

Б.Н. Юрьев

**Экспериментальная
аэродинамика**

**Часть 1. Теоретические основы
экспериментальной
аэродинамики**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 030
ББК 92
Б11

Б11 **Б.Н. Юрьев**
Экспериментальная аэродинамика: Часть 1. Теоретические основы экспериментальной аэродинамики / Б.Н. Юрьев – М.: Книга по Требованию, 2013. – 302 с.

ISBN 978-5-458-43838-4

Книга является первой частью курса „Экспериментальной аэродинамики“. В ней изложены общие законы течения воздуха, закон подобия, сведения о пограничном слое и о течении воздуха по трубам. В соответствии с требованиями программы включены элементы гидравлики. Центральное место отведено закону аэродинамического подобия, являющегося основой всей экспериментальной аэродинамики. Книга предназначена для студентов авиационных вузов.

ISBN 978-5-458-43838-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ту среду — воздух, с которой он как авиационный инженер будет иметь дело всю жизнь.

В этой дисциплине он знакомится и с современным научным методом и должен получить правильные взгляды на взаимодействие между теорией, экспериментом и практикой летного дела.

Изучаемый материал очень велик и разнообразен и требует в то же время хорошего усвоения, так как авиационному инженеру приходится постоянно пользоваться им в практической работе.

Вследствие этого приходится отводить на курс экспериментальной аэродинамики достаточное время и вести все преподавание на фоне широко развернутых в лаборатории исследований, производимых при постройке опытных самолетов, и давать, кроме того, широкое освещение основных явлений, возникающих при течении воздуха около тел.

Преподавание этого курса должно вестись таким образом, чтобы слушатель в каждой теме чувствовал связь между теорией, лабораторным экспериментом и практикой конструирования и эксплуатации самолетов. При таком изложении неизбежны как повторения, так и забегания вперед, что при словесном изложении оживляет курс и подчеркивает ту связанность всех вопросов экспериментальной аэродинамики, какая имеется в действительности. В самом деле, говоря например, об измерении скорости потока с помощью трубки Пито, приходится упомянуть о влиянии на нее числа Рейнольдса, о начальной турбулентности потока, о важности правильного выбора места установки трубки на самолете и т. д. Все эти темы являются логически следующими за основной темой — „измерители скорости“ и при их изложении уже предполагается у слушателей знание этих приборов. Таких примеров можно привести множество.

Однако при написании книги от этого принципа пришлось отступить и излагать материал в строго логической последовательности.

Курс таким образом расчленяется на четыре части.

Часть I. Теоретические основы экспериментальной аэродинамики.

Часть II. Индуктивное сопротивление крыльев аэроплана.

Часть III. Методы и аппараты экспериментальной аэродинамики.

Часть IV. Материалы по аэродинамическим исследованиям летательных аппаратов и их частей.

Настоящая книга представляет собой первую часть курса экспериментальной аэродинамики. Она охватывает те сведения, которыми приходится пользоваться при изложении буквально любого вопроса аэродинамики. Сюда отнесены общие законы течения воздуха, закон подобия, оси и коэффициенты аэродинамики, основные диаграммы, сведения о пограничном слое и о течении воздуха по трубам.

Пришлось учесть также и программные требования. Дело в том, что построение учебных планов наших авиавтузов далеко не одинаково. В некоторых втузах нет, например, отдельного курса гидравлики, и элементы этой дисциплины включены в курс экспериментальной аэродинамики. В большинстве втузов на эксплуатационных и производственных специализациях нет курсов теоретической аэродинамики.

Все эти обстоятельства, а также желание дать курсу известную законченность и единство, заставили автора включить в книгу две главы, излагающие элементы общей теории движения любых жидкостей — как газообразных, так и капельных. После ознакомления с этой книгой студент сможет без затруднений приступить к изучению индуктивного сопротивления крыльев и даже вихревой теории воздушных винтов. Конечно, для самолетчика-конструктора или аэродинамика этот объем курса недостаточен, но для этих специальностей всюду читаются обширные курсы теоретической аэродинамики в классическом изложении.

Элементы теории изложены не в так называемой классической форме, а тем способом, каким читал последние годы проф Н. Е. Жуковский свои лекции, называя его „манерой Томсона“. Способ этот заключается в том, что все теоремы доказываются прямыми методами на основании общих теорем механики, а не путем анализа общих уравнений движения жидкости, как это делается в классическом изложении. Такая манера изложения весьма наглядна и хорошо усваивается слушателями.

Центральное место уделено в этой книге закону аэродинамического подобия, так как именно он является основой всей экспериментальной аэродинамики. При изложении курса на этом законе необходимо сосредоточить все внимание слушателей. Благодаря включению в курс закона подобия удалось очень легко включить в него и элементы гидравлики. Для этого при изложении законов течения воздуха по трубам достаточно было указать на число Рейнольдса, чтобы дать формулы, пригодные для расчета простых трубопроводов с любыми жидкостями — бензином, маслом и водой.

В связи с возрастающими все время скоростями полета самолетов в курсе уделено достаточно внимание вопросам учета сжимаемости воздуха.

В книге затрагивается ряд вопросов, почти не отраженных в нашей литературе, — оси координат, пересчеты коэффициентов, разбор сложных случаев подобия и т. д. Было бы очень желательно получить указания с мест на неизбежные недостатки в изложении этих материалов и на желательные дальнейшие улучшения. В настоящее время вышла в свет вторая часть курса „Индуктивное сопротивление“ и готовится к изданию третья часть.

ВВЕДЕНИЕ

Научный метод в аэродинамике и разделение ее на теоретическую и экспериментальную. Аэродинамикой называется наука, занимающаяся изучением движения воздуха в различных условиях и исследующая действие воздуха на соприкасающиеся с ним тела.

Как во всякой науке, изучающей законы природы, в аэродинамике возможны два пути. Первый путь, наиболее заманчивый, — это путь строгой теории. Исходя из основных положений механики, можно дать математические характеристики жидкой или газообразной среды и пытаться затем вывести все более сложные законы движения жидкости чисто математическим путем. Второй путь заключается в том, что изучают экспериментальным методом аэродинамические явления, и результаты таких исследований обрабатывают применительно к надобностям практики. Такая обработка сводится большей частью к получению особых „расчетных коэффициентов“ для простых формул, выражающих „закон подобия“ для исследуемого явления.

Понятно, что первый путь, как бы он ни был совершенен, все же нуждается в опытной проверке. Окончательное суждение о той или иной теории может быть получено лишь опытным путем, — вся современная наука в конце концов является наукой экспериментальной. В настоящее время в наиболее разработанных областях знания, например в области электричества, достигнуто почти полное совпадение теории с данными опыта. Инженер-электрик смело применяет основные законы электродинамики к расчету своих машин и всегда получает на практике результаты, весьма близкие к предсказанным теорией.

Однако в более молодой науке, в аэродинамике, такое соответствие пока еще не достигнуто. Теория и опыт в ней часто противоречат друг другу. Происходит это главным образом от того, что явления аэродинамики имеют весьма сложный и запутанный характер и подойти к ним с вполне строгой теорией не всегда удается. Кроме того, многие задачи не могут быть разрешены из-за чисто математических трудностей, хотя бы аэродинамическая сторона вопроса была вполне ясна. Приближенные же решения часто весьма сильно отклоняются от результатов опыта. Отсюда как будто вытекает необходимость в области аэродинамики основываться исключительно на опыте.

Однако на самом деле чисто опытный путь невозможен. Всякое опытное определение коэффициентов связано с теми формулами, какие для этой цели использованы. Эти формулы служат выражением некоторых теорий, хотя бы и очень простых, например, закона аэродинамического подобия и т. п. Кроме того, ни один точный опыт не может быть „обработан“ без введения ряда поправок, учитывающих различные факторы, например, поправки на влияние стенок аэродинамической трубы, поправки на атмосферные условия, на косизну потока в трубе и т. д. Все эти поправки основаны опять-таки на различных теориях.

Таким образом из всего изложенного становится ясным правильный метод, заключающийся в том, что при аэродинамических исследованиях нужно идти сразу обоими путями, причем следует помнить, что окончательным судьей всегда является опыт.

Назначение теории. В чем же тогда заключается назначение теории?

Как вообще в физике, так и в области аэродинамики на долю теории выпадают три задачи:

Во-первых, теория должна объединять целую группу явлений, приводя ее к какому-либо простому представлению, допускающему приложение математического метода исследования. Таким образом теория должна приводить многообразие к единству. Вместо запоминания целой группы отдельных явлений мы при помощи общей теории получаем их из нее как частный вывод.

Во-вторых, теория позволяет делать различные практические расчеты и находить, например, наиболее рациональные размеры летательных аппаратов и их частей.

Этим не исчерпывается все значение теории. Самым главным является то обстоятельство, что правильная теория отражает объективную истину, и поэтому теория может предсказывать новые явления, еще неизвестные людям.

Таким образом теория является связующим звеном между отдельными опытами. Благодаря этому она имеет огромное значение при различных исследованиях.

Исследовательскую работу очень часто упрощают охота или поискам в неисследованной местности. Исследователь ищет или практическое решение какой-либо реальной задачи или стремится проверить ту или иную теорию, или же просто изучает еще неисследованную область, накапливая фактический материал.

При такой работе умелое пользование теорией играет огромную роль. Исследователь, используя все известные ему факты из изучаемой области, создает временную теорию или рабочую гипотезу и с ее помощью пытается сделать выводы, относящиеся к неисследованной еще области, причем обычно уже стремится к определенной цели. Если символически обо-

значить начальный уровень знания исследователя буквами *A, B, C* (фиг. 1), то при помощи этого ряда известных ему фактов он пытается с помощью своей теории как бы продолжить „линию известного“ в пределах еще не исследованного. При таком развитии теории обычно с некоторого пункта, например *D*, исследователю становится ясным, что далее можно идти с одинаковым правом по двум или даже по нескольким путям.

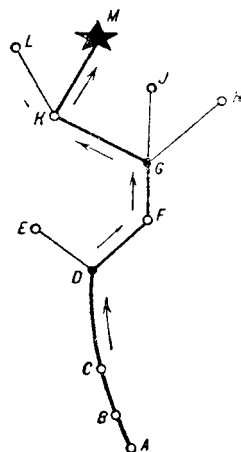
Какой путь будет правильным? На вопрос, — какой путь выбрать на таком перекрестке, — может ответить лишь опыт — это так называемый *experimentum crucis*¹.

Произведя все опыты в указанных теорией направлениях (точки *E* и *F*), исследователь сразу видит, по какому пути надо направиться для решения поставленной задачи. Пусть таким направлением оказалось направление, определенное точкой *F**. Исходя из этой точки, опять при помощи теории, исправленной в случае необходимости, исследователь ведет свою линию дальше, до нового распутия *G*, где правильное направление снова может быть определено, при помощи опытов *H, J, K*. Продолжая такую работу, исследователь в конце концов приходит к опыту *M*, дающему решение поставленной задачи. Такой прием работы обеспечивает скорейший успех и требует производства лишь немногих, но хорошо выбранных опытов.

В противоположность этому иногда работают и другим методом, а именно — намечают всевозможные варианты решения задачи и проводят большое количество опытов, совершенно равноценных. И только после окончания опытной работы ищут в ее результатах ответ на поставленный вопрос. На фиг. 2 символически изображен такой метод.

Понятно, что последний путь технически много сложнее и дороже первого, так как при его применении приходится проводить массу совершенно бесполезных опытов. Кроме того, легко может случиться, что несмотря на большое количество проведенных опытов среди них как раз не окажется нужного (*M*), дающего ответ на поставленный вопрос. Однако этот способ не требует такой высокой квалификации от исследователя, как первый.

При помощи первого метода стараются работать в Европе, а вторым, — хотя и редко встречающимся в чистом виде, пользуются часто в Америке.



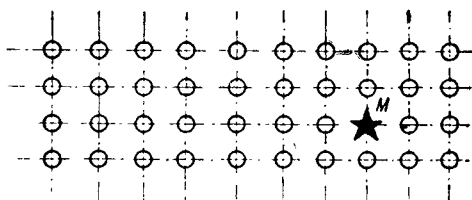
Фиг. 1. Схема научного исследования.

¹ Опыт перекрестка (сгих — крест, указатель дорог). Это название эксперименту такого рода дал Ф. Бэкон.

* Это может означать, что опыт *E* или совсем не удался, или же он явно непригоден для решения поставленной исследователем задачи.

Примером такой работы в области аэромеханики может служить разработка вопросов теории винтов у нас и в Америке. У нас были созданы сперва теории винтов, затем их проверяли опытами с винтами, построенными согласно указаниям этих теорий, и затем после введения соответственных поправок их снова проверили тем же порядком. Таким образом, например, вихревая теория проф. Н. Е. Жуковского была уточнена настолько, что ею можно было уже пользоваться на практике для расчета не только винтов, но и вентиляторов и ветряных двигателей после тщательного исследования всего лишь только двух винтов, построенных согласно указаниям этой теории.

В противоположность этому американцы испытали в Стэнфордском университете свыше 150 пропеллеров всевозможных



Фиг. 2. Схема массового опыта.

форм, однако, их опыты не дали возможности сделать какие-либо общие заключения. Все, что ими было достигнуто, сводится лишь к возможности, применяя закон подобия пропеллеров, переходить от модели винта к винту в натуру и делать интерполяцию.

Понятно, что в чистом виде как первый, так и второй приемы встречаются очень редко. Для возможности создания какой бы то ни было теории необходим некоторый первоначальный запас фактов. Этот запас может быть создан лишь по второму способу. Таким образом в мало исследованных областях, где приходится идти вслепую, применяется второй способ, а в областях, где накоплено много наблюдений, лучше пользоваться первым способом.

Развитие аэродинамической теории. В аэродинамике, как и в других науках, имеются отделы, весьма хорошо разработанные в теоретическом отношении. Эти отделы являются скорее областью математики, чем физики. Например, теория идеальной жидкости в настоящее время представляет собой скорее общий отдел математической физики, чем специальную главу аэродинамики. Чисто гидромеханические понятия, как вихрь, циркуляция, потенциал скоростей, в настоящее время прилагаются и к явлениям магнитным и электрическим.

В сущности, почти вся гидромеханика вошла в несколько обобщенном виде в сравнительно недавно развившуюся математическую дисциплину — векторный анализ.

Таким образом теоретическая аэрогидромеханика является чисто математическим построением, верным в приложении к практическим вопросам постольку, поскольку верны принятые при разработке основные положения. Эти основные положения служат для создания так называемой физической модели

явления, т. е. упрощенной его схемы, допускающей математическую обработку.

Следовательно, причина „неверности“ какой-либо теории может заключаться или в грубости и неточности примененной в ней модели явления, или же в ошибках чисто математического характера, допущенных при ее разработке. Последний случай сравнительно легко обнаруживается, что нельзя сказать о первом.

История науки показывает, что часто модель явления, долгое время казавшаяся вполне соответствующей действительности, с течением времени, с уточнением методов наблюдения, оказывалась недостаточно точной и должна была заменяться другой. То же наблюдалось и в аэродинамике. Теория Ньютона, берущая моделью воздуха объем, заполненный отдельными, ничем друг с другом не связанными частицами, заменяется моделью Эйлера — непрерывной жидкостью, так называемым континуумом, передающей и принимающей лишь нормальные давления на ее поверхность. Далее пришлось ввести и тангенциальные силы, действующие на поверхность элемента жидкости, и получить сложные уравнения движения вязкой жидкости. В последнее время при изучении некоторых явлений приходится уже думать о применении молекулярной теории газов, т. е. всегда возвращаться к отдельным частичкам материи, но не ньютоновским, а быстро движущимся и соударяющимся согласно кинетической теории газов. В результате здесь получился полный цикл диалектического развития: начало — дискретные отдельные частицы Ньютона были заменены их противоположностью — континуумом и, наконец, в молекулярной теории получился как бы возврат к старому, но на новой, уже высшей, основе.

В общем, несмотря на огромную проделанную теоретиками работу, все же многие важнейшие задачи аэродинамики еще не решены и даже неизвестны возможные пути их решения.

Вследствие этого в аэродинамике получили развитие различные упрощенные частные теории, в которых основные черты явления берутся на основе прямых опытов. Эти теории и дают инженеру возможность рассчитывать летательные аппараты. По этой же причине в аэродинамике получил такое широкое применение чисто экспериментальный метод, основанный на законе подобия.

Типы исследований в аэродинамике. Таким образом аэродинамика естественно разделяется на две части: теоретическую и экспериментальную.

Теоретическая аэродинамика изучает лишь модели явлений и стремится получить возможно большее число заключений из возможно малого числа основных фактов, положенных в основу модели. Опытные факты нужны, главным образом, для создания моделей явлений, — все же дальнейшее исследование она ведет математическим путем.

Экспериментальная аэродинамика изучает самое явление так, как оно происходит в действительности. Теорией она пользуется постольку, поскольку последняя позволяет уточнить опыт, и указывает на способы перенесения результатов опыта на более широкий круг явлений, чем тот, какой был в самом опыте.

Так как обе эти науки являются, в сущности, лишь двумя сторонами одной общей науки — аэродинамики, то их развитие возможно лишь при самой тесной взаимной увязке.

Мы здесь не можем останавливаться подробно на методах организации исследований, применяемых в аэродинамике, как вследствие обширности этой темы, так и потому, что рациональное ознакомление с ними возможно лишь при внимательном изучении отдельных исследований крупных специалистов.

Отметим лишь, что при экспериментальных исследованиях весьма часто задаются очень скромными намерениями, а именно: стараются в уже известном явлении уточнить его числовые характеристики для какого-либо частного случая. Такие опыты носят название контрольных или промышленных и имеют огромное значение для развития техники.

Большинство технических изысканий и заключается в том, что, производя контрольные опыты над рядом выбранных вариантов исследуемого аппарата или его деталей, выбирают те варианты, какие дают наилучшие результаты. При этом обычно, прибегают к анализу явления, т. е. расчленяют его на простейшие и изучают сперва отдельно эти простейшие явления. Например, изучая крылья, сначала варьируют кривизну их профиля, оставляя толщину неизменной, и подмечают получающиеся при этом зависимости. Затем изучают влияние толщины при неизменной кривизне и, наконец, производят синтез, т. е. комбинируя зависимости, найденные для толщины и кривизны, пытаются найти наилучшее крыло и т. п.

После изложенного становится ясной задача нашего курса экспериментальной аэродинамики. Курс должен знакомить слушателя с основными фактами, добытыми наблюдением и опытом, указывать на методы наблюдений и давать их критическую оценку и, наконец, излагать теории, которыми необходимо пользоваться при постановке опытов и использовании опытного материала на практике.

Глава I

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВОЗДУХА

§ 1. АТМОСФЕРА

Воздух образует газовую оболочку, покрывающую весь земной шар слоем в несколько сот километров. Эта оболочка называется атмосферой земли. Верхняя ее граница не может быть определена достаточно точно, так как на ней совершается плавный переход к междупланетной пустоте. Если считать верхним пределом атмосферы ту высоту, на которой загораются метеориты, то она достигает 200—300 км; северные сияния наблюдаются на еще больших высотах, в среднем 300 км, а отдельные — до 750 км.

Современная авиация по ряду причин стремится овладеть возможно большими высотами полета.

Главнейшей особенностью полета на очень больших высотах является возможность получить там весьма большие скорости. Ряд исследователей доказал, что на высоте около 20 000 м можно достигнуть скоростей порядка 1200—1800 км/час, что на малых высотах совершенно недостижимо для современной авиации.

Получается это вследствие уменьшения сопротивления воздуха в разреженном пространстве. Однако при таких больших скоростях начинает очень резко сказываться сжимаемость воздуха, и характер обтекания самолета потоком воздуха делается уже совсем другим, чем при малых скоростях. Мы в нашем курсе уделим этим вопросам большое внимание и будем неоднократно возвращаться к ним в соответствующих местах.

На больших высотах воздух крайне разрежен, и лишь на сравнительно малых высотах он обладает достаточной для жизни человека плотностью. Для полета на больших высотах приходится устраивать на самолетах закрытые кабины или одевать на летчиков так называемые скафандры, т. е. герметические костюмы с искусственной атмосферой. При сравнительно малых высотах можно летать, примешивая к разреженному на высоте воздуху кислород из особых баллонов. Большие затруднения возникают и в работе двигателя на больших высотах. Тем не менее высотные полеты дают так много выгод как для военной, так и для гражданской авиации, что работа над

этой проблемой с каждым годом все более и более углубляется во всех главнейших странах.

Тропосфера. Нижние слои атмосферы, примерно до 11 км, образуют так называемую тропосферу. В этих слоях вследствие близости земли происходит весьма энергичное вертикальное перемешивание слоев воздуха. Земля действует на тропосферу и своим рельефом и тепловыми воздействиями. В тропосфере все время дуют ветры, образуются облака, выпадают осадки. В ней постоянно изменяются давление, температура и влажность.

В общем наблюдаются следующие закономерности: среднее годовичное давление сильно уменьшается с высотой. Уменьшается с высотой также и средняя годовая температура.

Верхней границей тропосферы считают ту высоту, начиная с которой температура перестает понижаться. Эта граница вообще непостоянна и зависит от широты места и времени года. Средняя годовая высота тропосферы изменяется с изменением широты места довольно сильно, — от 8 км на полюсе и до 17 км на экваторе. В среднем для наших широт принято считать ее равной 11 км.

Стратосфера. Слои воздуха, лежащие выше тропосферы, образуют стратосферу. В стратосфере почти нет вертикального перемешивания слоев. Ветры обладают там большим постоянством. Облаков и туманов в ней не бывает. Температура в стратосфере почти постоянная, и может быть принята в среднем равной минус 56,5°.

В настоящее время удалось изучить стратосферу лишь до сравнительно малых высот с помощью шаров-зондов, поднимающих с собой самопишущие метеорологические приборы, или, как это делается в СССР, с помощью радиозондов проф. Молчанова, автоматически передающих показания приборов по радио на землю. В общем этими методами удалось изучить слой воздуха до 20 км толщиной: отдельные шары-зонды поднимались до высоты 37 км. Наибольшая высота, достигнутая человеком, равна 22 км (США, полет стратостата „Эксплорер II“).

Верхние слои атмосферы, следовательно, почти не изучены, и заключения об их свойствах делаются обычно или на основании теоретических предположений или на основании косвенных соображений, например, по яркости сумерек и т. п. Поэтому разные исследователи дают весьма различные заключения о состоянии атмосферы на больших высотах. В частности, до сих пор еще не выяснен химический состав воздуха в стратосфере.

Состав воздуха. В тропосфере состав воздуха вследствие постоянного перемешивания весьма однороден. Для сухого воздуха получается состав (в объемных процентах):

азота (N ₂)	78,03	аргона (Ar)	0,94	неона (Ne)	0,0012
кислорода (O ₂)	20,99	углекислоты (CO ₂)	0,03	гелия (He)	0,0004

Кроме того, в воздухе содержится незначительное количество (следы) криптона и ксенона.