

## ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

К истории гидродинамики:  
научные школы России XX века

С.К. Бетяев

*Рассмотрена история проектирования аэродинамических труб, изолированного крыла, а также история проектирования летательных и нелетательных аппаратов. Проанализированы как те замечательные аэродинамические идеи, которые удалось внедрить в практику, так и те, не менее замечательные идеи, которые — пока! — остались невостребованными. История теоретической гидродинамики в России представлена как история четырех научных школ: Жуковского, Фридмана, Колмогорова и ЦАГИ.*

PACS numbers: 01.65. + g, 47.10. + b, 47.85.Gj

## Содержание

1. Введение (419).
  2. Аэродинамическое проектирование (422).
    - 2.1. Аэродинамические трубы. 2.2. Оптимизация формы крыла.
    - 2.3. Летательные и нелетательные аппараты. 2.4. Аэроупругость.
  3. Гидродинамика в России (429).
    - 3.1. Праистория. 3.2. Школа Жуковского. 3.3. Школа Фридмана.
    - 3.4. Школа Колмогорова. 3.5. ... и другие.
  4. Школа ЦАГИ (435).
    - 4.1. Б.Н. Юрьев. 4.2. А.К. Мартынов. 4.3. С.А. Христианович.
    - 4.4. Ф.И. Франкль. 4.5. В.В. Струминский. 4.6. Г.Л. Гродзовский.
    - 4.7. А.А. Никольский.
  5. Заключение (445).
- Список литературы (445).

*Боги людям открыли не все.  
В поиск пустившись,  
Люди сами познали немало.*  
Ксенофан

## 1. Введение

На большинство злободневных вопросов о будущем наук, народов и человечества научный прогноз не в состоянии дать ответ [1–4]. Но это не означает, что эти вопросы не надо ставить. Прогноз будущего физики и, в частности, гидродинамики<sup>1</sup> всегда актуален.

За последний век считавшаяся образцом полностью завершенной области знаний механика претерпела глубокие изменения [5]. Постепенно выявлялись все новые

удивительные свойства эволюции динамических систем и определяющая роль таких дихотомий, как устойчивость – неустойчивость, случайность – закономерность, детерминизм – неопределенность, линейность – нелинейность, регулярность – сингулярность, непрерывность – дискретность, симметрия – асимметрия, эволюция – революция, обратимость – необратимость, коллапс – взрыв, слоистость – однородность. Наука — это птица-тройка: Росинант (романтика), Пегас (вдохновение) и Буцефал (война).

Сейчас уже можно говорить о становлении новой науки — синергетики, объединяющей различные разделы естествознания от астрономии до биологии и во многом опирающейся на гидродинамику [6]. Без гидродинамики немислимы современные технологии, невозможно развитие транспорта, энергетики, металлургии, таких наук, как астрофизика, биология, океанография, метеорология. Давно на слуху такие названия: магнитная гидродинамика, геологическая гидродинамика, медицинская гидродинамика [7]. Гидродинамические модели применяются в самых на первый взгляд неожиданных областях: классической нерелятивистской космологии [8], физиологии человека и животных [9], уфологии [10]. К вопросу моделирования любого нового явления, будь то строение атома или Большой Взрыв, часто примеряют "механический кафтан". Мы уже многое знаем об устройстве атома и Вселенной, но до сих пор не можем, исходя из первых принципов физики, расчи-

С.К. Бетяев, Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ),  
140180 Жуковский-3, Московская обл., Российская Федерация  
Тел. (095) 556-43-88

Статья поступила 4 декабря 2002 г.

<sup>1</sup> В англоязычных странах вместо названия "гидродинамика" (*динамика воды*) используют более объемлющее словосочетание — "динамика жидкости". У нас корень *гидро-* не звучит как *вода*, не режет слух, поэтому прижилось односложное название — гидродинамика.

Газовая динамика — раздел гидродинамики, посвященный изучению влияния сжимаемости среды. Аэродинамика — раздел гидродинамики, посвященный обтеканию тел воздухом и имеющий поэтому авиационные приложения. Механика сплошных сред объединяет гидродинамику и теорию упругости.

тать расход воды в канале, подъемную силу самолета, сопротивление ракеты и автомобиля.

В соответствии с принятой десятичной системой счисления в начале каждого века, — а особенно тысячелетия! — итожатся результаты развития культуры, науки, техники; оживляют свою деятельность философы и историки; анализируется прошлое, даются прогнозы, ставятся задачи на будущее [7]. "Тот, кто копается в глубоких шахтах знания, должен, как и всякий землекоп, время от времени подниматься на поверхность подышать чистым воздухом. В один из таких промежутков я и пишу вам..." (И. Ньютон)

История — это память о прошлом. Только человеку, владеющему прошлым, принадлежит будущее. Все новое прочно связано с прошлым, в котором оно зарождалось, в которое уходят его корни, из которого мы познаем настоящее и которым подпитываем национальный иммунитет. Без отбора полезных для общества традиций невозможно не только развитие, но и существование цивилизаций. "Идти вперед, — говорил М.М. Бахтин, — может только память, а не забвение".

Поскольку история — немарковский процесс, без нее нельзя понять настоящее. В зеркале истории мы ищем ответы на самые сокровенные вопросы: во имя чего живем, к чему принадлежим, какое занимаем место на оси исторического времени. Как считал Ф. Тютчев, "нет ничего более человеческого в человеке, чем потребность связывать прошлое с настоящим".

История — это не только память, но и прогнозирование. Если память о предках — нравственная категория, то прогноз — конкретная количественная категория, фиксирующая соотношение исторически неизбежного и исторически случайного. История наук призвана не только выискивать Великие открытия и новые проблемы, но и давать ключ к их решению, обогащая человечество опытом накопленных ошибок и достижений. Именно в этом заключается ее пророческое назначение. Изучать науку в отрыве от ее истории нельзя. История — это мост из прошлого через настоящее в будущее, выбор оптимального пути, механизм передачи опыта по цепи поколений, отбор ценностей. Вот как об этом сказал Б. Пастернак:

Однажды Гегель ненароком  
И, вероятно, наугад  
Назвал историка пророком,  
Предсказывающим назад.

Неправильно считать, что проблемы существуют только в тех разделах физики, где масштабы явления предельно малы или предельно велики. Они существуют и там, где масштаб явления привычен для нашего восприятия, где действуют законы классической механики — части физики, состоящей из теоретической механики, теории упругости и гидродинамики. Гидродинамика — наука во многом интуитивная, незавершенная. Истины в последней инстанции не существует: каждую проблему можно расширить и углубить. И этот путь поисков с успехами и неудачами представляет увлекательное зрелище, тогда как от готового и устоявшегося веет холодом и скукой. Перефразируя высказывание великого математика Д. Гильберта о физике, которая "слишком трудна для физиков", следует отметить, что гидродинамика слишком трудна для гидро-

намиков. Она сплетена с математикой в плотный клубок.

В последнее время ряды ученых-исследователей (вычислителей, экспериментаторов, теоретиков<sup>2</sup>) потеснили ученые-мировоззренцы (философы, историки, популяризаторы). Вместо однобокого материалистического подхода внедряется композитный анализ, примиряющий духовное и материалистическое начала [11, 12].

Будущее имеет много виртуальных сценариев, а прошлое — лишь одну траекторию, обозначающую уже свершившееся действие (рис. 1). Однако в истории эта единственная траектория подвергается отнюдь не единственному толкованию. Известно, что история не однолика, универсальной истории не бывает, исходный фактический материал можно компоновать и трактовать различными способами. Не относясь к точным наукам, история во многом основана на источниках, подлинность или хотя бы объективность которых доказать невозможно. Легенды смешаны с былью, документы искажены, фальсифицированы в угоду государственному заказу и правителям-себялюбцам, мемуары видных деятелей перенасыщены узко личным восприятием действительности. История сервильна, мифологизирована. Политической историей называют ее временное, *неотстоявшееся* состояние. Справедливо считается, что историй столько, сколько историков. Как говорил Ю. Трифонов: "История полыхает, как громадный костер, и каждый из нас бросает в него свой хворост". Возможно ли создание объективной истории наук? На каких принципах она должна базироваться?

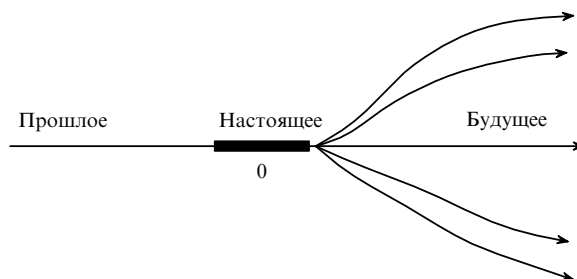


Рис. 1. Связь между прошлым и будущим.

Сделать историю народов и государств объективной — об этом мечтали историки всех времен и народов, начиная от знаменитых семи мудрецов. Древнегреческий историк Полибий ратовал за создание "рациональной истории". Древнеримский историк Тацит считал, что пишет "sine ira et studio", т.е. "без гнева и пристрастия". Несмотря на развитие герменевтики (учения о "понимании" текстов и о вычлениении из них истины), такая мечта до сих пор остается неосуществленной [13, 14]. Sine studio... Совсем как у Ф. Искандера: "Что же такое история? Ничего. Реке все равно, что на ней ставят: бойню или мельницу".

<sup>2</sup> По установившемуся научному сленгу вычислителей называют *клавишниками*, экспериментаторов — *трубачами*, а теоретики делятся на *классиков* — тех, кто изучает уравнения математической физики, *эпсилонистов* — тех, кто использует методы асимптотических разложений, *солитонистов* — тех, кто занимается нелинейной механикой, и *хаотистов* — тех, кто исследует турбулентность.

По-другому обстоит дело с историей наук. Имея более определенную хронологию и базируясь на более объективном материале, она принципиально отличается от истории государств. Внедрение клиометрических методов [15] делает ее более объективной, основанной на количественных соотношениях, снимает вуаль идеологии, гипноза школ и личностей.

В соответствии с установками выдающегося английского ученого Дж. Тойнби [16] каждый историк прежде всего должен обозначить *поле исследований* и выбрать *метод исторического анализа*. Иначе история в лучшем случае станет простым перечислением фактов и памятных событий, а в худшем случае — формой манипуляции сознанием [17]. Вот как об этом говорит выдающийся физик Х. Юкава [18]: "Полагаю, что подходить к прошлому лишь как к набору свершившихся фактов было бы крайне неумно".

В качестве *поля исследования* выберем как теоретическую, так и прикладную гидродинамику. К последней относится аэродинамическое проектирование. Теоретическая наука не имеет четкого разграничения с прикладной наукой. Первая — это поиск законов природы, уровень идей, вторая — это внедрение идей в практику, уровень ноу-хау. Прикладники скорее используют научные достижения, чем создают их; они ближе к технике, чем к науке.

Метод отбора выдающихся ученых, школ и открытий опирается на использование *индекса цитирования*. Индекс цитирования отличает ученого, занимающегося фундаментальными и теоретическими исследованиями, от ученого-прикладника. Ученые, имеющие индекс цитирования, составляют *майнстрим науки*.

В 1970-х годах, когда в связи с повальной компьютеризацией выкристаллизовалась идея о всеобщем "оцифировании" всех и вся, стало ясно, что чуть ли не единственной мерой полезности публикации является ее цитирование: чем чаще цитируется работа, тем весомее ее вклад в развитие науки, тем выше творческая активность автора. Ссылки на литературу отражают дань уважения автора к своим коллегам и его научную добросовестность. Традиция открыто ссылаться на работы предшественников возникла в середине XIX века. С 1966 года Институт научной информации им. Гарфилда в Филадельфии (США), его основателя, издает толстые тома "Science Citation Index", т.е. "Указателя научного цитирования".

Наблюдение за цитированием научных работ позволяет проследить за динамикой идей, их проникновением в смежные области, обнаружить симптомы научных революций. Цитирование образует цепь, связывающую все работы в единую сеть, где каждая статья является дополнением к предыдущим и, в свою очередь, либо замыкает данную ветвь на древе познания, либо дает на нем другие побеги.

Индексы цитирования — скорее необходимость, чем достоверность. Это всего лишь грубая мера признания и полезности научной статьи. Разумеется, идеальных рейтингов ученых не бывает. Однако в условиях глобализации экономик и культур количественные оценки игры теннисистов, деятельности артистов и ученых необходимы. Ни должность, ни звание, ни степень не являются объективными критериями учености [19]. Известно, что нельзя применять индекс цитирования для материального поощрения действующих ученых,

однако его естественно использовать для исторического анализа<sup>3</sup>. Разумеется, метод использования индекса цитирования не является абсолютным хотя бы потому, что созданная на этой основе история наук подвержена временным изменениям. Ничего не поделаешь — исторические оценки зависят от *исторического времени*, от того, "какое у нас тысячелетие на дворе".

Несмотря на применение клиометрии, элементы субъективности в истории наук всегда остаются. Историю пишут люди, и они вольно или невольно привносят "аромат эпохи". Хорошо об этом сказал выдающийся русский художник М.В. Нестеров: "Историки Карамзин, Костомаров, Ключевский потому только ярко сияют в исторической науке, что они в высшей степени субъективны".

Следует оговориться, что выбор индекса цитирования в качестве рейтинга совсем не оправдан для оценки деятельности ученого-прикладника. В этом случае пришлось вернуться к подсчету числа статей ученого. Не всех статей, а лишь тех, которые опубликованы в журналах с достаточно высоким собственным рейтингом, называемым *импакт-фактором*. Распределение таких статей по годам — *индекс публикаций* — дает представление о динамике творческой активности ученого-прикладника или инженера. Разумеется, использование индекса публикаций ограничено секретностью. Ученый, занимающийся секретными работами, на какое-то время лишается открытых публикаций, а значит, и цитирования; к нему обсуждаемый критерий не применим.

Деятельность изобретателей оценивается по числу патентов.

Наконец, есть ученые, которые имеют наивысшую и наиболее устойчивую форму признания. Нет, это не только нобелевские лауреаты! Это — классики естествознания, те, чьи имена присвоены законам, эффектам, теоремам, реакциям, уравнениям и т.д.

Таким образом, в науковедении имеется мера — числовая оценка деятельности ученых, научных школ, институтов. При таком подходе сразу же выявляется исключительная роль английских ученых в развитии гидродинамики. Не следует забывать, что в прошлом Англия была великой морской державой и родиной первой промышленной революции. В скобках отметим также, что другая страна — Япония — внесла неопенимый вклад в живопись [20]. Особенности развития Англии и Японии во многом обусловлены их островным положением и вытекающей отсюда относительной изолированностью, консервативностью, а следовательно, и автохтонной культурой. Вот имена выдающихся английских ученых, вошедшие в учебники по гидродинамике: Дж. Стокс, Дж. Рэлей, Г. Ламб, О. Рейнольдс, У. Кельвин, Дж. С. Рассел, У. Фруд, Ф. Вейнхэм, Р. Митчелл, Л. Розенхед, Дж. Тейлор, Х. Гольдштейн, К. Стюартсон, Ф. Ланчестер, К.В. Манглер, Дж. Лайтхилл, Дж. Бэтчелор, Г. Моффат, Ф.Т. Смит. Дабы не ослепить читателя блеском имен, сюда не включены основоположники "всего" естествознания У. Оккам, Ф. Бэкон, И. Барроу, Р. Гук, И. Ньютон.

<sup>3</sup> На Западе индекс цитирования неофициально, но широко используется. В России этому мешает научная номенклатура, не имеющая индекса цитирования и поэтому ревностно относящаяся к его применению. Конечно, наука — это не спорт. Правильно использовать индекс цитирования еще предстоит научиться.

О каждом из перечисленных английских ученых написаны книги. Ограничимся лишь напоминаниями о двух из них. Сэр Джеффри Ингрэм Тейлор (1886–1972) — внук Дж. Буля, одного из основоположников математической логики, сын известного английского художника Э. Тейлора, племянник Э. Войнич, автора широко известного везде, а особенно в СССР, романа "Овод". Тейлору принадлежат важные результаты в области метеорологии, математики, статистической теории турбулентности, теории вращающихся жидкостей, гидродинамической устойчивости и экспериментальной гидродинамики [21, 22]. Он состоял членом и Королевского научного общества, и Академии наук СССР.

Дж. Лайтхилл (1924–1998) получил титул сэра за разработку акустики, теории волн, теории пограничного слоя, теории течения ньютоновской жидкости, биомеханики. Его избранные научные труды изданы в виде четырехтомника [23].

Ученые изучают *объективно* существующие законы природы. Если бы не было ни Аристотеля, ни Ньютона, кто-либо другой рано или поздно непременно сделал те же открытия. В искусстве же создаются произведения, *субъективные* по своей природе. Если бы не было ни Баха, ни Достоевского, то никто бы их не заменил. Личностный вклад в искусстве проявляется рельефнее, чем в науке. Художник не открывает, а создает субъективную истину; ученый не создает, а открывает объективную истину.

## 2. Аэродинамическое проектирование

История не является точной наукой. Определив тему, историк из базы данных — множества противоречивых фактов — выделяет подмножество, самосогласованное с его исторической моделью (версией). Не всегда удается обосновать теорию с помощью клиометрических методов, поэтому история неоднозначна: каждая версия в ее квазициклической эволюции образует лишь более структурированный новый факт в новой базе данных. И так до бесконечности. Сходится ли такой процесс к истине? Об этом говорить не принято...

Подобно астрономии, которая разделилась на классическую описательную астрономию и астрофизику, история (по Л.Н. Гумилеву) подразделяется на дескриптивную (описательную) и прескриптивную (инструментальную). Дескриптивная история — это собрание событий и фактов, правдивых и неправдивых. Сюда можно отнести мемуары, воспоминания, архивные документы и пр. (Н.М. Карамзин, А.С. Пушкин, В.О. Ключевский). В рамках прескриптивной истории выдвигаются и изучаются версии, объясняются природа и причины событий, их логические связи (Дж. Тойнби, Л.Н. Гумилев, А.Т. Фоменко). Методологической основой прескриптивной истории является герменевтика.

История наук — это тоже наука. Исследование историка в этой области состоит из нескольких этапов. Прежде всего — поиск документов. Затем их изучение на основе той же герменевтики, т.е. отделение вымысла от истины с помощью так называемого контент-анализа. Наконец, инсайт, описание событий и выявление закономерностей и тенденций.

В этом году исполняется 100 лет авиации, днем рождения которой принято считать день первого полета аэроплана братьев Райт. Аэродинамическое проектирование как техническая наука зародилась гораздо раньше.

Ее история более субъективна, чем история аэродинамики. Она помогает понять законы внедрения открытий, проследить судьбу идей, обозначить неиспользованные возможности, связать теорию с практикой. Почему та или иная идея не реализована на практике? Среди возможных экономических, технологических, эксплуатационных и прочих причин нельзя исключить ни лень, ни некомпетентность создателей образцов новой техники.

В истории аэродинамического проектирования следует выделить три раздела: история проектирования аэродинамических труб, история проектирования изолированных крыльев и история проектирования аппаратов в целом.

### 2.1. Аэродинамические трубы

Первую в мире аэродинамическую трубу построил в 1871 году английский инженер-строитель Ф. Вейнхэм (1824–1908), член-учредитель Общества по авиации Великобритании. Для этого он приладил цилиндрический кожух к большой воздуходувной машине на заводе Пенна в Гринвиче. В ней продувались плоские пластины под разными углами атаки, а также модели самолетов.

В том же 1871 году баллистическую установку построил петербуржец капитан В.А. Пашкевич. Она содержала все основные элементы современных аэродинамических труб: коллектор, рабочую часть, диффузор и даже весы. Однако эта установка использовалась для исследования сопротивления снарядов, а не самолетов или дирижаблей.

Большое значение аэродинамическим испытаниям моделей летательных аппаратов придавал Д.И. Менделеев. В его записной книжке за 1876 год, хранящейся в архиве музея великого химика при Петербургском государственном университете, нарисован эскиз аэродинамической трубы с закрытой рабочей частью. В своей программной статье "О сопротивлении жидкостей и воздухоплавании" (1881) Менделеев отмечал несостоятельность попыток решить вопрос о сопротивлении среды чисто теоретическим путем без методичных экспериментальных исследований. Его мысли актуальны и в наше время: "Недостаточность опытных данных о сопротивлении среды для полного решения задачи воздухоплавания, однако, столь очевидна, что я считал невозможным умолчать о неизбежной необходимости новых точных опытов, об их целях, о необходимых приемах и о средствах, для выполнения их нужных. Этим недостатком точных опытных данных о сопротивлении среды объясняется в одно и то же время причина слабого развития как общей теории сопротивления среды, так и практики воздухоплавания".

В 1883 году аэродинамическую трубу оригинальной конструкции построил русский инженер С.С. Неждановский. В ней модели обдувались не воздухом, а потоком газов, который создавался в генераторе при сгорании пороха.

Первую в России аэродинамическую трубу, в которой были проведены систематические исследования обтекания тел (весовые испытания), построил К.Э. Циолковский.

Жизнь Циолковского являет собой удивительный пример самобытности. Он не кончал высших учебных заведений — в XIX в., на заре развития точных наук, было много ученых, не имевших высшего образования. "Учителей, — признавался Циолковский, — у меня

совсем не было, а потому мне приходилось больше создавать и творить, чем воспринимать и усваивать. Указаний, помощи ниоткуда не было, непонятого в книгах много, а разъяснять приходилось все самому. Одним словом, творческий элемент, элемент саморазвития, самобытности преобладал. Я, так сказать, всю жизнь учился мыслить, преодолевать трудности, решать вопросы и задачи. Многие науки создавались мной, за неимением книг и учителей, прямо самостоятельно". Создание наук — это, мягко говоря, преувеличение. Циолковский не владел основами точных наук, поэтому удивительно, как богатство фантазии и стремление к творчеству в сочетании с логической последовательностью привели к крупным достижениям!

Первую аэродинамическую трубу Циолковский соорудил в 1897 году. Вторую, более совершенную, увеличенную в 2 раза — в 1899 году после получения от Академии наук пособия в сумме 470 рублей. По современной терминологии это была аэродинамическая труба с открытой рабочей частью, а по терминологии Циолковского — воздуходувка (рис. 2). В качестве вентилятора использовалась лопастная воздуходувная машина типа веялки. Для создания равномерного поля скорости применялась спрямляющая поток решетка — хонейкомб. Кроме того Циолковский создал вполне удовлетворительные по точности измерений аэродинамические весы.

Какова научная ценность его опытов по определению сопротивления воздуха для различных тел, их значимость для развития гидродинамики? Для ответа на этот вопрос представим результаты его опытов в безразмерном виде. Из испытанных им моделей, порой таких экзотических, как икосаэдр, выберем прямые круглые цилиндры, оси которых устанавливались перпендикулярно направлению скорости невозмущенного потока  $u_\infty$ . Здесь и далее нижним индексом  $\infty$  обозначены невозмущенные величины.

Циолковский не был знаком с теорией подобия, поэтому в его таблицах зависимость силы сопротивления представлялась функцией двух переменных:  $u_\infty$  и диаметра цилиндра  $d$ . На рисунке 3 эта зависимость перестроена в виде функции одной переменной  $c_x = c_x(\text{Re})$ , где число Рейнольдса  $\text{Re} = u_\infty d / \nu$ ,  $\nu$  —

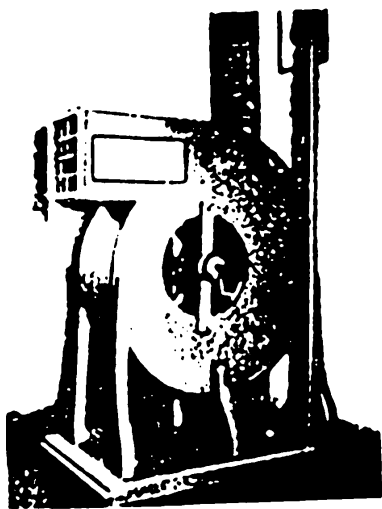


Рис. 2. Воздуходувка Циолковского.

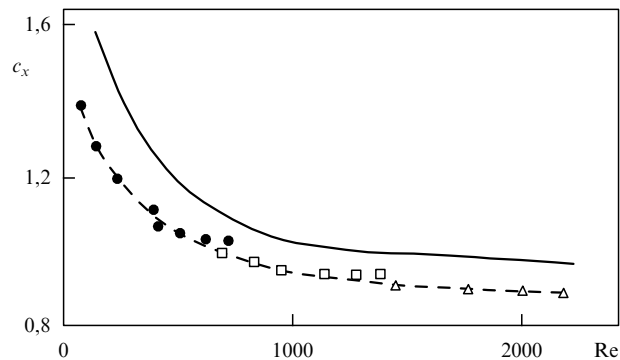


Рис. 3. Зависимость  $c_x$  от  $\text{Re}$ :  $\bullet$  —  $u_\infty = 1 \text{ м с}^{-1}$ ,  $\square$  —  $u_\infty = 2 \text{ м с}^{-1}$ ,  $\triangle$  —  $u_\infty = 3 \text{ м с}^{-1}$ .

коэффициент кинематической вязкости. Сплошной линией показана эталонная кривая. Максимальное отклонение кривой Циолковского (штриховая линия) от эталонной составляет 18%. В период рождения авиации и дирижаблестроения такая точность могла быть приемлемой, однако скорость потока (число  $\text{Re}$ ) была явно мала.

В то время, когда Циолковский экспериментировал в своей воздуходувке, аэродинамические трубы создавались в других странах. В Англии трубу строит знаменитый изобретатель пулемета Х. Максим (1840–1916), во Франции — известный аэродинамик Ш. Ришар (1847–1905), в США — видный астроном С. Лэнгли (1834–1906). В России экспериментальная база по аэродинамике создавалась Н.Е. Жуковским: 1902 г. — Московский университет, 1904 г. — Кучино, родовое имение выдающихся российских деятелей Рябушинских, 1910 г. — Московское высшее техническое училище, 1918 г. — Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ). Россия гордилась достойно встретить век авиации [24–26].

По-видимому, впервые сверхзвуковая скорость направленного потока была достигнута в сопле высокооборотной паровой турбины, построенной шведским инженером К.Г.П. де Лавалем<sup>4</sup> в 1889 году. К тому времени ударные волны были открыты "на кончике пера" великим немецким математиком Б. Риманом (1860), а сфотографированы великим австрийским механиком Э. Махом (1887). Поэтому странным кажется относящееся к 1910 г. высказывание С.А. Чаплыгина [27]: "...отвлекаться от сжимаемости воздуха законно только до тех пор, пока скорость нигде в потоке не достигнет скорости звука, так как при нарушении этого условия *установившееся движение перестает быть возможным*" (курсив мой — С.Б.).

Этапным достижением в создании околосвуковых установок стало внедрение перфорации — пронизываемых стенок рабочей части трубы. Они применяются в аэродинамических трубах для того, чтобы уменьшить влияние границ потока на обтекание модели, особенно существенное при околосвуковых скоростях. Внедрение перфорации началось в ЦАГИ в 1946 году, первая труба с перфорированной рабочей частью заработала уже в 1947 году. По этому поводу следует сделать следующее замечание. К российским работам, проделанным в

<sup>4</sup> Лаваль известен еще как первый изобретатель сливкоотделителя.

1945–1947 гг., следует относиться с учетом так называемого *немецкого следа*.

В 1945 году из Германии в Россию экспортировали в качестве репарации многотонную научно-техническую документацию [28]. Кроме того, вывезли 3,5 тысячи инженеров, среди которых оказалось 2,8 тысячи (!) специалистов по авиастроению. Последних заставили писать обзоры по своей тематике и участвовать в подготовке наших авиастроителей. Не секрет, что в то время наша наука отставала от зарубежной<sup>5</sup> и наши ученые активно использовали немецкие разработки в аэрогидродинамике. Это и был *немецкий след*.

## 2.2. Оптимизация формы крыла

Крыло — самый важный аэродинамический элемент самолета. Вся история эволюции крыла, все идеи, направленные на его аэродинамическое совершенствование, — это лишь попытки интуитивного решения вариационной задачи об оптимальном крыле. Численные<sup>6</sup> и экспериментальные решения этой задачи нельзя пока считать ни достаточно строгими, ни удовлетворительными для нужд практики. В общем случае нетрудно выписать уравнения и выбрать функционалом минимум летучести (аэродинамического качества) или силы сопротивления, однако "нащупать" главное приближение и последовательно улучшать его с помощью направленных итераций не удается. Вариационные задачи в аэродинамике удовлетворительно решаются лишь в рамках модели невязкой жидкости, когда допустима линеаризация задачи [29].

До сих пор неудовлетворительно рассчитываются отрывные течения и совсем плохо — турбулентные. Теория турбулентности пока не создана, и дело осложняется тем, что в вычислительной гидродинамике существует так называемое *проклятье "закона 9/4"*: число узлов сетки при решении прямой трехмерной задачи о турбулентном течении жидкости должно быть порядка  $O(Re^{9/4})$ . Это обстоятельство делает невозможным численный расчет летательного аппарата на современных персональных компьютерах. Следует согласиться с высказыванием известного аэродинамика Д. Кюхемана [30]: "Несмотря на современные успехи численных методов, проектирование крыла остается больше искусством, чем точной наукой, как и было всегда (. . .), до сих пор нет рациональных и полных методов расчета, и проектирование самолета не лишено риска, часто сопряженного с большими расходами во всех смыслах вследствие того, что некоторые существенные в полете характеристики нельзя никак рассчитать, измерить или предсказать".

Есть еще одно проклятье в теории турбулентности — *проклятье фрактальной размерности*. Турбулентное течение фрактально по своей природе, а мы еще не умеем обращаться с фрактальными объектами.

Решение вариационной задачи об аэродинамически идеальной форме летательного аппарата  $F(x, y, z; M_\infty,$

$Re) = 0$  пока нельзя получить теоретически. Авиаинженеры находят его с помощью интуиции и промышленного эксперимента. Таким же образом решается задача об оптимизации формы крыла — наиболее важного аэродинамического элемента летательного аппарата. Если крыло имеет большое удлинение, то задача существенно упрощается, так как сводится к оптимизации формы крылового профиля, заданной в виде  $f(x, y; M_\infty, Re) = 0$ .

**Ламинаризированные профили.** При околосзвуковых значениях числа  $M_\infty$  следует избегать появления скачков уплотнения и вызванного ими волнового сопротивления. Если полет происходит в несжимаемой жидкости ( $M_\infty \ll 1$ ), то остается два физических явления, с которыми приходится считаться авиаинженеру: турбулизация пограничного слоя и отрыв потока от крыла. Напряжение трения в ламинарном потоке гораздо меньше, чем в турбулентном. Поэтому выгодно ламинарный участок на профиле крыла сделать как можно большим по протяженности, т.е. затянуть переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный. Оказалось, что решить такую задачу в значительной мере можно за счет выбора формы профиля  $f = 0$ . Такой профиль называется *ламинаризованным*. Его отличительной особенностью является смещенное к задней кромке положение максимальной толщины профиля и его вогнутости, что обеспечивает быстрое убывание давления на ламинарном участке течения и почти постоянное значение на остальном участке. Такая форма приводит к отрицательному градиенту давления на большей части крыла, что повышает устойчивость течения.

Резкое повышение давления в кормовой части профиля недопустимо из-за возможного отрыва потока.

Турбулентный пограничный слой, с одной стороны, увеличивает сопротивление крыла, а с другой стороны, препятствует отрыву потока и позволяет достичь большей подъемной силы крыла.

Серию ламинаризованных профилей (серия NACA) с благоприятным градиентом давления на его большей части в 1939 году разработал выдающийся американский инженер И. Джейкобс, сотрудник исследовательской лаборатории им. Лэнгли. Для испытания их в условиях, приближенных к реальным, потребовалось построить специальную аэродинамическую трубу с малой турбулентностью потока. Удалось сохранить ламинарное течение примерно на 70 % хорды и снизить сопротивление крыла в полтора раза.

Аналогичные исследования позже проводились в Англии, Японии и России. Секретность, вызванная соображениями национальной безопасности, мешала международному сотрудничеству.

В настоящее время из ламинаризованных профилей составляются крылья небольших самолетов и, особенно, планеров. На больших самолетах гражданской авиации ламинаризованные крылья не применяются.

Функциональное назначение крыла зависит от режима полета: взлет, крейсерский режим, маневр, посадка. В зависимости от этого функционалами выступают либо подъемная сила, либо летучесть, либо маневренность. Изменять форму крыла в зависимости от режима полета невозможно. Поэтому оптимизация достигается с помощью так называемой *механизации крыла* — комплекса устройств в его передней и задней частях: предкрылков и закрылков. Конструктивно они

<sup>5</sup> Вот характерный анекдот тех времен. Приходит к директору ЦАГИ инженер...

— Я могу увеличить подъемную силу самолета в полтора раза.  
— А за рубежом это изобретение уже внедрено?  
— Нет, нет!  
— Тогда подождем.

<sup>6</sup> При численном решении крыло представляется составленным из конечного числа профилей, а каждый профиль аппроксимируется многопараметрической функцией.

разнообразны: поворотные, выдвижные, щелевые, двухщелевые. Механизация помогает снизить влияние вредных воздействий, улучшить аэродинамические характеристики крыла.

**Эффект скольжения.** Эффект скольжения заключается в том, что: а) продольное течение не зависит от поперечного (принцип автономности), б) течение двумерное, т.е. не зависит от третьей (поперечной) координаты  $z$ . В простейшем случае течения идеальной жидкости скорость вдоль этой координаты постоянна. На рисунке 4а показано скользящее крыло, бесконечное в обе стороны. Именно для такого крыла, равно как и для любого цилиндрического тела, теоретически справедлив эффект скольжения.

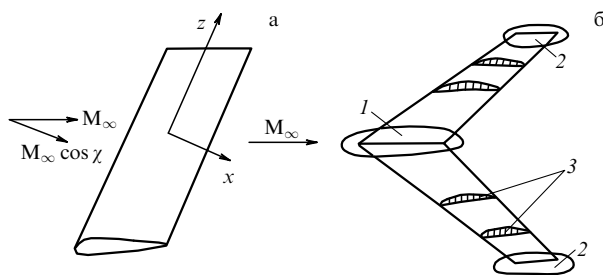


Рис. 4. (а) Скользящее крыло, (б) стреловидное крыло: 1 — зона срединного эффекта, 2 — зона концевго эффекта, 3 — перегородки.

Впервые эффект скольжения был применен для расчета дирижабля [31] М.М. Мунком (1924), учеником Л. Прандтля. А. Бузман, тоже ученик великого Прандтля, обнаружил этот эффект, когда занимался классификацией линейных сверхзвуковых течений идеального газа (1928).

В 1935 году в фашистской Италии, авиация которой была одной из лучших в мире, собрался конгресс по аэродинамике больших скоростей. Из Германии прибыл Прандтль, из Америки — Т. фон Карман. В своем докладе Бузман предложил использовать в сверхзвуковом полете стреловидные крылья [30–33].

Особенность обтекания стреловидного крыла большого удлинения в отличие от скользящего крыла состоит в том, что эффект скольжения несправедлив в области при вершине крыла (1 на рис. 4б) и в области 2 вблизи его боковых кромок.

Как подметил ученик Прандтля А. Бетц (1940), для того чтобы самолет преодолел "звуковой барьер", недостаточно использовать стреловидное крыло, необходимо еще установить на нем принципиально новый двигатель — реактивный. Первым самолетом с реактивным двигателем был немецкий "Хенкель-178" (1939). И уже в 1942 году немецкий самолет Me-163 достиг скорости звука. По-видимому, в этом случае было достигнуто число Маха  $M_{кр} < 1$ , при котором на крыле достигается сверхзвуковая скорость, — и не в горизонтальном, а в пикирующем полете. Утверждения, что впервые в мире скорость звука была достигнута в СССР (Ла-174 в 1948 году [33] или МиГ-17 в 1950 году [35]) сильно преувеличены.

Следует различать четыре рекордных события в истории авиации: достижение  $M_{кр}$  в пикирующем полете, достижение числа Маха  $M_{\infty} = 1$  в пикирующем

полете, достижение  $M_{кр}$  в горизонтальном полете и достижение  $M_{\infty} = 1$  в горизонтальном полете.

Эффект скольжения в идеальном газе является прямым следствием принципа относительности Галилея: физические законы независимы от выбора инерциальной системы координат. Справедлив ли он в вязкой жидкости? Л. Прандтль (1945) и В.В. Струминский<sup>7</sup> (1946) показали, что он справедлив для ламинарного течения [33]. Однако на большей части крыла течение турбулентное. Для такого течения эффект скольжения несправедлив<sup>8</sup>, поэтому на стреловидных крыльях ставят продольные перегородки, заштрихованные на рис. 4б.

**Сверхкритический профиль.** При  $M_{\infty} > M_{кр}$  на верхней поверхности крыла образуется сверхзвуковое включение (Бузман, 1941). Такие смешанные течения экспериментально исследовал Б. Гётерт (1943).

Возможен ли безударный переход от сверхзвукового течения к дозвуковому? Экспериментально доказано, что такой переход возможен, и спроектировано семейство крыловых профилей, на верхней поверхности которых осуществляется изэнтропическое сжатие потока [31].

В 1950-х годах выдающийся авиационный инженер из NASA Р.Т. Уиткомб предложил профиль крыла, имеющий значительно меньшее сопротивление по сравнению с обычным профилем [36]. Такой профиль крыла назвали сверхкритическим, поскольку он позволяет аппарату достигнуть больших скоростей полета, увеличить значение  $M_{кр}$  магистральных самолетов на 0,05–0,15 единиц.

Сверхкритический профиль (сплошная линия на рис. 5) имеет менее выпуклую верхнюю поверхность, чтобы уменьшить разгон сверхзвукового потока, и так называемую подрезку в районе задней кромки, обеспечивающую восстановление подъемной силы. Уиткомб высказал мнение, что сверхзвуковой профиль, имеющий тупой носок, может быть применен и для сверхзвукового полета, когда кромка стреловидного крыла дозвуковая.



Рис. 5. Сверхкритический профиль.

Кроме того Уиткомб предложил использовать фиксированную щель вблизи задней кромки крыла. Проникающая через щель высокоэнтропийная струйка газа ускоряет течение в пограничном слое на верхней поверхности профиля и уменьшает лобовое сопротивление.

Применение сверхкритических профилей в авиации позволило также уменьшить волновой срыв на концах несущего винта вертолета.

**Отсос пограничного слоя.** Отсос жидкости через пронцаемую поверхность был продемонстрирован Прандтлем (1904) в знаменитой статье, где он предложил концепцию пограничного слоя, асимптотическую ( $Re \rightarrow \infty$ ) по своей сути. В дальнейшем эту проблему исследовали Дж. Лайтхилл и Г. Глауэрт [30]. Цель отсоса — затягивание (по оси  $x$ ) либо отрыва потока от крыла, либо ламинарно-турбулентного перехода. Рас-

<sup>7</sup> Ищите немецкий след.

<sup>8</sup> Не знаю почему.

четы показывают, что значительный выигрыш в летучести или в силе сопротивления достигается ценой ничтожных энергетических затрат.

Отсос бывает распределенным по поверхности или щелевым. Выдвинута идея о двухщелевом *перепуске* газа в районе скачка уплотнения, замыкающего сверхзвуковую зону на верхней поверхности профиля, для уменьшения волнового сопротивления при околозвуковых скоростях.

Несмотря на явные преимущества, отсос пограничного слоя до сих пор не применяется в авиационной практике из-за трудностей, возникающих при эксплуатации систем отсоса.

**Биплан Буземана.** На упомянутой выше конференции в Италии по авиации больших скоростей Буземан в качестве экзотического примера рассмотрел обтекание тела, которое в линейном сверхзвуковом потоке имеет теоретически нулевое волновое сопротивление. Его назвали *бипланом Буземана*. Рисунок 6 воспроизводит предложенную Буземаном схему обтекания биплана; сплошными линиями показаны волны сжатия, штриховыми — волны разрежения, объем тела заштрихован. Вихревой след за таким аппаратом отсутствует.

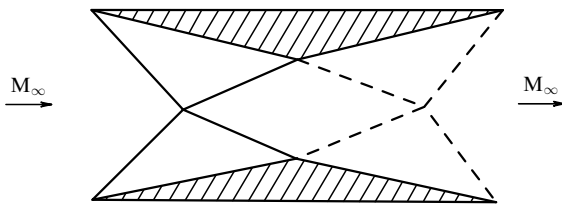


Рис. 6. Биплан Буземана.

Почему изящная идея Буземана до сих пор не реализована? Потому что его аппарат не создает подъемную силу. Кроме того, он рассчитан лишь на движение в крейсерском режиме, т.е. на движение при фиксированном значении числа  $M_\infty$  и при нулевом угле атаки.

**V-образность.** Зачем крылу V-образность? Считается, для придания самолету устойчивости. Однако в настоящее время проблема динамической устойчивости решается другими методами.

Установлено, что отрицательная V-образность крыла повышает подъемную силу за счет увеличения интенсивности сходящих с его боковых кромок вихрей. Для крыла малого удлинения справедлив закон плоских сечений: трехмерное стационарное течение эквивалентно плоскому нестационарному. В соответствии с этим законом обтекание V-образного крыла малого удлинения (рис. 7а) эквивалентно обтеканию уголка (рис. 7б). Оценки показали [37], что максимум подъемной силы  $Y(\chi)$  в этом случае достигается при отрицательных углах раскрытия  $\chi$  (рис. 8), имеет место так называемый *парашютный эффект*.

V-образное крыло — это всего лишь аппроксимация формы оптимального крыла двугранным углом. Строго говоря, вариационная задача об оптимальном крыле должна ставиться в выбранном классе функций  $y = f(z, x)$ , описывающих форму поверхности крыла<sup>9</sup>. На рисунке 7в условно показано поперечное сечение

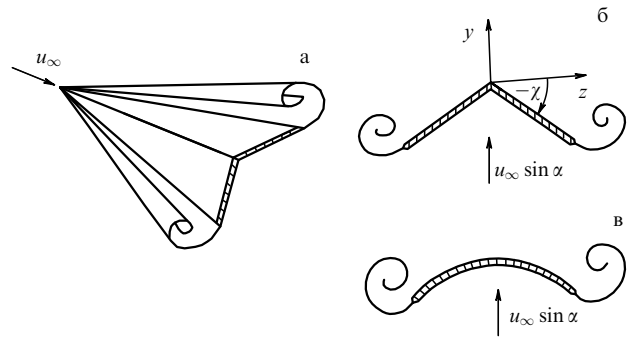


Рис. 7. (а) V-образное крыло малого удлинения, (б) поперечное сечение V-образного крыла малого удлинения, (в) поперечное сечение оптимального крыла.

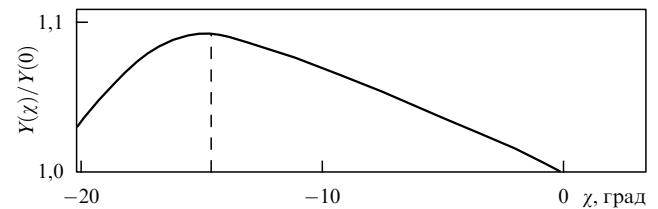


Рис. 8. Зависимость  $Y(\chi)/Y(0)$  от угла раскрытия  $\chi$ .

крыла из класса непрерывных вместе со своими первыми производными функций. Однако выигрыш в подъемной силе не столь велик, чтобы его использовать на практике, усложняя технологию создания самолета.

В авиации внедрены V-образные крылья: для высокопланов, т.е. самолетов, у которых крылья сопрягаются с фюзеляжем выше его срединной поверхности, как правило,  $\chi < 0$ , а для низкопланов —  $\chi > 0$ . Последнее обстоятельство связано с обеспечением безопасности взлета и посадки самолета. Кроме того, конструктор должен учитывать деформацию крыла в полете под действием аэроупругих сил.

### 2.3. Летательные и нелетательные аппараты

Известен знаменитый рисунок Леонардо да Винчи, где изображен прототип воздушного винта вертолета. Ввиду этого Леонардо можно считать автором концепции вертолета как летательного аппарата.

Концепция самолета была разработана гораздо позже. Сначала думали, что человек поднимется в небо подобно птице с помощью машущего крыла. Однако в 1799 году Дж. Кейли отказался от идеи орнитоптера и выдвинул классическую концепцию *безмышечного* летательного аппарата [30]. Она включала все части современного самолета: крыло, фюзеляж, двигатель и поверхности управления. Существует легенда, что один из спроектированных Кейли планеров успешно летал задолго до планера О. Лилиенталя, пионера авиации.

Концепция Кейли сегодня кажется естественной, а на самом деле она имела настолько революционное значение, что именно с ее выдвиганием, а не с полетом братьев Райт следует увязывать рождение авиации. Однако она не осталась единственной. В 1910 году немецкий авиаконструктор и промышленник Г. Юнкерс получает патент на изобретение "самолета, состоящего из одного крыла, в котором размещены все компоненты: двигатели, экипаж, пассажиры, топливо и конструкция". Среди многочис-

<sup>9</sup> Парашют тоже должен иметь оптимальную форму купола.



сленных предложений следует выделить концепцию аэробуса С.Б. Гейтса (1960). Гейтс мечтал о *бесфюзеляжном* дозвуковом самолете широкого употребления как доступного для каждого средства передвижения. Хотя слово "аэробус" сегодня стало обыденным, радикальные идеи Гейтса еще нуждаются в развитии и во внедрении в авиационную практику.

Задача об оптимальном самолете на порядок сложнее, чем задача об оптимальном крыле. Можно ожидать, что в дальнейшем будет происходить интеграция функционального назначения различных элементов самолета и изменение его геометрии в зависимости от условий полета. Международный терроризм, проблемы экологии и набирающий силу процесс глобализации ставят перед авиацией новые задачи. В повестке дня создание малозаметного самолета, малозумного самолета, управляемого дирижабля, миниатюрного летательного аппарата и т.д.

Боевые малозаметные самолеты (истребители, штурмовики и стратегические бомбардировщики) изготавливаются на базе высоких технологий с использованием радиопоглощающих покрытий. Требование малозаметности накладывает ограничения на углы наклона поверхности самолета к горизонту — они не должны превышать по абсолютной величине  $60^\circ$ , чтобы обеспечить отражение излучения, посылаемого радиолокационными станциями противника, вертикально вверх или вниз от направления на станцию. Ввиду этого передняя кромка крыла самолета-невидимки не имеет скругления, что существенно ухудшает его аэродинамику при полете с дозвуковой скоростью. Здесь — проблема, требующая дополнительных исследований.

**Крыло Эйнштейна.** Примером исторического курьеза является крыло А. Эйнштейна, так называемый "кошачий горб". В биографии великого ученого, как и во всех биографиях гениев, обильно перемешаны правда и вымысел. Его биограф К. Зелиг считает, что в 1915 году Эйнштейн занимался проектированием самолетов по заданию немецкого Общества воздушного транспорта [38].

Знание гидродинамики у него ограничивалось уравнением Бернулли. В рамках такого теоретического подхода подъемная сила крылового профиля тем больше, чем больше кривизна его верхней поверхности. Поэтому Эйнштейн сделал сильно изогнутое крыло, прозванное "кошачьим горбом". Согласно легенде самолет Эйнштейна был построен и даже взлетел в небо, управляемый немецким асом Г. Эрхардом, едва избежавшим катастрофы при посадке. В письме к нему Эйнштейн в изысканной манере извинился за свое изобретательство: "Вот что может случиться с человеком, который много думает, но мало читает".

К этому следует добавить, что Эйнштейн, работая в Бернском патентном бюро советником сначала третьего, а затем второго класса, имел совместно с одним из своих коллег патент на слуховой аппарат нового типа, предназначенный его знакомой довольно известной певице. Тогда же он послал ей следующее стихотворение собственного сочинения:

Мыслителям неврдно иногда  
И техникой немного подзаяться.  
С надеждой я вперед смотрю всегда:  
Труды должны успехом увенчаться.

**Тела минимального волнового сопротивления.** Уже отмечалось, что в рамках математической модели невязкого газа удается сформулировать, — а порой и решить! — вариационную задачу об оптимальной форме обтекаемого тела. Вот два родственных примера на эту тему. Оптимальная форма тонкого тела вращения с заданной площадью основания (рис. 9) найдена фон Карманом [39]. Его коэффициент волнового сопротивления

$$c_x = \frac{4}{\pi} \frac{S(\ell)}{\ell^2},$$

где  $\ell$  — длина тела,  $S(\ell)$  — площадь основания.

Оптимальная форма тонкого тела вращения заданного объема  $V$  найдена В.Р. Сирсом и В. Хааком (см. рис. 9). Тело Сирса–Хаака замкнутое, т.е. площадь его основания равна нулю. Коэффициент волнового сопротивления

$$c_x = 24 \frac{V}{\ell^3}.$$

Носовые части крылатых и некрылатых ракет делаются в форме оживал Кармана или Сирса–Хаака. По этому поводу следует сделать важное замечание: носовая часть оживал затуплена, поэтому здесь линейная теория несправедлива, необходимо ее уточнение.

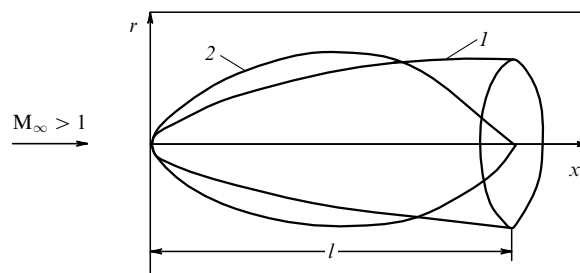


Рис. 9. Осесимметричные тела минимального волнового сопротивления: 1 — оживало Кармана, 2 — тело вращения Хаака–Сирса.

**Сопряжение Уиткомба.** Область сопряжения крыла с фюзеляжем должна быть тщательно профилирована. Здесь возможны большие потери или большие выигрыши. Особенно существенна интерференция крыла и фюзеляжа в околосзвуковом потоке. Дабы избежать появления в месте их стыка интенсивного скачка уплотнения, Уиткомб в 1952 году предложил сделать здесь выемку в фюзеляже, как условно показано на рис. 10. Такой подход имеет теоретическое обоснование. В соответствии с околосзвуковым правилом площадей (В.Д. Хейз, 1947 г.; К. Осватич, 1947 г.) волновое сопротивление комбинации крыло–фюзеляж равно волновому сопротивлению осесимметричного тела, имеющего такое же распределение площадей поперечных сечений, как и исходная комбинация [40]. Такое тело называется *эквивалентным*. Выигрыш получается, если суммарную площадь комбинации выбрать равной площади оптимального эквивалентного тела. Правильный выбор сопрягающей поверхности сильно влияет на обтекание всего крыла.

**Волнолет и другие летательные аппараты.** Гиперзвуковой самолет должен иметь большой объем, большую подъемную силу при больших числах Маха, а в качестве

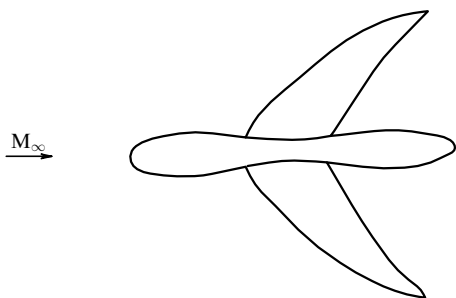


Рис. 10. Схема сопряжения крыла с фюзеляжем.

подходящего топлива следует использовать жидкий водород. Поскольку создание такого самолета в настоящее время проблематично, инженеры рассчитывают не его реальные конфигурации, а идеализированные — такие, которые получаются сшивкой простейших течений: плоских и конических. Такие конфигурации называли *волнолетами* [29, 30, 41]. Сжатие газа в ударных волнах, расположенных под волнолетом между его кромками, создает подъемную силу. Концепция волнолета была выдвинута Т. Нонвейлером (1952), а в России разрабатывалась Г.И. Майкапаром (1959) и другими. На рисунке 11 представлена система скачков уплотнения  $\Lambda$ -крыла в зависимости от глубины его выемки, объем тела заштрихован.

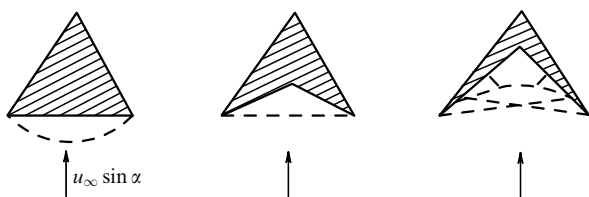


Рис. 11. Схема обтекания волнолета в поперечном сечении (сечения волнолета заштрихованы, штриховые линии — ударные волны).

В отличие от волнолета идею судна на воздушной подушке и идею экраноплана удалось реализовать [42]. Торпедный катер, как прототип судна на воздушной подушке, создал австрийский инженер Д. Тамамюль (1916). Идею о настоящем судне на воздушной подушке высказал К.Э. Циолковский (1927). Создал его В.А. Левков (1932). Недостатком судна на воздушной подушке является отсутствие контакта рулевых устройств с водой. Поэтому у него низкая маневренность и большая зависимость от погодных условий. Последние разработки — аппараты "Авиастар" Новосибирского конструкторского бюро.

Над созданием экраноплана трудились такие выдающиеся российские деятели техники, как Б.Н. Юрьев, Г.П. Бериев, Р.Л. Бартини. Наибольший вклад в проектирование и создание экраноплана внес Ростислав Алексеевич Алексеев (1919–1979), возглавлявший в Нижнем Новгороде Центральное конструкторское бюро судов на подводных крыльях. Первый экраноплан он создал в 1961 году, а в 1970 году построил самый большой в мире летательный аппарат КМ ("Корабль-макет"), который имел десять турбореактивных двигателей, массу в 540 т, максимальную скорость  $500 \text{ км ч}^{-1}$  и

высоту полета 2–3 м. Когда американская разведка засекла испытания КМ из космоса, то нарекли его "Каспийским монстром". В 1974 году после аварии экраноплана Алексеева отстранили от работы, его архив сожгли.

Ростислав Алексеевич получил высокую форму признания, — разумеется, не в России! — его портрет висит в американском Конгрессе в галерее великих деятелей мира, внесших наибольший вклад в развитие человечества в XX веке.

**Ветроэлектростанции.** После того как стало ясно, что практическое использование термоядерной энергии — дело отдаленного будущего, повысилось внимание к проблеме освоения ветровой, по сути — солнечной, энергии, запасы которой практически безграничны. По использованию ветроэлектростанций в мире лидируют США; Германия получает от ветра 10 % своей электроэнергии. Поскольку темпы создания ветроэлектростанций стремительно нарастают [42], обозначилась проблема аэродинамической оптимизации лопасти ветряка.

#### 2.4. Аэроупругость

Конструкция летательного аппарата нежесткая, под воздействием воздушного потока она деформируется. Такое явление называется аэроупругостью [31, 43]. Аэроупругость как наука соединяет два раздела механики сплошных сред: аэродинамику и прочность.

Рассмотрим деформацию крыла самолета. Подъемная сила не только изгибает крыло, но и закручивает его. Вследствие этого увеличивается угол атаки, а значит, и подъемная сила, и кручение крыла. Упругость крыла до определенных пределов сопротивляется такой деформации. Ввиду того, что подъемная сила крыла увеличивается с ростом скорости полета, а упругие силы не зависят от скорости, существует критическая скорость полета, при которой эти силы равны. Она называется *скоростью дивергенции*. При скоростях выше ее наступают упругая неустойчивость и разрушение крыла. Такое явление наблюдается не только на крыле, но и на органах аэродинамического управления (элеронах, рулях высоты, рулях направления и пр.).

Из многочисленных проявлений аэроупругости наиболее важным является *флаттер* (от англ. flutter — трепыхаться) — самовозбуждающиеся колебания упругих конструкций. Многоликий флаттер — самая трудная проблема аэроупругости, так как включает в себя различные виды резонансов между аэродинамическими волнами, изгибно-крутильными колебаниями крыла и колебаниями поверхностей управления.

С точки зрения теории колебаний летательный аппарат представляет собой автоколебательную систему, источником энергии в которой служит набегающий поток, а обратную связь осуществляет упругость.

С явлениями аэроупругости авиаконструкторы столкнулись еще до полета братьев Райт. Первая, связанная с аэроупругостью, катастрофа произошла в 1903 году с моторным монопланом профессора Смитсонского университета (США) С. Лэнгли. Его самолет потерпел аварию и упал в реку Потомак из-за разрушения крыла аэроупругой крутильной дивергенцией.

Успешный полет биплана братьев Райт и неудача моноплана Лэнгли обусловили приверженность к бипланам на заре развития авиации. Крылья бипланов имели более высокую жесткость на кручение, чем крылья

монопланов. Однако для бипланов наиболее острой оказалась проблема флаттера хвостового оперения. Именно по этой причине в начале Первой мировой войны разбился бомбардировщик "Хэйндли Пейдж". Причины его катастрофы в числе первых устанавливал Ф. Ланчестер (1916). Было потеряно много жизней и самолетов, прежде чем нашли способ борьбы с флаттером. Проблема решалась двумя путями: инженерным и теоретическим. Инженеры сразу же предложили увеличить жесткость конструкции, изменить толщину крыла, размещение масс в крыле и размещение двигателей. В 1920-х годах теоретики (В. Бирнбаум, Х. Вагнер, Х.Ж. Кюсснер) построили математическую модель флаттера, сводящуюся к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Первое точное решение задачи получил в 1934 году Т. Теодорсен<sup>10</sup>.

Математические модели аэроупругости были эмпирическими и упрощенными. Конструкторы не доверяли теоретикам. Поэтому в авиационную практику были внедрены статические и динамические испытания летательных аппаратов на аэроупругость.

Успехи в исследовании аэроупругости позволили в 1930-х годах перейти от бипланов к монопланам. Однако и в настоящее время, когда возросли скорости полета самолетов и вертолетов, когда появились ракеты, проблемы аэроупругости не сняты с повестки дня. Они актуальны и в областях, не связанных с авиацией и ракетостроением. В 1940 году вследствие флаттера разрушился стальной висячий мост в Такоме (США). С тех пор аэроупругости мостов, дымовых труб, лопаток турбин, высоких кранов и других конструкций, подверженных ветровым нагрузкам, инженеры-строители уделяют повышенное внимание.

Полоскание флагов и парусов на ветру, "пение" проводов линий электропередач — все это проявления аэроупругости.

### 3. Гидродинамика в России

Хотя Россия позднее других развитых стран вступила на путь промышленного, а значит, и научно-технического развития (парадокс Чаадаева), на рубеже XIX и XX веков на весь мир прозвучали имена выдающихся русских ученых-естествоиспытателей: Д.И. Менделеева, И.П. Павлова, И.И. Мечникова, И.М. Сеченова, А.Г. Столетова, С.П. Тимошенко, И.Г. Бубнова и многих других. В то время гидродинамика в России пребывала в зачаточном состоянии. Отцом ее по праву считается Н.Е. Жуковский (1847–1921). До него этой наукой в России занимались лишь талантливые одиночки.

#### 3.1. Праистория

Великий Л. Эйлер (1707–1783), член Петербургской академии наук, первым построил математическую модель течения жидкости. Предложенная им система уравнений, не потерявшая актуальности и в наше время, так и называется — эйлерова.

Ординарный профессор Казанского университета А.Ф. Попов (1815–1879), ученик Н.И. Лобачевского, исследовал волны в несжимаемой жидкости.

Ординарный профессор Казанского университета И.С. Громека (1851–1889) изучал класс движений несжимаемой жидкости, когда вихревые линии либо перпендикулярны к траекториям, либо параллельны им. Результаты его исследований, опубликованные в 1881 году в *Ученых записках Казанского университета*, остались неизвестными широкому кругу научных работников. Спустя 8 лет итальянский ученый Е. Бельтрами обнаружил статью по данной теме. Сегодня течение с вихревыми линиями, совпадающими с траекториями, называется *течением Бельтрами*, а не *течением Громеки*. Но память о Громеке сохранилась — одна из форм уравнений движения называется уравнением Громеки – Ламба.

В середине XX века в Петербургском университете сложилась прекрасная математическая школа: П.Л. Чебышев, М.В. Остроградский, В.Я. Буяковский, А.М. Ляпунов, А.А. Марков, В.А. Стеклов, Ю.В. Сохоцкий, Д.К. Бобылев. Многие из них занимались решением гидродинамических задач.

Бобылев (1842–1917), учитель А.А. Фридмана, получил в замкнутой форме решение задачи о симметричном струйном обтекании клина потоком идеальной жидкости. Такое течение сегодня принято называть *течением Бобылева*.

Ляпунов (1857–1918) изучал фигуры равновесия равномерно вращающейся жидкости, исследовал их устойчивость, внес значительный вклад в теорию потенциала.

Остроградский (1801–1861) продолжил исследования О. Коши и С. Пуассона о распространении волн в цилиндрическом бассейне.

Имя профессора Петербургского университета Ю.В. Сохоцкого (1842–1927) связано с теорией краевых задач, являющейся основой теории кусочно-потенциальных течений. Трудно назвать автора, впервые использовавшего интеграл типа Коши. Однако можно точно сказать, что первым, кто его исследовал, был Сохоцкий. В своей докторской диссертации (1873) он доказал теорему о предельных значениях интеграла типа Коши [44]. Затем результаты Юлиана Васильевича были незаслуженно забыты и вновь получены югославским математиком И. Племели в 1908 году. Нередко и несправедливо теорему Сохоцкого называют теоремой Сохоцкого – Племели и даже — теоремой Племели.

Борис Александрович Бахметьев (1880–1951) занялся гидродинамикой уже в XX веке. Он родился в Тифлисе. Получив образование в Петербурге и Цюрихе, стал гражданским инженером. В 1912 году Бахметьев опубликовал монографию, посвященную течению жидкости в открытом канале. Блестящее образование и воспитание позволили ему стать послом в США при Временном правительстве России. После Октябрьской революции он эмигрировал в Америку, приобрел там большую спичечную фабрику. Став капиталистом, продолжал занятия гидродинамикой, издал оригинальные монографии по гидравлике и динамике турбулентных течений. Помогал русским эмигрантам "первой волны" обосноваться в Нью-Йорке.

В скобках заметим, что выдающийся гидродинамик, ученик Л. Прандтля, Иван (Вано) Ильич Никурадзе (1894–1979) тоже родился в Грузии.

Четыре научные школы оставили нетленный след в российской гидродинамике: школа Жуковского, школа Фридмана, школа Колмогорова и школа ЦАГИ [45, 46].

<sup>10</sup> В России работы по флаттеру начались с опозданием — в 1930 году. Пионером в этой области был Е.П. Гроссман.

### 3.2. Школа Жуковского

В начале XX века теория крыла обогатилась двумя выдающимися открытиями: условием конечности скорости на задней кромке крыла и формулой, устанавливающей прямую пропорциональность между действующей на крыло подъемной силой и циркулирующей скоростью. К обоим этим открытиям причастны и Н.Е. Жуковский, и известный немецкий математик, приват-доцент Высшей технической школы в немецком городе Штутгарте В.М. Кутта (1867–1944).

Имя ученика Жуковского С.А. Чаплыгина стали связывать с этими открытиями в сороковых годах прошлого века, когда в стране развернулась кампания по борьбе с так называемым космополитизмом — попыткой доказать, что "Россия является родиной слонов". Число Маха<sup>11</sup>, например, предлагали называть числом Маиевского, а условие о конечной скорости на клиновидной кромке — условием Чаплыгина или даже условием Чаплыгина–Жуковского–Кутты. На самом деле Чаплыгин лишь обобщил результаты, полученные Жуковским и Куттой. Кутта первым указал на условие конечности скорости, но его результат относился к частному случаю обтекания дужки. Кутта первым получил формулу для подъемной силы, но опять же в частном случае дужки и совсем не в той изящной форме, которую впоследствии установил Жуковский: подъемная сила

равна произведению скорости движения крыла на циркуляцию и на плотность воздуха.

Терминологию изменить трудно, это подвластно только авторам хороших учебников. Но статистика показывает, что в настоящее время условие о конечности скорости называют условием Кутты, а теорему о подъемной силе — теоремой Жуковского. Намечается компромиссное решение.

Формула Жуковского оказалась универсальной: она не только определяла действующую на крыловой профиль подъемную силу, но и объясняла движение в потоке вращающегося цилиндра — так называемый эффект Магнуса. Одной этой формулы оказалось бы достаточно, чтобы имя Жуковского навечно вошло в анналы гидродинамики.

Своим учителем Жуковский считал Гельмгольца. "Современная аэродинамика, — говорил он, — своим развитием обязана Гельмгольцу".

Среди учеников Жуковского неизгладимый след в гидродинамике оставили Д.П. Рябушинский, С.А. Чаплыгин и В.П. Ветчинкин. В 1902 году Жуковский построил в Московском университете аэродинамическую трубу всасывающего типа с закрытой рабочей частью. Ее длина равнялась 7 м. К этому времени стало ясно, что для повышения точности опытов нужны большие трубы, дорогое приборное оборудование и, следовательно, значительные материальные затраты. В университете денег не было. На помощь пришел богатый российский предприниматель Дмитрий Павлович Рябушинский (1882–1962), создавший в 1904 году аэродина-



Николай Егорович Жуковский



Дмитрий Павлович Рябушинский

<sup>11</sup> Число Маха использовал еще Эйлер. А ввел его в употребление не сам Мах, а Я. Аккерет. Кстати говоря, термин "число Рейнольдса" ввел не сам Рейнольдс, а А. Зоммерфельд, спустя много лет после исследований Рейнольдса.



Сергей Алексеевич Чаплыгин



Владимир Петрович Ветчинкин

мический институт в Кучино, родовом подмосковном имении [47]. Рябушинский был одним из младших отпрысков владельца крупнейшей российской торгово-промышленной фирмы "Товарищество П.М. Рябушинского с сыновьями". Он успешно окончил Практическую академию коммерческих наук в Москве, где механику преподавал "отец русской гидродинамики" Жуковский. Выбрав науку целью своей жизни, Рябушинский в тридцатилетнем возрасте с отличием заканчивает второй вуз — физико-математический факультет Московского университета и остается там работать на кафедре Жуковского. Его первая научная статья посвящена теории полета геликоптера.

Первый в России аэродинамический институт в Кучино был предтечей ЦАГИ. Эксперименты проводились на самом высоком по тем временам инженерном уровне. Использовалось, например, такое новшество в тогдашней мировой практике, как фотографирование. В Кучино было построено прекрасное здание и смонтирована по тем представлениям большая аэродинамическая труба. Научным руководителем Рябушинский пригласил своего учителя Жуковского. В центре внимания было измерение сил, действующих на погруженное в поток тело. "Отец русской авиации" И.И. Сикорский назвал Кучинскую лабораторию "славным гнездом авиационной науки".

Вскоре отношения между учеником и учителем испортились. Вот как описывает ссору Жуковского с Рябушинским, этим "матерым финансовым волком", "дельцом с размахом", М. Арлазоров, автор книги *Жуковский* (серия

*Жизнь замечательных людей*, М., 1959): "Но не прошло и года, как из просителя и почитателя Рябушинский превратился в повелителя. Он ревновал Жуковского к его славе и попытался диктовать ему свои условия". Хотя неправомерно судить прошлое с позиций современности, следует отметить, что Жуковский проявил излишнюю принципиальность. Характер у него был нелегкий. А не ревнуют только слабые... После революции 1917 года институт Рябушинского конфисковали. Самого Дмитрия Павловича арестовали. Только благодаря помощи друзей ему удалось выйти из тюрьмы и бежать за границу<sup>12</sup>. Комиссия в составе Н.Е. Жуковского, С.А. Чаплыгина и других признала институт пригодным для проведения аэрофизических исследований. Явившийся прообразом ЦАГИ Кучинский институт просуществовал до 1921 года, после чего был передан геофизикам.

Рябушинский эмигрировал во Францию, где стал ведущим аэродинамической лаборатории Сорбонны.

Выдающийся русский ученый и инженер, член-корреспондент Французской академии Д.П. Рябушинский сочетал в себе незаурядный талант ученого, инженера и даже писателя. Он известен не только своими неувядаемыми трудами в области гидродинамики, но и изобретением теплового проволочного анемометра, до настоящего времени незаменимого в аэрогидродинамическом эксперименте. В 1916 году он предложил оригинальное оружие — реактивный ручной гранатомет, названный

<sup>12</sup> Сестер освободить не удалось — они погибли в концентрационном лагере на Соловецких островах.

впоследствии базукой, и безуспешно пытался его пропагандировать. Лишь спустя четверть века базаука была принята на вооружение в армиях США и некоторых других стран.

Основополагающий вклад сделан Рябушинским в теорию размерности: полученное им в 1911 году доказательство, обобщенное впоследствии английским ученым Е. Бакингом и названное "л-теоремой", вошло во все учебники по механике сплошных сред. Предложенная Рябушинским схема струйного обтекания (1919) носит его имя и известна любому гидродинамику. Он внес значимый вклад в теорию волн и в исследование кавитационных течений. Хотя две сотни написанных Рябушинским работ трудны для изучения, они до сих пор привлекают внимание исследователей.

Признание научных заслуг Рябушинского проявилось в избрании его членом-корреспондентом Французской академии наук. Память о великом русском ученом увековечена — его имя, вернувшееся к нам из длительного забвения, занесено в Золотую книгу русской эмиграции [48].

Еще одним известным учеником Жуковского был Стефан Джевицкий (1844–1938), инженер и ученый польского происхождения. Он тоже эмигрировал во Францию, где работал с Эйфелем. Весьма существен его вклад в теорию воздушного винта.

Среди научных работ другого ученика Н.Е. Жуковского есть одна, которая занимает исключительное место. Это опубликованная в 1902 году докторская диссертация С.А. Чаплыгина [49]. К этому времени уже были открыты ударные волны, но газовая динамика все еще не обозначилась как наука. Диссертация Сергея Алексеевича ознаменовала ее рождение. Прочно вошли в научный обиход такие понятия, как "газ Чаплыгина", "уравнение Чаплыгина".

Широко известны труды по теории винта и по расчету летательных аппаратов на прочность В.П. Ветчинкина (1888–1950) — одного из создателей такой прикладной науки, как динамика полета самолета.

Еще один ученик Жуковского, А.Н. Туполев, стал выдающимся российским авиаконструктором.

### 3.3. Школа Фридмана

В школе Жуковского занимались теорией волн, ударом тел о свободную поверхность, нестационарными течениями идеальной жидкости, теорией подводного крыла, глассированием. Как вспоминает Л.Г. Лойцянский [50], Жуковский и его ученики оставались в стороне от новых научных направлений — от изучения динамики вязкой жидкости.

Совсем другие принципы легли в основу деятельности школы Фридмана. В отличие от школы Жуковского, где создавались отечественные авиационные науки, ученики Фридмана шли к гидродинамике не от авиационных приложений, а от геофизики. А.А. Фридман (1888–1925) поражает воображение широтой своих интересов. Его модель расширяющейся Вселенной сначала отверг, а затем поддержал А. Эйнштейн. Вторая страсть Фридмана — динамическая метеорология, основателем которой он является. Выведенные им теоремы и уравнения приобрели фундаментальное значение в прогнозировании погоды. С 1920 года Александр Александрович начал работать в Главной физической обсерватории Санкт-Петербурга. Третье увлечение Фридмана — гидродина-



Александр Александрович Фридман

мика. Он интересовался самой фундаментальной проблемой гидродинамики — турбулентностью. Совместно с Л.В. Келлером он строго математически вывел бесконечную систему уравнений для моментов [51].

После смерти Фридмана главой петербургской гидродинамической школы стал его ученик Н.Е. Кочин. Он занимался моделированием циклона (1923), исследованиями поверхностей разрыва (1924), волновых движений тяжелой жидкости, устойчивостью вихрей. Н.Е. Кочин получил точное решение линейной задачи об обтекании кругового крыла в плане (1940) независимо от известного немецкого гидродинамика К. Кринеса, который нашел решение этой задачи в более общем случае — для эллиптического крыла. На учебниках Кочина выросло не одно поколение гидродинамиков в России. Его переезд в Москву и работа в ЦАГИ знаменовали собой преемственность гидродинамических школ Фридмана и ЦАГИ.

Л.Г. Лойцянский, другой ученик Фридмана, занимался разработкой теории ламинарных течений, а в теории турбулентности обнаружил инвариант (1939), сохраняющийся в процессе вырождения однородной и изотропной турбулентности. Правда, впоследствии выяснилось, что этот результат справедлив лишь в гипотетическом случае [52].

### 3.4. Школа Колмогорова

А.Н. Колмогорову (1903–1987) принадлежат фундаментальные открытия во многих областях математики, роль

его в истории гидродинамики уникальна, ибо он является центральной фигурой среди разработчиков теории турбулентности. Специалистам хорошо известны масштаб Колмогорова, гипотезы Колмогорова, дискуссия Колмогоров–Ландау, а в нелинейной динамике — теория Колмогорова–Арнольда–Мозера.

Колмогоров в 1983 году шутливо говорил, что один из его учеников управляет атмосферой, а другой — океанами. Он имел в виду директора Института физики атмосферы АН СССР академика А.М. Обухова и директора Института океанологии АН СССР, члена-корреспондента А.С. Мони́на [53]. Институт физики атмосферы был основан на базе возглавляемой ранее Колмогоровым лаборатории по исследованию турбулентности.

Разложение спектра пульсаций скорости на низкочастотную и высокочастотную части называется разложением Обухова. Обухов вывел закон, называемый законом Колмогорова–Обухова, независимо от Колмогорова, исходя из других соображений. Им также предложена логнормальная структура флуктуаций.

Монин обобщил уравнение Кармана–Ховарта на случай анизотропной турбулентности. Теперь оно называется уравнением Кармана–Ховарта–Мони́на.



Андрей Николаевич Колмогоров

А.М. Яглом, развивая теорию Колмогорова, рассмотрел общий класс моделей случайного каскада.

М.Д. Миллионщиков выдвинул гипотезу о занулении семиинварианта четвертого порядка. На 7 лет позже эту же идею высказал В. Гейзенберг. "Закон минус 5/4" или "закон Миллионщикова" определяет затухание пульсаций скорости со временем.

В.И. Арнольд исследовал устойчивость стационарных течений идеальной жидкости; с помощью теории групп Ли он обнаружил, что такое течение — бесконечномерный аналог вращения твердого тела.

Школе Колмогорова была присуща глубина понимания проблем и математическая строгость их решения. В 1930–1940 годы возглавляемая Колмогоровым российская математическая школа, как считают историки науки, была лидирующей в мире. Сработало правило "классной доски": успехи у русских ученых имеются там, где не требуется более сложных инструментов, чем мел и доска<sup>13</sup>.

### 3.5. ... и другие

После Октябрьской революции 1917 года большевики разогнали парламент (Учредительное собрание), запретили деятельность демократических партий и 5 сентября 1918 года объявили о "красном терроре". Стали создавать концентрационные лагеря для инакомыслящих, ввели систему заложничества, жертвами которого стали десятки тысяч людей, прежде всего — деятели науки и культуры. Началось осуществление одной из крупнейших репрессивных акций тоталитарного режима.

В условиях складывающейся обстановки страха и террора Россию покидают представители российской интеллигенции, в том числе деятели науки, техники и высшей школы. Они устремились к границам, образовав так называемую *первую волну эмиграции*, пик которой пришелся на 1920–1925 годы и которая по официальным подсчетам, в целом, составила 1 млн 160 тыс человек. Беженцы пробирались на Запад разными путями: одни — через Одессу, другие — через Китай.

С одной стороны, эмиграция из России помогла сохранить и развить ее искусство, науку и технику. С другой стороны, синтез евроамериканской и русской культур способствовал прогрессу западной цивилизации. Одна часть эмигрантов осталась в Европе, надеясь на скорый конец большевизма; другая часть, уверенная в собственных силах и в способности выжить в непривычных условиях жесткой конкуренции, устремилась в Америку. Именно здесь обосновалась блестящая плеяда деятелей российской авиационной науки и техники [48].

После фирмы Сикорского, ставшей центром русских эмигрантов-инженеров, самой заметной на Западе была авиафирма А.Н. Прокофьева-Северского, бывшего капитана Балтийского флота, георгиевского кавалера, изобретателя автоматического бомбового прицела и устройства для дозаправки самолета в воздухе. Его преемник А.М. Картвели, бывший русский офицер-артиллерист,

<sup>13</sup> Все дело заключается в образовании. Об этом знал еще Ф.М. Достоевский: "Там, где образование начиналось с техники (у нас — реформа Петра), никогда не появлялось Аристотелей. Напротив, замечалось необычайное суживание и скудость мысли. Там же, где начиналось с Аристотеля (Renaissance, 15-е столетие), тотчас же дело сопровождалось великими техническими открытиями (книгопечатание, порох) (...) и расширением человеческой мысли (открытие Америки, реформация, открытия астрономические и проч.)".



построил один из лучших истребителей Второй мировой войны "Тандерболт", поставлявшийся в рамках военной помощи во многие страны, включая Россию.

На фирме М. Струкова, капитана царской армии, создавались тяжелые транспортные самолеты. Основоположник динамики полета, бывший профессор Петербургского университета Г.А. Ботезат создал в 1922 году вертолет (тогда говорили — геликоптер), впервые принятый на вооружение армией США. Русский инженер И. Махонин построил во Франции самолеты с изменяемой геометрией крыла. За рубежом в полной мере раскрылись таланты учеников Жуковского: конструктора вертолетов Н. Флорина, инженера М. Ваттера, основателей ЦАГИ И.А. Рубинского и Г.И. Лукьянова. Колчаковский офицер Александр Александрович Никольский стал непревзойденным специалистом по теории винтокрылых аппаратов, основоположником вертолетного образования в США.

Жуковский за границу не уехал: ему шел восьмой десяток. Кроме того, у него было свое большое дело — ЦАГИ, мечта о воссоздании российской авиации.

По мере укрепления диктатуры Сталина случаи высылки за границу стали единичными — этот палач предпочитал расстреливать интеллигенцию, морить в ГУЛАГ<sup>е</sup> и даже топить в морях баржи с заключенными<sup>14</sup>.

В 1937–1938 годах многие ученые попали в ГУЛАГ, затем — в бериевские "шарашки". Только из ЦАГИ расстреляли начальника ЦАГИ Н.М. Харламова, начальника 8-го отдела В.И. Чекалова, заместителя начальника отдела подготовки кадров Е.М. Фурманова. Специалистов не хватало. Дело дошло до того, что в 1940 году Ученый совет ЦАГИ возглавил балтийский матрос Иван Петров, штурмовавший, по его рассказам, Зимний дворец в 1917 году. В его подчинении находились... С.А. Чаплыгин и другие выдающиеся ученые института. Как говорил В.О. Ключевский: "История ничему не учит. История наказывает за невыученные уроки".

На фоне этих событий особенно поражают наши успехи в математике, физике, самолетостроении и в освоении космоса!

К депортации "инакомыслящих" вернулись в годы правления Л.И. Брежнева, с 1966 по 1988 годы гражданства лишились свыше 170 человек.

*Вторая волна научной эмиграции* прошла после революции 1991 года. Между двумя волнами в условиях железного занавеса на Запад проникали лишь отдельные ученые. Г.А. Гамов, физик-теоретик, ученик Фридмана, остался там послеграничной командировки в 1933 году. В.Г. Левич, один из основоположников физико-химической гидродинамики, ученик Ландау, попал туда в 1978 году как узник совести. Е.А. Новиков, ученик Обухова, остался в Японии после состоявшейся там конференции по гидродинамике в 1982 году, затем он переехал в Америку. Уже к концу 1991 года Израиль принял более 6 тысяч ученых из России [54].

<sup>14</sup> Такой случай описан А.И. Солженицыным. Однако он не был единичным. Это была система, заслуживающая дальнейшего изучения. Моего деда, Матвея Федоровича Бетяева, потопили вблизи Соловецких островов; пароход, который вез из заключения уже отбывшего срок дядю моей жены, взорвали при выходе из бухты Нагаево на глазах у многочисленных свидетелей.

Во второй волне эмиграции оказались почти все известные гидродинамики России: М.А. Гольдштик, М.Г. Гоман, А.Л. Гонор, Г.М. Заславский, В.Р. Кузнецов, А.А. Прасковский, А.И. Рубан, О.С. Рыжов, В.А. Сабельников, С.Н. Тимошин, В.Н. Тригуб, С.И. Чернышенко, В.Н. Штерн. Эта эмиграция происходила в условиях свободного перемещения умов. В связи с падением "железного занавеса" понятие эмиграции сегодня полностью утратило свое прежнее значение. Средства информации стали такими, что проживание в любой точке земного шара обеспечивает доступ к открытому знанию, каковым является фундаментальная наука.

Российская наука постарела — средний возраст ученого, работающего в военно-промышленном комплексе, приблизился к пенсионному<sup>15</sup>. Невзирая на это в России должны развиваться авиация, поскольку нам дана 1/7 часть всего неба, и кораблестроение, поскольку мы стоим на двух материках... И не на основе лизинга, а на основе развития собственной прикладной науки и промышленности!

Неоценим вклад в гидродинамику математиков (Г.И. Марчука, В.П. Маслова, Н.Н. Яненко) и физиков (школы А.В. Гапонова-Грехова в Нижнем Новгороде, В.Е. Захарова, Я.Б. Зельдовича, П.Л. Капицы, Л.Д. Ландау).

В Московском университете не было единой гидродинамической школы. Однако здесь работали выдающиеся ученые.

Л.И. Седов (1907–1999), ученик С.А. Чаплыгина, сначала работал в ЦАГИ, а затем стал заведующим кафедрой гидромеханики Московского университета. Он развил теорию автомодельных течений, в замкнутой форме получил решение задачи о сильном точечном взрыве в идеальном газе, внес вклад в аксиоматику механики сплошной среды и в релятивистскую механику.

А.А. Ильюшин (1911–1998) заведовал кафедрой упругости механико-математического факультета, участвовал в разработке проектов по созданию советских атомной и водородной бомб. Независимо от Тзяна (1946) установил закон плоских сечений в теории гиперзвуковых течений. В примечании к его статье, опубликованной в 1956 году, указывается, что она была напечатана в 1948 году в ограниченном числе экземпляров с грифом "секретно"; задержка в публикации связана с секретностью. Учебник Ильюшина по механике сплошных

<sup>15</sup> В.И. Арнольд [55] считает, что пик творчества ученого приходится на 27 лет. Н. Бурбаки увольняет из своего коллектива людей, достигших 50 лет. Разумеется, каждый ученый имеет свой критический возраст, когда творческая активность достигает максимума. Следовательно, существует и осредненный по всему сообществу ученых возраст максимальной активности. На самом деле ситуация сложнее: есть несколько "особых точек" в научной деятельности. Примерно после 30 лет оканчивается фаза творческой активности, после 40 лет — фаза понимания *принципиально нового*, после 50 лет — фаза творческого преподавания, после 60 лет — фаза идейного руководства научной лабораторией. И, как ни печально это констатировать, наступает фаза, когда человек начинает препятствовать внедрению новых идей.

Считается [56], что средняя продолжительность жизни научных монографий 25 лет, а научных статей 5 лет. Однако выдающиеся монографии и статьи живут вечно. Древняя мудрость гласит: "Nabet sua fata libelis in capita lectores" ("книги имеют свою судьбу в головах читателей").



сред выдержал три издания и до сих пор сохраняет актуальность.

#### 4. Школа ЦАГИ

Школа ЦАГИ стала естественным продолжением школы Жуковского. ЦАГИ была отведена главная роль в создании советской (передовой в свое время) авиации, и он ее достойно выполнил. Здесь не было единоличного лидера, поэтому образовались самостоятельные подшколы. В СССР ни один новый самолет не мог подняться в воздух без "разрешения" ЦАГИ.

К концу XX века отношение к специалистам инженерам несколько изменилось. В научных институтах российского военно-промышленного комплекса должность научного сотрудника стала считаться более престижной, чем должность инженера. А еще в начале века и А.Н. Крылов, и С.П. Тимошенко гордились высоким званием инженера! Ведь слово "инженер" имеет общий корень со словом "гений".

Четкого разграничения между понятиями инженер-исследователь и ученый, разумеется, нет. Ученый занимается научными задачами, инженер — техническими. Ученый пишет статьи, инженер — отчеты. Ученый имеет индекс цитирования<sup>16</sup>, инженер — нет. Вместе с тем деятельность инженера отлична от деятельности конструктора или изобретателя. Конструктор создает облик изделия, его техническую документацию. Изобретатель предлагает новые решения технических задач, имеет авторские свидетельства или патенты.

Дополнительная путаница вызвана тем обстоятельством, что инженеры бывают двух видов. В авиации инженер-исследователь занимается аэродинамическим экспериментом, инженер-производственник — постройкой летательных аппаратов.

Мы будем говорить об инженерах-исследователях. Граница между сферами деятельности инженера-исследователя и ученого-прикладника не обозначена, размыта. Н.Е. Жуковский и его ученик Д.П. Рябушинский, будучи выдающимися учеными и инженерами, владели и теоретическими, и экспериментальными методиками. Генеральный конструктор В.Н. Челомей был достаточно крупным ученым [57, 58]. Если эти примеры являются исключением, то совмещение деятельности инженера и изобретателя — это правило.

##### 4.1. Б.Н. Юрьев

Борис Николаевич Юрьев (1889–1957) родился в Смоленске в семье артиллерийского офицера. От отца, в кабинете которого стоял верстак, он унаследовал любовь к ручному труду, различным ремеслам. С похвальным листом окончил Второй Московский кадетский корпус. Как и Жуковский, его учитель, преподавал в Московском высшем техническом училище (МВТУ), в стенах которого основал аэродинамическую лабораторию [59].

<sup>16</sup> Вот (подсчитанные мной приблизительно) *дробные* индексы публикаций некоторых российских ученых: Н.Е. Жуковский — 98,5, С.А. Чаплыгин — 27, А.А. Фридман — 32, Н.Е. Кочин — 15, М.В. Келдыш — 21, С.А. Христианович — 11,2, Ф.И. Франкль — 36,3, В.В. Струминский — 15,4, А.А. Никольский — 26,8. Дробный индекс учитывает наличие соавторов: каждая статья оценивается в  $1/N$  очков, где  $N$  — число авторов. Учитываются только статьи, опубликованные в рецензируемых журналах.

В 1914 году участвовал в военных действиях на фронте, попал в плен и вернулся в Россию в 1918 году. Борис Николаевич участвовал в организации ЦАГИ, в 1923 году построил там оригинальную аэродинамическую трубу. Во время Второй мировой войны Б.Н. Юрьев создал в Екатеринбурге аэродинамическую лабораторию, в состав которой входили четыре трубы.

Б.Н. Юрьеву принадлежит большое количество патентов. До сих пор используется изобретенный им *автомат перекоса* — механизм для управления вертолетом. Он создал первый советский вертолет, побивший мировой рекорд набора высоты.

Юрьев был редактором первого тома "Руководства для конструкторов" (1940), ставшего настольной книгой российских самолетостроителей. Однако главный объект научных исследований Юрьева — вертолет. В настоящее время так называемая импульсная теория винта Сабинина–Юрьева устарела, вытесненная численным экспериментом. Однако труды Бориса Николаевича по истории аэродинамики представляют интерес и в наше время, хотя в них по известным причинам не отражена деятельность эмигрантов первой волны.

Труд Юрьева на научном и инженерном поприщах, занятия по подготовке квалифицированных кадров отмечены двумя Государственными премиями, двумя орденами Ленина, орденом Отечественной войны 1-й степени, орденом Красной Звезды и медалями. Ему присвоено воинское звание генерал-лейтенанта инженерно-авиационной службы.



Борис Николаевич Юрьев

Б.Н. Юрьев был и ученым, и инженером одновременно, но второй вид деятельности в его биографии преобладал. Среди трудов Юрьева [60] остались востребованными исследования в области экспериментальной аэродинамики [61].

#### 4.2. А.К. Мартынов

Аполлинарий Константинович Мартынов (1901–1991), ученик Б.Н. Юрьева, родился в дворянской семье. Его отец работал врачом. Аполлинарий Константинович свободно говорил на французском и немецком языках. Свою трудовую жизнь он начал слесарем на железной дороге в 1918 году. В 1920 году проходил службу красноармейцем в Третьем Московском полковом округе. В том же году он поступил в Московское высшее техническое училище, а после его успешного окончания в 1925 году был зачислен инженером на работу в ЦАГИ. С 1939 по 1941 годы Мартынов занимал должность начальника второго (самого главного!) отделения ЦАГИ, тематикой которого была аэродинамика самолета, а в 1950–1972 годах руководил вертолетным отделением [62].

А.К. Мартынов являлся редактором "Справочника для конструкторов" и "Руководства для конструкторов". Кроме того, он состоял членом редколлегии журнала "Техника воздушного флота". Мартынов был начальником аспирантуры ЦАГИ. Его главное в жизни изобретение — шестикомпонентные аэродинамические весы для испытаний воздушных винтов до сих пор используются в трубном эксперименте.

Будучи профессором, Мартынов преподавал в Московском высшем техническом училище и Московском авиационном институте. Однако поскольку Аполлинарий Константинович не состоял в рядах членов коммунистической партии, его судьба была особенно подвержена действию доносов и анонимок... Он ушел на пенсию в 1989 году в чине ведущего (а не главного!) научного сотрудника.

А.К. Мартынов оставил о себе долгую память: среди четырех написанных им книг учебное пособие для втузов, переведенное на китайский, английский, румынский языки, до сих пор остается актуальным и непревзойденным образцом учебной литературы [63].

#### 4.3. С.А. Христианович

Сергей Алексеевич Христианович (1908–2001) работал в ЦАГИ с 1937 по 1953 гг. Будучи моим руководителем в аспирантуре, он так вспоминал о своей молодости.

— Происхождение у меня "неважное" — дворянское. Мои родители были дворянами, помещиками Орловской губернии. Наше поместье Юшино располагалось недалеко от станции Нарышкино. Мой дед, Сергей Сергеевич Христианович, был известным музыкантом и композитором. О нем очень тепло отзывался выдающийся певец Л.В. Собинов. Кроме того, он был председателем Орловской казенной палаты.

Наша семья вынуждена была бежать на юг. И вот в Ростове-на-Дону все мои близкие — мать, отец, старшая сестра — умерли от тифа в одночасье. Я остался совершенно один, беспризорником бегал по снегу боси-



Аполлинарий Константинович Мартынов



Сергей Алексеевич Христианович

ком. Повезло мне случайно. Мне помог профессор Давид Иванович Иловайский. Он заставил меня бросить торговать и поступить в мореходное училище. Однако там я не доучился, так как списался с теткой, которая жила в Ленинграде, и отправился к ней на каникулы. В Ленинграде я тяжело заболел сыпным тифом и остался в этом городе на много лет. Окончил Ленинградский государственный университет и попал в очень хороший коллектив Гидрологического института. Затем приехал по приглашению в Москву, в Академию наук, а моих сослуживцев, как я потом узнал, всех расстреляли. Ездил в геологическую экспедицию в Среднюю Азию. Не скажу точно, какую я там пользу приносил, но практика была для меня великая. Я увидел, как ведутся исследования, замеры, проектирование, как работают гидрогеологи. Невероятно интересно было в этих местах.

— Почему я ушел из ЦАГИ? Потому, что там стало неладно. Боялся, что уже не нужен. Я привык, что ко мне в ЦАГИ относились уважительно. Начальником в то время был А.И. Макаревский — человек мягкий и ни во что не вмешивающийся. Мне так прямо в лицо и сказали, что надобности во мне нет — труба работает, все необходимые испытания пройдены.

— Моему уходу поспособствовала и еще одна неприятная история. Меня подставили, обвинив в краже секретного документа — докладной записки о самолете-снаряде, который бы достигал Америку. Об этом доложили Сталину, и он, спросив, кто написал, заключил — зачем же ему красть, если он сам ее и написал.

САХ — так, по инициалам, его звали коллеги и подчиненные — принадлежит к тем исследователям, у которых научная и инженерная деятельность сбалансированы, как у Жуковского и его многих учеников. Об этом наглядно свидетельствует и тот исключительный факт, что он в 1938 году защитил сразу две докторские диссертации: по физико-математическим и по техническим наукам. Он является автором и соавтором пяти монографий [64].

Круг инженерных интересов САХ'а был необычайно широк. Он занимался исследованием течений газа в сопле Лавала, в эжекторе, применением эжекторов в газосборных сетях. Изучал гидравлический разрыв нефтеносного пласта, обрушение кровли в забое при горных выработках, движение грунтовых вод, внезапные выбросы угля и газа. Христианович создал аэродинамические трубы больших скоростей: в дозвуковой трубе Т-106, построенной в 1943 году, до сих пор проводятся эксперименты. В трубе Т-112, построенной в 1946 году, впервые была использована перфорация и впервые был осуществлен переход через скорость звука.

#### 4.4. Ф.И. Франкль

Имя выдающегося гидродинамика Феликса Исидоровича Франкля незаслуженно подзабыто, хотя специалисты знают, насколько велик его *индекс цитирования*. Он счастливо избежал репрессий и со стороны фашистов, и со стороны коммунистов.

**4.4.1. Жизнь.** Франкль (1905–1961) родился в Австрии в богатой еврейской семье, в 1927 году окончил математический факультет Венского университета. Сначала он был убежденным коммунистом, со студенческих лет

принимал активное участие в международном рабочем движении, в 1928 году вступил в коммунистическую партию Австрии. Неизвестно, ушел ли Франкль от нарождавшегося фашизма, но в 1929 году (Гитлер пришел к власти в 1933) он эмигрирует в СССР и в должности научного сотрудника поступает на работу в Коммунистическую академию при Центральном исполнительном комитете СССР. Быстро сообразив, что не туда попал, через два года он переходит на работу в ЦАГИ. Здесь становится членом Всесоюзной коммунистической партии. Самый главный этап научной деятельности Франкля связан с ЦАГИ. Среди его соавторов были такие выдающиеся ученые, как С.А. Христианович, И.А. Кибель, М.В. Келдыш.

В 1944 году Франкль переходит на работу в Артиллерийскую академию им. Дзержинского, где продолжает заниматься газовой динамикой: сверхзвуковым обтеканием удлиненных тел вращения, течением в соплах и истечением сверхзвуковых струй.

По-видимому, спасаясь от преследования евреев, Франкль в 1951 году переехал в город Фрунзе (ныне — Бишкек), возглавив кафедру в Киргизском государственном университете.

В 1959 году Франкль уже работает в Кабардино-Балкарском государственном университете (г. Нальчик). Здесь, как и в Киргизии, он развивает бурную



Феликс Исидорович Франкль

педагогическую деятельность — под его руководством защищаются десятки кандидатских диссертаций.

Обладая феноменальной памятью, Франкль говорил на многих европейских языках. Быстро выучил русский, наизусть декламировал "Слово о полку Игореве". Свободно читал оригинальные труды Эйлера, выходявшие в то время на латинском языке, и был крупным знатоком его работ.

Смерть Франкля в самом расцвете сил явилась тяжелой утратой для мировой науки.

**4.4.2. Время.** Придя к власти, фашисты начали геноцид по отношению к евреям и другим "неарийским" нациям. Сама наука стала "арийской"<sup>17</sup>. Корифеями наук немцы официально признавали "своих": в математике — Гильберта, в физике — Планка. Разделение ученых на чистых (арийских) и нечистых (неарийских) внедрялось в сознание немцев не только фюрерами, но и учеными-нацистами. Математик Биберах, например, писал, что остроумные результаты *неарийца* Лагранжа являются позором математики и обусловлены строением его орлиного носа. А вот труды Вейерштрасса — это высокая наука, потому что он ариец с прямым носом.

Понимая, что к каждому слову великого Гильберта прислушиваются ученые всего мира, фашисты предложили ему сделать доклад "Национал-социализм и математика" на публичном заседании Берлинской академии наук. Доклад Гильберта был предельно кратким: "Говорят, что национал-социализм и математика враждебны друг другу. Это вздор: они просто ничего общего между собой не имеют".

Находясь за рубежом, трудно было понять, что социализм в СССР — это жестокая диктатура. Многие видные зарубежные деятели за внешним фасадом социализма не могли разглядеть его красно-кровавую сущность. К их числу относился и Франкль в то время, когда выбрал СССР своей второй родиной.

Преследование евреев в СССР началось в 1930 годы, когда Сталин решил уничтожить большевиков — так называемую "ленинскую гвардию", состоящую, в основном, из евреев. Вторая волна антисемитизма началась в конце 1940-х годов под видом борьбы с *буржуазным космополитизмом*. Невольным свидетелем этого был Франкль.

**4.4.3. Творчество.** Как стареют научные статьи? Предается забвению мелкое, частное. Совершенствуются математические модели, численные и экспериментальные методики. Остаются идеи, парадигмы, *дух времени*.

Франкль, как, впрочем, Ландау и другие их выдающиеся современники, не могли знать те методы теории возмущений, которые были разработаны во второй половине прошлого столетия и сегодня во многом определяют лицо гидродинамики. Они не владели и вычислительными методами, ибо тогда еще не было компьютеров. С учетом этого читать статьи старых мастеров следует выборочно, пропуская то, что не выдержало испытания временем. Не востребованы работы Франкля по общей топологии и по квантовой динамике.

Его исследования отличаются математической строгостью, порой он формулирует, казалось бы, прикладную задачу на "теоремном языке" [65]. Однако в его работах по пограничному слою использовались методы, которые сегодня считаются устаревшими: так называемый метод Польгаузена в теории ламинарного пограничного слоя и полуэмпирические методы в теории турбулентного пограничного слоя. Тем не менее в школе ЦАГИ, где ни Н.Е. Жуковский, ни С.А. Чаплыгин не занимались теорией Прандтля, его исследования были пионерскими.

**Газовая динамика.** Начавшийся в 1930-х годах бум в газовой динамике не был данью моде. В повестке дня уже стояло создание высокоскоростных самолетов и высокоскоростных аэродинамических труб. Газовая динамика стала важнейшим направлением работ Франкля в ЦАГИ. Большую роль в пропаганде газодинамических знаний сыграла выпущенная им в соавторстве с С.А. Христиановичем и Р.Н. Алексеевой монография по этой теме [66].

Франкль исследовал вопросы существования и единственности решения нелинейных уравнений газовой динамики применительно к обтеканию крыла или осесимметричного тела. Он распространил теорему Жуковского о подъемной силе крылового профиля на случай сжимаемого газа. В газовой динамике того времени успешно применялись такие методы математической физики, как метод характеристик, метод распределенных источников, теория потенциала, разложение в ряды. Используя эти методы, Франкль получил решение задачи о сверхзвуковом обтекании заостренного тела вращения и задачи об обтекании несжимаемой жидкостью тел (с протоком и без него), близких по форме к осесимметричным [67].

Франклю удалось линеаризовать сложную задачу о движении лопастей винта при больших поступательных и окружных скоростях. Он показал, что в этом случае *теорема Фруда–Финстервальдера* несправедлива.

**Транзвуковые течения**<sup>18</sup>. Основателями теории транзвуковых течений — этой жемчужины газовой динамики — считаются К. Гудерлей, фон Карман и Франкль [68]. Работы Франкля в этой области посвящены прямым и обратным задачам транзвукового обтекания профиля, прямым и обратным задачам течения в горловине сопла Лавала, структуре потока в окрестности расположенного внутри области течения конца *висячего* скачка уплотнения.

Уравнение транзвуковых течений

$$[k - (\gamma + 1)\varphi_x]\varphi_{xx} + \varphi_{yy} = 0,$$

где  $\varphi$  — потенциал скорости,  $\gamma$  — отношение удельных теплоемкостей,  $k$  — параметр транзвукового подобия, называется уравнением Кармана–Гудерлея, хотя первым независимый вывод этого уравнения предложил Франкль.

На основе метода годографа им построены (1945) сопла Лавала, реализующие бескачковое течение.

<sup>17</sup> "Еврейскими" считались теоретические науки: марксизм, теоретическая физика и пр. Основным инструментарием физики считался эксперимент.

<sup>18</sup> Слово "транзвуковой" придумали профессора фон Карман и Х.Л. Драйден. Английское написание "transonic" с одним s грамматически неправильно. Однако фон Карман считал, что в гидродинамике грамматические правила не действуют.

Франкль первым (1947) обратил внимание на возможность математической некорректности задачи о стационарном обтекании тела с безударной (бескачковый) местной сверхзвуковой зоной на основе теоремы о единственности решения *обобщенной задачи Трикоми* для уравнений типа уравнения Чаплыгина. Эти предположения, так называемые *аргументы Франкля*, легли в основу выполненного впоследствии в США Кэтлин Моравец (1953) доказательства теоремы о корректности такого решения.

Франкль и Гудерлей независимо доказали существование и единственность решения задачи о дальнем поле в случае звукового течения (1947). На этом пути пришлось остроумно "пройти" нетривиальную особенность уравнения Трикоми в канонической эллиптической форме.

В послевоенных работах Франкля и его последователей с помощью метода Фурье исчерпывающее решение получила *задача Трикоми* об истечении струи из сопла с максимальным расходом. *Обобщенная задача Трикоми* впоследствии была решена численно.

Воспользовавшись методом годографа, Франкль свел обратную задачу об обтекании некоторых, заранее неизвестных профилей при наличии местной сверхзвуковой зоны, замыкающейся прямым (1956) или непрямым (1957) скачком уплотнения, к *обобщенной задаче Трикоми*. Эти задачи называли *ударными задачами Франкля*. В настоящее время получено их численное решение, т.е. найдена форма обтекаемого профиля.

**Математические модели природных процессов.** Математическая модель явления строится на основе физической модели и интуиции. Франкль был непревзойденным "модельером" — им построены следующие математические модели:

- 1) бокового водозабора из быстрых рек,
- 2) косоуго гидравлического прыжка,
- 3) сверхкритического течения на быстротоке,
- 4) течения жидкости со взвешенными наносами,
- 5) песчаных волн,
- 6) боры,
- 7) движения холодного слоя воздуха над пересеченной местностью,
- 8) планировки орошаемых полей.

**Релятивистская газовая динамика.** Будучи великодушным математиком, Франкль превосходно разбирался в тонких вопросах общей теории относительности. Ряд его работ посвящен задаче Коши. Его дискуссия с В.А. Фоком показала всю сложность этой проблемы, не имеющей решения в общем виде. Лишь в частном случае, при введении так называемых *гармонических координат*, задача была решена корректно.

В Бишкеке Франкль основал научную школу релятивистской газовой динамики. В рамках общей теории относительности он вывел уравнения движения и сохранения энергии в римановом пространстве. В рамках специальной теории относительности он показал, что, как и в классической газовой динамике, при отсутствии трения вихри не возникают и не исчезают. Обобщил теорему Кельвина на случай релятивистского течения.

Исследовал потенциальные релятивистские течения. Установил аналогию между течением ультрарелятивистского или фотонного газа и обычного идеального газа в случае, когда отношение теплоемкостей равно 2. В решенной им задаче о расчете тяги фотонного ракетного двигателя учитывалось поглощение и излучение света.

#### 4.5. В.В. Струминский

Владимир Васильевич Струминский (1914–1998) родился в Оренбурге в семье педагога. До поступления на физический факультет Московского государственного университета работал слесарем, затем токарем. В 1938 году окончил университет с отличием и поступил в аспирантуру [69]. В мае 1941 года после успешной защиты кандидатской диссертации Струминский был направлен на работу в ЦАГИ (г. Жуковский).

Большинство инженеров в то время имело бескомпромиссный и самолюбивый характер. Но характер В.В.!! На первых порах он помогал Струминскому в карьере — уже в 1953 году Владимир Васильевич становится начальником второго отделения и заместителем начальника ЦАГИ. Впоследствии отношения с начальством испортились, и в 1962 году его переводят в начальники отдела. В это время он развивает активную деятельность в Академии наук СССР, а в 1966 году принимает предложение стать директором созданного в Сибирском отделении Академии наук СССР Института теоретической и прикладной механики, ибо этот пост обеспечивал присвоение ему звания действительного члена Академии наук СССР. После пятилетней работы в Сибири он был уволен и вернулся в Москву, где начал заниматься проблемами химической технологии.

Струминский был разносторонним ученым. Аэромеханика и энергетика, физика и химия, экология и квантовая механика, авиация и космонавтика, технология и машиностроение, экономика и философия — это лишь



Владимир Васильевич Струминский

часть направлений, над которыми он интенсивно работал. Но главное его достижение — создание первых в СССР самолетов со стреловидными крыльями и преодоление *звукового барьера*. Его целью было создание оптимальной формы крыла с помощью многопараметрического трубного эксперимента.

Владимир Васильевич относился к ярким сторонникам внедрения стреловидных крыльев. Новое всегда борется со старым. Противники применения стреловидных крыльев пытались внедрить ромбовидные или треугольные крылья. Однако уже в 1947 году в конструкторских бюро Лавочкина, Яковлева и Микояна были построены первые опытные истребители со стреловидными крыльями. Применение оптимальных крыльев в пассажирской и военной авиации существенно повысило аэродинамическое совершенство российских самолетов.

В пятидесятые годы начались и не затихают до сих пор споры о предназначении ЦАГИ. Что должен представлять собой институт: арсенал аэродинамических труб или "силиконовую долину"? Струминский отстаивал первую точку зрения, Христианович — вторую. В то время<sup>19</sup> невозможно было выбрать одну из этих двух возможностей на основе точного экономического расчета. Копья ломали зря...

Под руководством Струминского были созданы комплексы уникальных экспериментальных установок: малотурбулентные дозвуковые и сверхзвуковые аэродинамические трубы (в городах Жуковском и Новосибирске), сверхзвуковые и гиперзвуковые аэродинамические трубы периодического действия, гиперзвуковые импульсные установки для больших чисел Рейнольдса, вакуумные трубы, криогенные стенды.

Кроме инженерной деятельности В.В. занимался наукой и имеет достаточно высокий индекс публикаций.

#### 4.6. Г.Л. Гродзовский

Георгий Львович Гродзовский (1923–1985) отличался чрезвычайно широким спектром интересов. Вот далеко не полный перечень объектов его деятельности: перфорированные стенки аэродинамических труб, магнитная подвеска моделей, лазерно-доплеровский измеритель скорости, плазменно-ионный двигатель "Янтарь". Заражая своими идеями единомышленников, он объединял большие коллективы ученых и инженеров и всегда оставался неутомимым романтиком, брался за осуществление грандиозных проектов. Руководство ЦАГИ его всячески унижало, для травли использовали даже неполноценных людей. Увольнение с поста начальника отделения окончательно подорвало его здоровье.

Исследования сверхзвукового течения газа в перфорированных границах были начаты в СССР в 1946 году, когда группа инженеров под руководством С.А. Христиановича впервые применила в аэродинамической трубе проницаемые стенки для перехода через скорость звука. В 1949–1951 гг. Г.Л. Гродзовский, А.А. Никольский и Г.И. Таганов провели большой цикл работ по изучению влияния перфорированных границ на структуру и характер сверхзвукового потока [70]. Гродзовский экспериментально исследовал выравнивание потока в соплах с перфорированными стенками, взаимодействие



Георгий Львович Гродзовский

плоского потока с перфорацией и так называемый *автоотсос аэродинамической трубы*.

Исследования нового способа фиксации моделей в аэродинамических трубах — магнитной подвески — начались в 1940 годах независимо во французском аэродинамическом центре ONERA и в СССР. Такой способ подразумевает использование магнитного поля вместо поддерживающих модель устройств. Гродзовский был пионером в деле использования магнитной подвески в нашей стране [71]. Работы в этом направлении продолжаются и в настоящее время.

В 1970 годах со всей остротой встала проблема качественного и быстрого измерения физических параметров газового потока. Наиболее оптимальным и прогрессивным направлением считалось использование метода лазерной анемометрии на основе эффекта Доплера (LDA — Laser Doppler Anemometer), позволяющего измерять скорость воздушного течения с помощью луча лазера, отраженного от посеянной в потоке инородной частицы [72]. Преимущество LDA состоит в том, что это оптический, бесконтактный метод, не вносящий возмущений в поток. Чтобы воплотить эту идею в жизнь, т.е. создать высокочастотный измерительный комплекс для аэродинамических труб, необходимо было решить ряд сложных инженерных задач в области аэродинамики, оптики, электроники и информатики [73]. С этой целью Гродзовский объединил и возглавил коллектив инженеров и ученых из различных НИИ,

<sup>19</sup> Сегодня вопрос ставится по-другому. Приспособится ли ВПК, включая ЦАГИ, к условиям рынка или останется синклитом номенклатуры и престарелых ученых?!

учебных заведений и заводов тогдашней России. В 1981 году в дозвуковой аэродинамической трубе ЦАГИ был внедрен лазерно-доплеровский измеритель скорости. В настоящее время лазерные анемометры выпускаются серийно, однако на пути промышленного использования LDA в экспериментальной аэродинамике предстоит затратить немало усилий.

Георгий Львович создал прототип маршевого двигателя для космических перелетов, осуществив идею К.Э. Циолковского и Ф.А. Цандера об использовании воздуха верхних слоев атмосферы для экономичного движителя [74]. В 1966–1971 годы с космодрома Сары-Шаган в Казахстане была произведена серия запусков созданной им ионосферной лаборатории "Янтарь", отделяемой от головной части геофизической ракеты. Тяга ракеты равнялась 1 г, скорость истечения реактивной струи —  $140 \text{ км с}^{-1}$ .

#### 4.7. А.А. Никольский

Александр Александрович Никольский — выдающийся российский аэродинамик, полный тезка упоминавшегося выше эмигрировавшего в США основоположника вертолетного образования в США [75].

**4.7.1. Жизнь.** Никольский родился 13 февраля 1919 года на станции Нижний Баскунчак Астраханской области в семье православного священника. Его фамилия традиционна для священнического сословия. После прихода к власти воинствующих атеистов в 1917 году отец стал преподавать в школе математику и физику. Впоследствии он получил звание "Заслуженный учитель РСФСР". Мать в той же школе преподавала русский язык и литературу. В такой семье Александр получил прекрасное воспитание и гуманитарное образование. Его любимым поэтом был Н. Гумилев, запрещенный и поэтому мало известный в советское время. А любимым творением Гумилева для Никольского было посвященное Валерию Брюсову стихотворение "Волшебная скрипка":

Тот, кто взял ее однажды в повелительные руки,  
У того исчез навеки безмятежный свет очей.  
Духи ада любят слушать эти царственные звуки,  
Бродят бешеные волки по дороге скрипачей.

В 1936 году Александр поступил на механико-математический факультет МГУ. Сначала к учебе относился с прохладцей, увлекался шахматами, Москвой и литературой. Затем всерьез заинтересовался наукой, стал сталинским стипендиатом и окончил университет с отличием сразу по двум специальностям: математике и механике. В 1941 году попал по распределению в самолетное (второе) отделение ЦАГИ, где получил броню — отставку от военной службы. Во время войны институт был эвакуирован в Казань и Новосибирск. Никольский попал в Новосибирск. Именно там в 1942 году умер С.А. Чаплыгин, как бы передав эстафету в руки нового поколения ученых.

В 1943 году Никольский вместе с ЦАГИ возвращается в поселок Стаханово (с 1947 года — город Жуковский). В 1946 году, после окончания аспирантуры ЦАГИ и защиты диссертации получает ученую степень кандидата физико-математических наук. В военные и послевоенные времена научная карьера делалась



Александр Александрович Никольский

быстро. Кроме того, Никольский выделялся среди коллег своими способностями и уровнем образования. Его начальниками и руководителями были А.К. Мартынов и С.А. Христианович.

Читая труды Никольского [76], убеждаешься, что его можно считать продолжателем дела Чаплыгина и Франкля, а из иностранных ученых — Буземана. За глаза Александра Александровича так и звали — Пузман с намеком на издали заметный живот.

В 1949 году Никольский становится доктором физико-математических наук, начальником отдела во втором отделении. В этом же году он начинает работать по совместительству в Институте механики Академии наук СССР.

Если одним словом охарактеризовать стиль научного руководства Никольского, то на ум сразу же приходит — свобода. Свобода во всем, будь то присутствие на работе или выбор темы исследований. Свобода — это значит самостоятельность в принятии решений, что отличает настоящего ученого от ненастоящего. Из его учеников наиболее перспективным считался М.Д. Ладыженский [77], но он рано ушел из жизни. Их обоих, учителя и ученика, отличала удивительная способность видеть и "чувствовать" свойства газодинамических уравнений — самых "длинных" и сложных уравнений теоретической физики.

Есть одна общая черта у Никольского и у ... И. Ньютона. Известно, что Ньютон не любил читать лекции. Студенты не посещали его занятия. Если появля-



лось 2–3 человека, то Ньютон с большой неохотой начинал читать лекцию, многократно запинаясь и ошибаясь. Таким же неумением читать лекции обладал Никольский. Создавалось впечатление, что он не тратил на их подготовку ни одной минуты.

Разумеется, Александру Александровичу сполна достались поощрения тех времен: благодарности, премии, медали, ордена и даже... взыскания. Вот любопытная выписка из личной анкеты Никольского.

1. Выговор за неявку на дежурство (1943).

2. Строгий выговор с предупреждением за оставление спецматериалов в закрытом столе (1947).

3. Сталинская премия за 1950 г.

Здесь все вместе: и выговоры, и премии. Так начиналась бурная жизнь молодого ученого.

В то время ученых уважали: на премиальные Никольский купил автомашину "Победа", его семье выделили коттедж в центре города.

В военное и послевоенное время режим секретности был ужесточенным. Первую свою работу в открытой печати Никольский опубликовал в 1944 году. Вышедший в 1957 году "Сборник теоретических работ по аэродинамике" [78] содержал 26 статей, из которых 7 (!) принадлежали Никольскому. Эта монография, которую в шутку стали называть "Сборником работ Никольского", сыграла заметную роль в развитии газовой динамики.

В 1960 году Никольский становится директором Института механики Академии наук СССР. В первое время он основывает новое издание — "Инженерный журнал", входит в составы редакционных коллегий других научных журналов, ведет интенсивную научную работу: 1961 год — девять печатных работ, 1962 год — пять, 1963 год — пять. Однако директорская должность не стала для сорокапятилетнего ученого sinecurой. Будучи по природе и по воспитанию высококонтактным человеком, не способным к угодничеству, лести и интригоплетению, Никольский мало подходил на руководящие должности.

Сначала Никольскому отказали в присуждении звания члена-корреспондента АН СССР, а затем вынудили уйти с директорского поста "по собственному желанию". Такова драма ученого. С 1965 по 1967 год Никольский заведует лабораторией Вычислительного центра АН СССР, а затем снова приходит в ЦАГИ и скоро занимает должность заместителя начальника того же второго отделения. В то время ученые этого определяющего лица ЦАГИ отделения перешли в другие отделения — институт в результате недальновидных политико-административных решений стал резко переориентироваться на ракетную тематику, проблемы авиации отошли на второй план. Перед Никольским встала задача поднять уровень теоретических исследований в отделении, и он взялся за разработку самого актуального для аэродинамики самолета направления — за теорию отрывных течений. Дело в том, что теории, не учитывающие отрыв потока от крыла самолета, находились в резком противоречии с результатами трубных и летных экспериментов. Возникла необходимость понять механизм отрыва — одного из самых сложных гидродинамических явлений. Из всех своих работ самыми главными Александр Александрович считал статьи по теории отрывных течений.

Второй период деятельности Никольского в ЦАГИ не был столь плодотворным, как первый. Сказался

возраст и неудачи в карьере, пришло осмысление происходящего...

Никольский страдал мерцательной аритмией сердца — той его формой, когда течение крови в сосудах становится непредсказуемым, турбулентным. Умер он от разрыва сердца 12 июня 1976 года.

**4.7.2. Время.** Своим рождением теоретическая гидродинамика, как и все точные науки, обязана Ньютону. Первую парадигму, как уже говорилось, выдвинул Л. Эйлер, построив математическую модель невязкого ламинарного течения. Вторая парадигма принадлежит Л. Навье и Дж. Стоксу — математическая модель ламинарного течения вязкой жидкости. Третья парадигма — модель турбулентности еще не построена.

История теоретической гидродинамики проста: первую парадигму изучали в XIX веке, вторую — в XX, третью изучают до сих пор. В школе ЦАГИ завершилась разработка первой парадигмы применительно к газовой динамике.

В 1950–1970 годы в отделении механики АН СССР главенствовал Л.И. Седов. Без его рекомендации практически нельзя было стать членом-корреспондентом АН СССР. Без ссылки на его книгу по теории размерности [79] трудно было опубликоваться в академических журналах по механике. Никольскому на это сразу же намекали. Сама по себе эта книга была написана на высоком научном уровне, но в ней вся роль в становлении теории размерности и теории автомодельных решений отводилась автору, не было ссылок ни на Э. Бакингема [80], одного из основоположников теории подобия, ни на Г. Гудерлея [81], основоположника теории одномерных автомодельных течений<sup>20</sup>.

В это время происходит бюрократизация научных и конструкторских предприятий военно-промышленного комплекса (ВПК). В условиях однопартийной системы и несменяемости кадров появился особый класс руководителей — партийная номенклатура. Ее сплоченные ряды составили несостоявшиеся ученые и преподаватели, бесперспективные бездарности и обаятельные жулики [54, 82]. Не было должной ротации кадров, дивергенции мнений и свободной циркуляции идей.

Проблема появления номенклатуры в тоталитарном обществе не нова: ее исследовали такие выдающиеся мыслители XX века, как английский экономист Ф. Хайек, американский социолог У. Липман, немецкий философ К. Ясперс и многие другие ученые.

К 1980-м годам выяснилось, что ЦАГИ не входит в сотню российских научных центров, имеющих наивысший индекс цитирования. В то далекое время деньги не считали, о рентабельности не задумывались. Дело дошло до того, что начальник ЦАГИ Г.П. Свищёв и его замы приступили к осуществлению проекта, равносильного по масштабу знаменитому повороту сибирских рек — строительству "второго ЦАГИ" под г. Ульяновском...

Непрофессионализм номенклатуры... Академик А.А. Дородницын предложил заменить аэродинамический эксперимент вычислительным, но, слава Богу, его не

<sup>20</sup> Как уже отмечалось, лорд Бакингом доказал так называемую л-теорему. Гудерлей впервые решил автомодельную задачу. Это была одномерная задача о сходящейся к центру цилиндрической или сферической ударной волне — так называемая автомодельная задача второго рода.



послушали. Он же создал "вычислительные центры" в ЦАГИ и в Академии наук, хотя тогда уже было ясно, что развитие вычислительной техники пойдет по пути ее персонализации. Никольский всегда был противником таких — возьмите следующее слово в кавычки! — идей.

Талантливый ученый и обаятельный человек, Никольский достойно представлял российскую науку за рубежом, будучи членом Президиума союза теоретической и прикладной механике (IUTAM) и поэтому "выездным" в условиях "железного занавеса". Он был лично знаком с крупнейшими гидродинамиками того времени Теодором фон Карманом, Клаусом Осватичем, известным издателем Максвеллом. Семья Никольского и Антонио Ферри дружили друг с другом. Выдающийся американский гидромеханик Милтон Ван-Дайк именно Александру Александровичу доверил редактирование перевода на русский язык своей ставшей классикой книги по асимптотическим методам [83]. Предисловие к ней заканчивалось словами: "Я не смог отразить в должной мере существенный вклад советских исследований в развитие предмета. К счастью, *мой давний друг* (курсив мой — С.Б.), профессор А.А. Никольский, напишет предисловие к переводу, и я надеюсь, что он сообщит также дополнительные сведения о работах советских ученых".

**4.7.3. Творчество.** Выдающийся русский механик А.А. Никольский всегда стоял на позициях строгой математики, строил математические модели на основе первых принципов механики, предпочитая аксиоматический подход эмпирическому. Он не был ни клавишником — вычислителем, ибо в то время еще не было вычислительных машин, ни эпсилонистом. Он владел асимптотологией на интуитивном уровне. Он не был хаотистом — тем, кто занимается проблемой хаоса, т.е. турбулентностью. До этих задач еще не дошли руки. Он был просто классиком. Ему выпала своя доля — завершить разработку такого раздела гидродинамики, как газовая динамика. Кроме того, он был разработчиком математических моделей сложных динамических явлений.

Рассмотрим некоторые фрагменты его творчества.

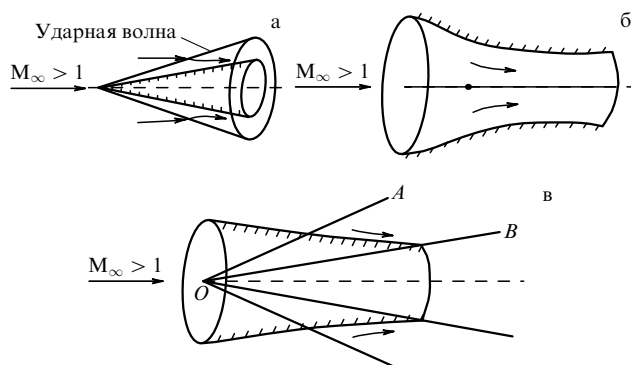
**Теорема Никольского–Таганова.** Эта теорема (ее еще называют *законом монотонности*), установленная в 1946 году, сегодня входит во все учебники по теории трансзвуковых течений.

*Если двигаться вдоль линии перехода так, чтобы область дозвуковых скоростей лежала слева, то вектор скорости будет монотонно поворачиваться по часовой стрелке.*

Опираясь на эту теорему, авторы установили то предельное значение числа Маха в набегающем потоке, после которого потенциальное течение с местной сверхзвуковой зоной становится невозможным.

Существует ли непрерывное трансзвуковое течение на крыловом профиле? Этот вопрос был решен в 1956–1958 годах уже упомянутой американкой К.С. Моравец [84].

**Сверхзвуковое коническое течение.** Сверхзвуковые конические течения открыл выдающийся немецкий ученый, ученик Прандтля А. Бузман [85]. Он исследовал два типа конических течений: обтекание конуса (рис. 12а) и течение в сужающемся сопле (рис. 12б). В обоих случаях он нашел точные решения, сделав следующее заключение:



**Рис. 12.** Сверхзвуковые конические течения: (а) обтекание конуса (Бузман, 1929), (б) течение внутри сужающегося сопла (Бузман, 1942), (в) обтекание хвостовой части осесимметричного тела (Никольский, 1946).

ние: "Существует лишь два типа конических осесимметричных течений: течение в сопле сжатия и течение вокруг осесимметрично обдуваемых конических вершин". Вопреки этому утверждению Бузмана Никольский в 1946 году открыл третий тип сверхзвукового осесимметричного конического течения — внешнее обтекание сужающейся части тела вращения между лучами  $OA$  и  $OB$  (рис. 12в). И тоже получил точное решение задачи.

В настоящее время исследование конических течений продолжается; исследования распространились на дозвуковой диапазон скоростей с учетом завихренности, закрутки и даже вязкости [86]. Остается неисследованной так называемая коническая турбулентность, т.е. хаотический режим конического течения.

**Оптимальное тело с протоком.** В рамках линейной теории Никольский в 1950 году нашел форму тела с протоком, обладающего минимальным внешним волновым сопротивлением в сверхзвуковом потоке. В этой работе впервые был применен оригинальный метод уменьшения числа независимых переменных за счет перехода к характеристическому контрольному контуру. Эта работа послужила идейным источником для исследований крыльев и тел вращения минимального сопротивления, проведенных его учениками и последователями: В.Н. Жигулевым, Ю.Л. Жилиным, М.Н. Коганом, Ю.Д. Шмыглевским [29].

В настоящее время теория оптимальных аэродинамических форм зашла в тупик. Дело в том, что еще не получено безэмпирическое решение задачи (уравнения Навье–Стокса) об обтекании тела заданной формы. Если быть последовательным, то следует признать, что теорию оптимальных форм следует разрабатывать только после того, как эта задача будет решена с помощью быстро развивающихся методов DNS или LES<sup>21</sup>. В этом смысле работа Никольского об оптимальном теле с протоком опередила время.

**Условия Никольского на проницаемых границах.** Чтобы уменьшить влияние стенок аэродинамической трубы на обтекание модели, особенно существенное при околосзвуковых скоростях, как уже говорилось, применяется перфорация. Для расчета течения газа вблизи проницаемой стенки требуется задание на ней гранич-

<sup>21</sup> DNS (Direct Numerical Simulation) — прямое численное моделирование; LES (Large Eddy Simulation) — численный расчет крупных вихрей.

ного условия. Никольский (1951) вывел такое условие в случае, когда стенка имеет продольные щели:  $u' = 0$ , где  $u'$  — возмущение продольной компоненты скорости. Условие Никольского означает, что возмущение давления на стенке постоянно. Тем самым показано, что в линейной теории воздействие на поток продольных щелей тождественно воздействию свободной границы. Работе Никольского об условиях на проницаемых границах посвящена четвертая глава книги [70].

Общий вид линейного граничного условия на проницаемых поверхностях ( $u' = kv'$ , где  $v'$  — возмущение поперечной компоненты скорости) известен априори, до решения задачи. Решение линейной задачи о течении газа вблизи проницаемой поверхности необходимо лишь для определения зависимости параметра  $k$  от числа  $M_\infty$  и от коэффициента проницаемости стенок. Символично, что полная линейная задача об обтекании профиля крыла в проницаемых границах решена Натальей Маревцевой, дочерью профессора Никольского [87].

Согласно современным воззрениям полная задача об обтекании тела, помещенного внутрь контура с мелко-масштабной проницаемостью, разделяется на внешнюю и внутреннюю [88]. Внешняя задача — это задача об обтекании тела с граничными условиями на проницаемых и непроницаемых участках стенки. Внутренняя задача — это задача о перетекании газа через проницаемую стенку; обтекаемое тело здесь отсутствует — оно как бы отодвинуто на бесконечность. Из решения внутренней задачи определяются граничные условия для внешней задачи, представляющие собой внешний предел внутреннего разложения. К сожалению, решение внутренней задачи до сих пор не получено.

**Уравнение Никольского или уравнение Биркгофа–Ротта?** Зададим форму вихревой пелены в плоскости  $xu$  в параметрическом виде:

$$z(\Gamma, t) = x(\Gamma, t) + iy(\Gamma, t),$$

выбрав в качестве параметра циркуляцию  $\Gamma$  куска вихревой пелены, отмеренного от некоторой фиксированной точки, где  $\Gamma = 0$ . Тогда уравнение эволюции плоской вихревой пелены<sup>22</sup> с течением времени  $t$  будет иметь такой вид:

$$\frac{\partial \bar{z}(\Gamma, t)}{\partial t} = \frac{1}{2\pi i} \int_0^\Gamma \frac{d\Gamma'}{z(\Gamma, t) - z(\Gamma', t)} + u_0(z, t), \quad (1)$$

где  $u_0$  — скорость, индуцируемая посторонними факторами, черта сверху означает комплексно сопряженную величину, интеграл понимается в смысле Коши.

Это интегродифференциальное уравнение называют уравнением Биркгофа–Ротта [90]. Его вывод при достаточно общих предположениях дал Г. Биркгоф в 1962 году, но использовалось оно Н. Роттом еще в 1956 году. Никольский независимо использовал уравнение (1) в 1957 году. Опоздал на один год, но еще ранее его применял Л. Антон (1939).

В настоящее время уравнение эволюции контактного разрыва выведено с учетом силы тяжести, разных

<sup>22</sup> С. Хокинг [89] считает, что каждая формула в популярной статье вдвое сокращает число читателей. Этот вывод не относится к читателям с математическим складом мышления — они легче понимают символы, чем слова.

Как говорил С.С. Аверинцев, "мы живем в эпоху, когда все слова уже сказаны". Однако формулы выписаны еще не все.

свойств соприкасающихся жидкостей, поверхностного натяжения и обобщено на случай пространственного движения [91]. Принципиально, что доказана некорректность задачи Коши для уравнения (1) и частное проявление некорректности — парадокс Мура, связанный с появлением сингулярности за конечное время [34, 90].

**Течение Никольского.** Если представить циркуляцию в виде  $\delta$ -функции, т.е. сосредоточить завихренность в точке, то интеграл в (1) исчезает, уравнение становится алгебраическим. В этом случае вихревые пелены заменяются точечными вихрями. Заслуга Никольского состоит не в том, что он предложил рассматривать течение с точечными вихрями — это много раз делали до него! — а в том, что он показал (1957) его пригодность для точного моделирования отрывного автомоделного течения при значении показателя автомоделности  $n = 1/2$ . Плоское течение Никольского описывает отрывное обтекание тела, начавшего при  $t = 0$  поступательное движение и аффинное расширение со скоростями, пропорциональными  $t^{-1/2}$  (рис. 13).

Пространственное стационарное течение Никольского описывает обтекание заостренных тел степенной формы [92]. На рисунке 14 представлено крыло степенной формы в плане и изогнутое по тому же степенному закону — так называемая *лыжа Никольского*.

В настоящее время численные методы позволяют рассчитывать эволюцию отходящей от тела автомоделной вихревой пелены при любых значениях показателя автомоделности  $n$ . Найденное Никольским вырожденное решение остается единственным решением этой задачи, полученным в замкнутой форме.

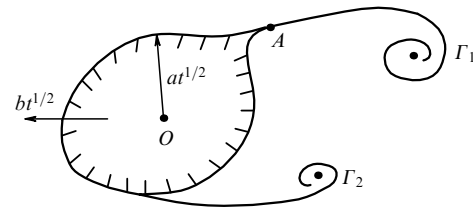


Рис. 13. Плоское течение Никольского:  $at^{1/2}$  — закон аффинного расширения,  $bt^{1/2}$  — закон поступательного перемещения,  $G_1$  — циркуляция точечного вихря, оторвавшегося от острой кромки  $A$ ,  $G_2$  — циркуляция точечного вихря, оторвавшегося от гладкой поверхности.

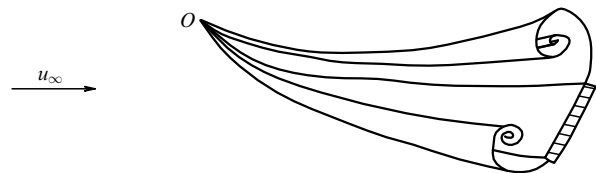


Рис. 14. Пространственное стационарное течение Никольского.

**Парадокс Никольского.** Никольский показал (1961), что при движении тела в ограниченном объеме вращающейся жидкости сила сопротивления пропорциональна не ускорению, как в незакрученной жидкости, и не скорости, как в безграничной жидкости, а пути (!), пройденному телом.

Нестационарное медленное движение тела во вращающейся жидкости связано с образованием столбов

Тейлора–Праудмена [93], что и приводит к парадоксальному поведению силы сопротивления. Детали такого феномена до сих пор неизвестны.

**Точные решения уравнения Больцмана.** Уравнение Больцмана для функции распределения  $f(x, y, z; u, v, w; t)$ , где  $x, y, z$  — координаты,  $u, v, w$  — скорости, имеет вид

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w \frac{\partial f}{\partial z} = I, \quad (2)$$

где  $I$  — интеграл столкновений.

Известные в то время точные решения этого уравнения соответствовали либо случаю постоянной макроскопической скорости газа  $\mathbf{u} = \text{const}$ , либо случаю его вращения как твердого тела. А.А. Никольский (1963) обнаружил непрерывную пространственно однородную группу преобразований

$$f = f_0 \left( 0, 0, 0; u - \frac{x}{t}, v - \frac{y}{t}, w - \frac{z}{t}; t \right), \quad (3)$$

редуцирующую уравнение (2) к упрощенному виду

$$\frac{\partial f_0}{\partial \tau} = I, \quad (4)$$

где новая переменная  $\tau$  является функцией только времени.

Проанализированы случаи, когда при  $t \rightarrow \infty$  распределение скоростей стремится к максвелловскому.

Преобразование Никольского (3) справедливо в случае  $\mathbf{u} = \mathbf{r}/t$ , где  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор. Течение называется слетом, если время выбрано в интервале  $-\infty < t \leq 0$ , и разлетом<sup>23</sup>, если время выбрано в интервале  $0 \leq t < \infty$ . Преобразование Никольского [94] придало новый смысл (точным) решениям уравнения (4). Однако практическое применение его ограничено, так как плотность и температура специальным образом зависят от времени.

Сейчас отношение к так называемым точным решениям двойное, особенно, если они получены интуитивно, с помощью озарения, а не с помощью мощного теоретико-группового анализа дифференциальных уравнений [95]. С одной стороны, всякое точное решение описывает точные свойства течения. С другой стороны, всякое точное решение, равно как и всякая интегрируемая система, не описывает турбулентного режима течения [96].

Выдающийся русский гидродинамик А.А. Никольский ушел в бессмертие в расцвете таланта, так и не дождавшись, когда Время догонит его.

## 5. Заключение

Во второй половине прошлого столетия в авиацию пришло новое поколение высококвалифицированных специалистов. Места соратников С.А. Чаплыгина заняли выпускники МГУ и МФТИ. Изменилась техника аэродинамического эксперимента, который стал комплексным, сочетающим трубный, натурный и компьютерный подходы. Расширилась тематика исследований. Так, В.И. Пономарев, проводивший исследования в рамках теории турбулентности, показал, что асимптотическая структура турбулентного пограничного слоя трехзонная [97]. Однако российская аэродинамика вместе с самой Россией вступила в полосу кризиса. Хотя в отличие от ученых-аэродинамиков авиаинженеры не уехали на

Запад в поисках счастья, произошла так называемая *внутренняя эмиграция* — молодые специалисты ушли в бизнес. Распалась связь времен, средний возраст российских авиаинженеров превысил критический.

Можно только гадать, возродится ли в России авиация, столь необходимая для возрождения страны...

Автор признателен В.П. Визгину (Институт истории естествознания и техники), М.А. Брутяну и В.С. Галкину (ЦАГИ) за полезные советы.

## Список литературы

- Капица С П, Курдюмов С П, Малинецкий Г Г *Синергетика и прогнозы будущего* (М.: Наука, 1997)
- Панарин А С *Россия в циклах мировой истории* (М.: Изд-во МГУ, 1999); *Ревани истории: российская стратегическая инициатива в XXI веке* (М.: Логос, 1998)
- Назаров М В *Тайна России: Историософия XX века* (М.: Русская идея, 1999)
- Бетяев С К *Вестн. Моск. ун-в. Сер. 7. Философия* (2) 49 (1999)
- Арнольд В И *Математические методы классической механики* (М.: Наука, 1989)
- Пригожин И, Стенгерс И *Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой* (М.: Прогресс, 1986)
- Batchelor G, in *Perspectives in Fluid Dynamics: A Collective Introduction to Current Research* (Eds G K Batchelor, H K Moffatt, M G Worster) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000)
- Вайнберг С *Первые три минуты: Современный взгляд на происхождение Вселенной* (М.: Энергоиздат, 1981)
- Педли Т *Гидродинамика крупных кровеносных сосудов* (М.: Мир, 1983)
- Баренблатт Г И, Монин А С *ДАН СССР* 246 834 (1979)
- Уайтхед А Н "Наука и современный мир", в кн. *Избранные работы по философии* (Под общ. ред. М А Кисселя; Сост. И Т Касавин) (М.: Прогресс, 1990)
- Гайденок П П *Прорыв к трансцендентному: Новая антология XX века* (М.: Республика, 1997)
- Гумилев Л Н *Этногенез и биосфера Земли* 2-е изд. (Л.: Изд-во ЛГУ, 1989)
- Носовский Г В, Фоменко А Т *Русь и Рим: Правильно ли мы понимаем историю Европы и Азии?* Кн. 1, 2 (М.: Олимп, 1997)
- Маршакова-Шайкевич И В *Вклад России в развитие науки: библиометрический анализ* (М.: Янус, 1995)
- Тойнби Дж *Постижение истории* (М.: Прогресс, 1996)
- Кара-Мурза С *Манипуляция сознанием* (М.: Алгоритм, 2000)
- Юкава Х *Лекции по физике* (М.: Энергоиздат, 1981)
- Гинзбург В Л *О физике и астрофизике* (М.: Наука, 1985)
- Николаева Н С *Япония — Европа. Диалог в искусстве. Середина XVI — начало XX века* (М.: Изобразительное искусство, 1996)
- Taylor G I *Scientific Papers*. Vol. 1–4 (Ed. G K Batchelor) (Cambridge: Univ. Press, 1958–1971)
- Lighthill J, in *Twentieth Century Physics* Vol. 1–3 (Eds L M Brown, A Pais, B Pippard) (New York: American Institute of Physics Press, 1995)
- Hussaini M Y (Ed.) *Collected Papers of Sir James Lighthill* Vol. 1–4 (New York: Oxford Univ. Press, 1997)
- Самолетостроение в СССР, 1917–1945 гг.* Кн. 1, 2 (Под ред. Г С Бюшгенса) (М.: Изд-во ЦАГИ, 1992, 1994)
- Бюшгенс Г С, Бедржицкий Е Л *ЦАГИ — центр авиационной науки* (М.: Наука, 1993)
- ЦАГИ — основные этапы научной деятельности, 1968–1993* (Под ред. В Я Нейланда и др.) (М.: Наука. Физматлит, 1996)
- Чаплыгин С А *Избранные труды* (М.: Наука, 1976) с.138
- Кувшинов С В, Соболев Д А *ВИЕТ* (1) 103 (1995)
- Теория оптимальных аэродинамических форм* (Под ред. А Миеле) (М.: Мир, 1969)
- Джонс Р Т *Теория крыла* (М.: Мир, 1995)
- Кюхеман Д *Аэродинамическое проектирование самолетов* (М.: Машиностроение, 1983)
- Газовая динамика* Сб. докладов (Под ред. Н А Слезкина) (М.: ОНТИ, 1939)
- Струминский В В *Аэродинамика и молекулярная газовая динамика* (М.: Наука, 1985)
- Фриш У *Турбулентность. Наследие А.Н. Колмогорова* (Сер. "Библиотека Математика", Вып. 4) (М.: ФАЗИС, 1998)
- Авиация. Энциклопедия* (Под ред. Г П Свищева) (М.: Большая Российская Энциклопедия, Изд-во ЦАГИ, 1994) с. 9
- Whitcomb R T, NASA TND-8260 (1976)

<sup>23</sup> Сегодня вместо слет–разлет говорят коллапс–взрыв.

37. Бетяев С К, в сб. *Численные методы механики сплошной среды* Т. 9. Вып. 5 (Отв. за вып. А Н Валиуллин) (Новосибирск: ИТПМ, ВЦ СО АН СССР, 1978) с. 28
38. Френкель В Я, Явелов Б Е *Эйнштейн: изобретения и эксперимент* 2-е изд. (М.: Наука, 1990)
39. Эшли Х, Лэндал М *Аэродинамика крыльев и корпусов летательных аппаратов* (М.: Машиностроение, 1969)
40. Whitcomb R T, NASA RM-L52H08 (1952); <http://nasa.larc.nasa.gov/reports/1952/nasa-rm-152h08/nasa-rm-152h08.pdf>
41. Башкин В А *Треугольные крылья в гиперзвуковом потоке* (М.: Машиностроение, 1984)
42. Мусский С А *100 великих чудес техники* (М.: Вече, 2001)
43. Фершинг Г *Основы аэроупругости* (М.: Машиностроение, 1984)
44. Сохоцкий Ю В *Об определенных интегралах и функциях, употребляемых при разложении в ряды* (СПб., 1873)
45. Фридман А А *Избранные труды* (М.: Наука, 1966)
46. Колмогоров А Н *Избранные труды* Кн. 1 *Математика и механика* (Отв. ред. С М Никольский; Сост. В М Тихомиров) (М.: Наука, 1985)
47. Борисов В П *Природа* (8) 61 (2000)
48. *Русское зарубежье. Золотая книга эмиграции. Первая треть XX в.* Энциклопедический биографический словарь (Под общ. ред. В В Шелохаева) (М.: РОССПЭН, 1997)
49. Чаплыгин С А *О газовых струях* (М.-Л.: ГИТТЛ, 1949)
50. Лойцянский Л Г *Из моих воспоминаний: Записки профессора-политехника* (СПб.: Б.С.К., 1998)
51. Монин А С, Полубаринова-Кочина П Я, Хлебников В И *Космология, гидродинамика, турбулентность: А.А. Фридман и развитие его научного наследия* (М.: Наука, 1989)
52. Монин А С, Яглом А М *Статистическая гидромеханика* Т. 1, 2. 2-е изд. (СПб.: Гидрометеоиздат, 1992, 1996)
53. *Явление чрезвычайное. Книга о Колмогорове* (Под общ. ред. В М Тихомирова; Сост. Н Х Розов) (М.: ФАЗИС, МИРОС, 1999)
54. Грэхэм Л Р *Очерки истории российской и советской науки* (М.: Янус-К, 1998)
55. Арнольд В И *Матем. образование* (2) 109 (1997)
56. Халмош П Р *УМН* 26 (5) 243 (1971)
57. Голованов Я К *Королев: факты и мифы* (М.: Наука, 1994)
58. Челомей В Н *Избранные труды* (М.: Машиностроение, 1989)
59. Стражева И В, Буева М В *Борис Николаевич Юрьев* (Отв. ред. Л Г Иосифьян) (М.: Наука, 1980)
60. Юрьев Б Н *Избранные труды* Т. 1, 2 (М.: Изд-во АН СССР, 1961)
61. Юрьев Б Н *Экспериментальная аэродинамика* Ч. 1, 2 (М.: Оборонгиз, 1939)
62. Мартынов А К *Записки научного работника ЦАГИ* (М.: Изд-во ЦАГИ, 2001)
63. Мартынов А К *Прикладная аэродинамика* (М.: Машиностроение, 1972)
64. Христианович С А *Избранные работы: речная гидравлика, теория фильтрации, аэродинамика и газовая динамика, горное дело, теория пластичности, энергетика* Т. 1, 2 (М.: Наука, Изд-во МФТИ, 1998, 2000)
65. Франкль Ф И *Избранные труды по газовой динамике* (М.: Наука, 1973)
66. Франкль Ф И, Христианович С А, Алексеева Р Н *Труды ЦАГИ* (364) (1938)
67. Франкль Ф И, Карпович Е А *Газодинамика тонких тел* (М.-Л.: ОГИЗ, 1948)
68. Коул Дж, Кук Л *Трансзвуковая аэродинамика* (М.: Мир, 1989)
69. *Владимир Васильевич Струминский* (Материалы к библиографии ученых. Сер. технических наук. Механика, Вып. 21, Сост. Р И Горячева, Р Н Клейменова) (М.: Наука, 1993)
70. Гродзовский Г Л, Никольский А А, Свищёв Г П, Таганов Г И *Сверхзвуковые течения газа в перфорированных границах* (М.: Машиностроение, 1967)
71. Гродзовский Г Л, Авт. свид. № 9614 (1947)
72. Фабер Т Е *Гидроаэродинамика* (М.: Постмаркет, 2001)
73. Гродзовский Г Л *Труды ЦАГИ* (1750) (1976)
74. Гродзовский Г Л, Иванов Ю Н, Токарев В В *Механика космического полета. Проблемы оптимизации* (М.: Наука, 1975)
75. Gray R В "Vortex-modeling for rotor aerodynamics — the 1991 Alexander Nikolsky lecture" (presented at the 47 Annual Forum of the American Helicopter Society, Phoenix, Az., USA, May 1991) *J. Am. Helicopter Soc.* 37 (1) 3 (1992)
76. Никольский А А *Теоретические исследования по механике жидкости и газа* (М.: Изд-во ЦАГИ, 1981)
77. Ладыженский М Д *Пространственные гиперзвуковые течения газа* (М.: Машиностроение, 1968)
78. *Сборник теоретических работ по аэродинамике* (Под ред. Б А Ушакова) (М.: Оборонгиз, 1957)
79. Седов Л И *Методы подобия и размерности в механике* (М.: Наука, 1977)
80. Buckingham E *Phys. Rev.* 4 345 (1914)
81. Зельдович Я Б, Райзер Ю П *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений* 2-е изд. (М.: Наука, 1966)
82. Ракитов А И *Вопр. филос.* (3) 13 (1995)
83. Ван-Дайк М *Методы возмущений в механике жидкости* (М.: Мир, 1967)
84. Morawetz C S *Commun. Pure Appl. Math.* 11 315 (1958)
85. Буземан А В, в сб. *Газовая динамика* (Под ред. С Г Попова, С В Фальковича) (М.: ИЛ, 1950) с. 197
86. Fernandez-Feria R et al. *Q. J. Mech. Appl. Math.* 52 (1) 1 (1999)
87. Маревцева Н А *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа* (2) 111 (1980)
88. Бетяев С К *Математические начала моделирования в гидродинамике* (М.: Изд-во ЦАГИ, 1993)
89. Хокинг С *Краткая история времени: от большого взрыва до черных дыр* (СПб.: Амфора, 2000)
90. Saffman P G *Vortex Dynamics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992)
91. Pullin D I *Annu. Rev. Fluid Mech.* 24 89 (1992)
92. Бетяев С К, Гайфуллин А М *Спиральные вихри* (М.: Изд-во ЦАГИ, 2001)
93. Бэтчелор Дж *Введение в динамику жидкости* (М.: Мир, 1973)
94. Truesdell C, Muncaster R G *Fundamentals of Maxwell's Kinetic Theory of a Simple Monatomic Gas* (New York: Academic Press, 1980)
95. Овсянников Л В *Групповой анализ дифференциальных уравнений* (М.: Наука, 1978)
96. Малинецкий Г Г, Потапов А Б *Современные проблемы нелинейной динамики* (М.: Эдиториал УРСС, 2000)
97. Пономарев В А *Уч. зап. ЦАГИ* 6 (3) 42 (1975)

### On the history of fluid dynamics: Russian scientific schools in the 20th century

S.K. Betyaev

*N E Zhukovskii Central Aerohydrodynamics Institute (TsAGI)*  
140180 Zhukovskii-3, Moscow Region, Russian Federation  
Tel. (7-095) 556-43 88

The design of wind tunnels, isolated wings and flying and non-flying vehicles is examined from a historical perspective. Great aerodynamic ideas, both those already put and those yet to be put into practice, are discussed. The history of theoretical fluid dynamics in Russia is presented as that of four scientific schools, those of Zhukovskii, Fridman, and Kolmogorov; and TsAGI.

PACS numbers: 01.65. + g, 47.10. + b, 47.85.Gj

Bibliography 97 — references

Received 4 December 2002