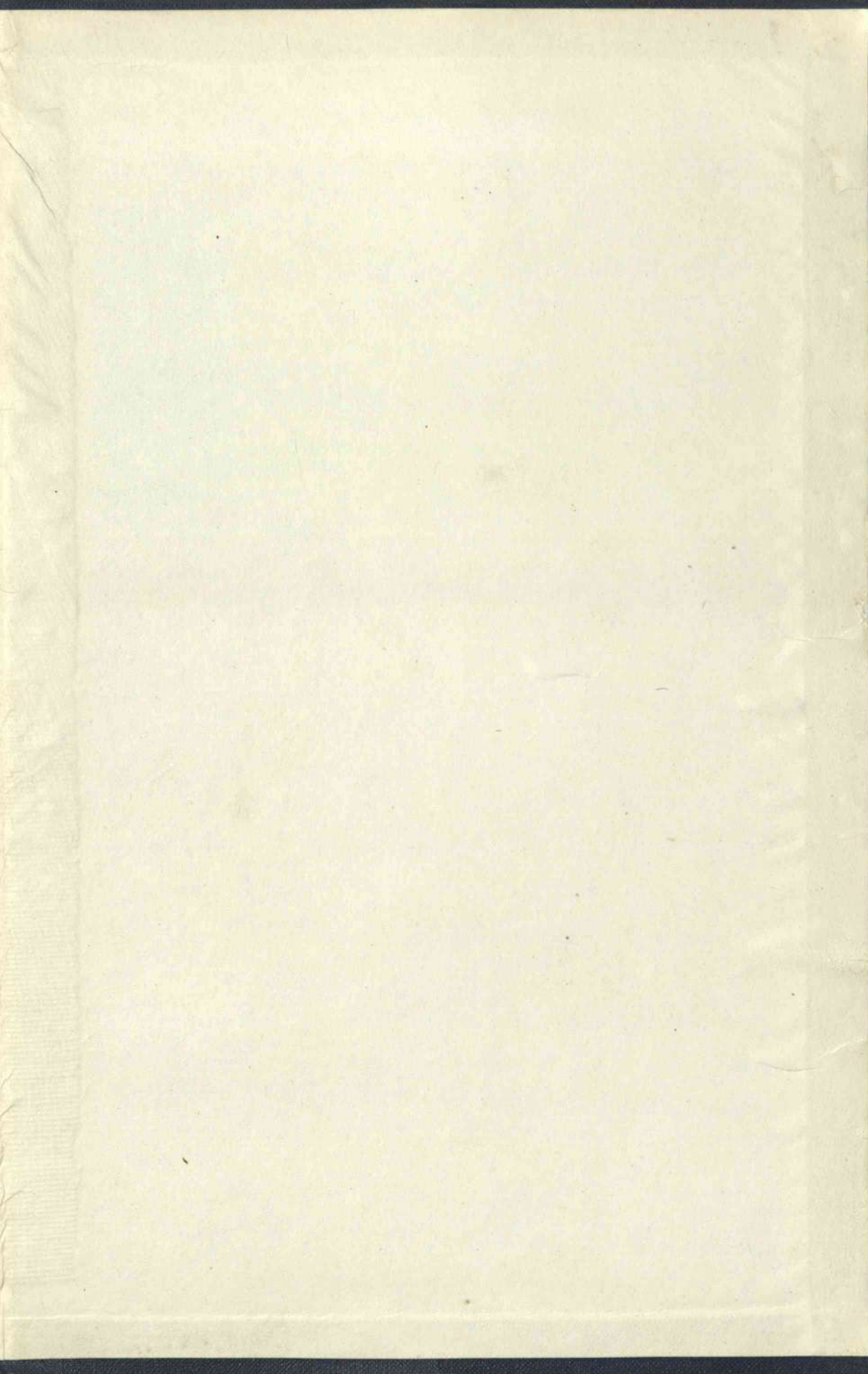
Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
89	2 св.	введенной	введенные
201	4 сл.	<i>Азу</i>	<i>Аз</i>
263	10 св.	объяснения	объяснение

Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Академии Наук СССР

*

Редактор—составитель тома
инженер *Б. Н. Воробьев*
Научный редактор тома
профессор *Н. Я. Фабрикант*





10/21