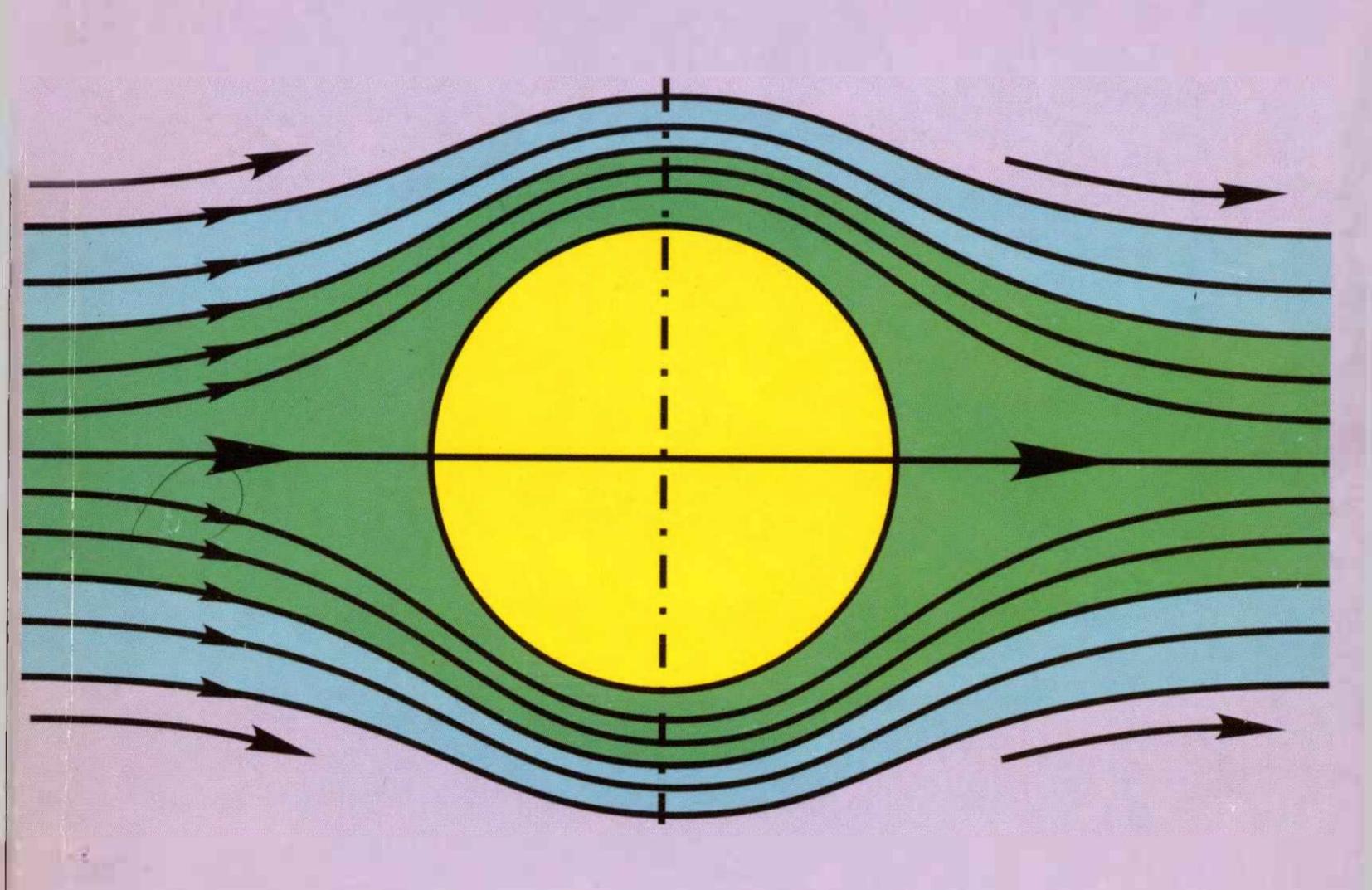
I. A. TOKATN



MEXAHNRN TEKYUNX CPED

Отсканировано в апреле 2015 года специально для эл. библиотеки паблика «Бæрзæфцæг» («Крестовый перевал»).

Скангонд æрцыд 2015 азы апрелы сæрмагондæй паблик «Бæрзæфцæг»-ы чиныгдонæн.

http://vk.com/barzafcag

A History and Philosophy of Fluid Mechanics

G. A. TOKATY

Emeritus Professor of Aeronautics and Space Technology
THE CITY UNIVERSITY, LONDON

DOVER PUBLICATIONS, INC.
New York

Северо-Осетинский научный центр

Г.А.ТОКАТИ

История и философия механики текучих сред

Владикавказ

Токати Г.А.

История и философия механики текучих сред.— Владикавказ: Северо-Осетинский научный центр, 1999 –296 с.

Переводчик А. И. Федоров Редактор В. Н. Дятлов Корректор Е. В. Натрошвили

ISBN 5-93000-006-9

[©] Г.А.Токати

[©] Перевод. Институт прикладной математики и информатики СОНЦ

Предисловие к русскому изданию

Вселенский мир, единый из всего, не создан никем и не имеет ни начала, ни конца. В наиболее общем определении он состоит из множества форм существования материи в никогда не прекращающемся движении в пространстве. Всё течёт и всё изменяется в этом процессе.

Одна группа древнегреческих натурфилософов считала, что флюиды вообще, и вода в частности, были основополагающим материалом вселенского мира. Другая группа натурфилософов выступила с теорией, что первокирпичиком этого материала был атом...

Разговаривая на эти темы, у себя дома в Париже, знаменитый русский академик Димитрий Павлович Рябушинский (1882-1962), незадолго до своей кончины, в тоне шутки спросил: А почему бы нам с Вами, Григорий Александрович, не попытаться написать историю и философию флюидмеханики от Икара до Гагарина?

Так родилась идея под этим названием. Но реальная история шагала быстрее: Вечер Без Завтра, ВБЗ, опередил Димитрия Павловича скоропостижно. А я как раз в это время оказался погруженным в дела более неотложные. Замысел четырёхтомного труда не успел продвинуться вперёд сколько-нибудь далеко, как перестал получать внимание. Я собрал в папку успевшие накопиться материалы и попросил профессора Теодора фон Кармана просмотреть их. Его совет был быстрым и кратким: опубликовать читаемые части папки в качестве введения, а к остальным томам возвратиться после более срочных дел.

Мне остаётся добавить только, что история науки и технологии не знает ещё вполне удовлетворительных книг о себе; не имеет таких претензий и замысел пятитомного труда под названием История Авиации и Ракетии, работа над которым возобновилась.

Инициатива русского издания Истории и Философии Флюид-Механики целиком принадлежит владикавказскому профессору математики, автору ряда книг и статей по функциональному анализу и соавтору значительного труда Нестандартные методы анализа, которому выражаю свою признательность из далека.

gatoraty

Г.А. Токати, Лондон, Англия, 4-го октября 1999г.

Содержание

Предисловие	6
Основные определения	7
Текучие среды и жизнь	9
Вода и воздух	11
Первые применения текучих сред	16
Мифология и жидкости	21
Платон и текучие среды	23
Аристотель и наука о текучих средах	26
Рождение статики текучих сред	32
Герон Александрийский	38
Через Темные Века — к Возрождению	42
Общие замечания о Леонардо да Винчи	45
Оригинальные работы Леонардо да Винчи	
о текучих средах	49
Леонардо и механика текучих сред	56
Симон Стевин (1548-1620)	65
Галилео Галилей (1565–1642)	69
Эванджелиста Торричелли (1608-47) и Отто фон Герике (1602-86)	74

Блез Паскаль (1623-62)	78
Сэр Исаак Ньютон (1642-1727)	83
Даниил Бернулли (1700-82)	91
Леонард Эйлер (1707-83)	95
Луи де Лагранж (1736–1813)	100
Жан Лерон Даламбер (1717-83)	104
Шевалье де Борда (1733-99) и др.	107
Шези, Дюбуа, Кулон, Гаген, Пуазейль и Жирар .	110
Клод Луи М. А. Навье (1785-1836)	114
Рождение экспериментальной механики текучих сред	116
Бенджамин Робинс (1707-51) и Леонард Эйлер (1701-83)	123
Лазар Карно (1753-1823), Пьер Симон де Лаплас (1749-1827) и др.	129
Огюстен Луи Коши (1789-1857) и другие	134
Герман фон Гельмгольц (1821-94) и другие	137
Осборн Рейнольдс (1842–1912)	144
Михаил Ломоносов (1711-65) и другие	151
Русская школа научной мысли	156
Константин Циолковский (1857-1935)	161
Николай Егорович Жуковский (1847-1921)	165
Фредерик Ланчестер (Frederick Lanchester, 1878-1946) и другие	169
Теория несущей линии Прандтля — Ланчестера	174
Рули Флеттнера	177
Роторное судно Флеттнера	185

Роторная ветряная мельница Флеттнера	192
Авторотирующие тела	194
Рябушинский, Маллок, Бенар, фон Карман	208
Вильям Фруд (1810-79) и другие	212
Турбулентный пограничный слой и срыв потока .	217
Методы, задерживающие срыв потока	220
Воздушные винты	224
Внутреннее строение текучих сред	234
Скорость звука	238
Эрнст Мах (1838-1916) и другие	241
Метод Чаплыгина — Христиановича	247
Стена сопротивления	255
Околозвуковые эффекты сжимаемости	
при подъеме	262
Дальнейшие замечания об околозвуковой	
аэродинамике	26 9
Дальнейшие замечания о сверхзвуковой механике	
текучих сред: сверхтекучесть	274
Гиперзвуковая газодинамика	279
Всеобщая непрерывность вещества и энергии	286
Авторский указатель	292

Предисловие

Первое издание этой книги разошлось в два месяца. Инициатива этого (второго) издания исходит от издательства Dover Publications, Inc.; я приветствую это.

Кроме небольших технических исправлений книга не изменилась. Ее основная идея остается прежней и может быть высказана следующим образом.

Ученый должен прислушиваться к любому разумному предложению и судить объективно. Он не должен верить видимостям, иметь излюбленные гипотезы, принадлежать к неизменной школе мышления или иметь наставника в своем познании. Он должен всегда помнить, что прогрессу науки часто препятствовало тираническое влияние догм.

Любой, кто когда-либо стремился к столь благородной цели, знает, насколько трудна такая задача. Но если автору этой книги удалось хотя бы отчасти достигнуть этого идеала, он почувствует себя счастливым.

Г. А. Т.

Лондон

Основные определения

Наука — это упорядоченное, систематическое знание, опирающееся на теоретический анализ, наблюдение и эксперимент. Наука, или совокупность наук, имеющая целью изучение и овладение материальным миром в интересах человечества, называлась (а иногда все еще называется) натуральной философией. Ее методами были и остаются общая логическая дедукция, научная гипотеза, наблюдение, эксперимент, сравнение, анализ, синтез и т. д. Но во всех этих методах, в той или иной степени и форме, играет роль математика: натуральная философия и математика неотделимы, как живая клетка и вода.

Есть два вида математики: чистая математика, изучающая абстрактные числа, отношения, соотношения, фигуры, функции, вырабатывающая и формулирующая абстрактные методы и теоремы математической философии и логики, составляя общую математическую культуру, и прикладная математика, занимающаяся изучением физического, технического, биологического, химического и социологического мира. Иначе говоря, прикладная математика есть система, использующая вдобавок к чисто математическим концепциям пространства и числа также понятия времени и материи. В нее входят механика твердых и деформируемых тел, теория упругости и пластичности, термодинамика и биоматематика, статистика и т. д. В узком смысле прикладная математика означает использование понятий и теорем чистой математики в задачах механики, которую можно определить как математическую теорию движений и обусловливающих эти движения причин, изучающую движения частиц и систем частиц, подчиненных связям, движения масс и действие сил, вызывающих и изменяющих эти движения.

Математическая структура механики (т. е. ее интегродифференциальные формы) восходят главным образом к Леонарду Эйлеру (1707–83), Жозефу Луи де Лагранжу (1736–1813) и Вильяму Роуану Гамильтону (1805–65); в этом смысле ее часто называют теоретической механикой, или аналитической механикой. Не следует, впрочем, делать поспешное заключение, будто теоретическая (аналитическая) механика есть нечто отличное или независимое от механики в общем значении этого слова.

Французское слово fluide и его английский эквивалент fluid проис-

ходят от глагола «течь» (to flow) и обозначают «то, что течет», т. е. вещество, частицы которого могут двигаться с полной свободой («идеальные текучие среды») или с ограниченной свободой («реальные текучие среды»). Отрасль механики, или прикладной математики, изучающая законы движения и причины движения текучих сред, называется механикой текучих сред. Если она занимается главным образом или исключительно жидкостями, то есть когда «текучая среда» означает «жидкость» (в большинстве случаев «воду»), механика текучих сред превращается в механику жидкостей, или гидромеханику¹⁾. Если «текучая среда» означает «газ» (в большинстве случаев «воздух»), механика текучих сред превращается в механику газов, или аэромеханику²⁾.

Гидромеханику, в свою очередь, можно подразделить на гидродинамику, гидравлику и гидростатику. Главная цель гидродинамики³⁾ состоит в установлении связей между кинематическими⁴⁾ элементами движения, или потока, и силами, вызывающими или поддерживающими его. Гидравлика⁵⁾ изучает законы движения жидкостей в трубах, трубопроводах, патрубках, каналах и других инженерных устройствах; как правило, ее методы основаны на основных понятиях и теоремах гидродинамики. Гидростатика⁶⁾ занимается равновесием покоящихся жидкостей.

Когда «текучая среда» означает «воздух» или «аег» (более общим образом, «газ»), механика текучих сред превращается в аэромеханику. Эта последняя подразделяется на аэростатику, теоретическую аэродинамику, экспериментальную аэродинамику и механику полета. Аэростатика⁷⁾ изучает законы равновесия воздуха и других покоящихся газов. Теоретическая аэродинамика⁸⁾ — это наука о движении газов в смысле Эйлера — Лагранжа — Гамильтона, т. е. применяющая законы, теоремы, аксиомы и общие теоретические концепции аналити-

¹⁾ hydor = вода + mechanike (наука о движении).

²⁾ aer = воздух + mechanike (наука о движении).

³⁾ hydor = вода + dynamikos (сила).

⁴⁾ kinematos = движение.

 $^{^{5)}}$ hydor = вода + aulos (труба).

⁶⁾ hydor = вода + statikos (равновесие).

⁷⁾ aer = воздух + statikos (равновесие).

⁸⁾ aer = воздух + dynamikos (сила).

ческой (теоретической) механики к изучению воздушных или газовых потоков под действием сил; роль этих методов в аэромеханике аналогична роли гидродинамики в механике жидкостей. Главная цель теоретической аэродинамики — установление теоретико-аналитических соотношений между динамическими, кинематическими и термодинамическими характеристиками газовых потоков.

Экспериментальная аэродинамика проверяет теории, уравнения и формулы теоретической аэродинамики с помощью лабораторных экспериментов и корректирует их, вводя полученные из опыта коэффициенты. Экспериментальная аэродинамика нередко добивается успехов и в тех случаях, когда теоретическая аэродинамика не приводит к цели.

Механика текучих сред вырабатывает общие уравнения полета и определяет необходимую скорость воздушного потока и мощность, характеристики набора высоты, посадки и взлета, дальность и продолжительность полета, критерии устойчивости и управления и т. п. Во всем этом широко используются теории, теоремы и основные понятия почти всех отраслей механики.

Наконец, совсем новое понятие «воздушно-космической науки» ('Aerospace') охватывает аэронавтику и космонавтику, или космическую технику. Аэронавтика⁹⁾ — это общее название всех аспектов и задач полета в пределах земной атмосферы. Космонавтика¹⁰⁾ охватывает все аспекты и задачи полета вне атмосферы; ее можно определить как науку о движении ракет, спутников и космических кораблей вне атмосферы.

Текучие среды и жизнь

Насколько важны для жизни текучие среды? Приведем несколько примеров. Люди, животные и растения буквально построены на воде. Каждая живая клетка вашего тела имеет текучее содержимое — поддерживающий жизнь водный раствор различных веществ; человеческая кровь более чем на девять десятых состоит из воды; в целом все тело человека содержит по весу около 71% воды — и эта вода, испаряющаяся и стекающая с поверхности тела, должна постоянно вос-

 $^{^{9)}}$ aer = воздух + nautes (навигация).

¹⁰⁾ kosmos = мир + nautes (навигация). (Прим. пер.: в подлиннике Astronautics (астронавтика), от astron = звезда + nautes (навигация)).

полняться, чтобы тело могло оставаться живым. Каждый год человек пропускает через свою глотку в пять раз больше воды, чем весит его тело; к моменту своей смерти, при нормальной продолжительности жизни, он успевает выпить около 6500 галлонов воды¹¹⁾.

Рассмотрим материю также с другой точки зрения. Пустыня засушлива. Солнце, другой источник жизни, убивает там почти все живое. В течение часа оно отдает каждому квадратному ярду пустыни более 800 больших калорий — большая калория представляет количество тепла, необходимое для нагрева 2,2 фунта воды на один градус Цельсия. В раскаленном песке пустыни можно испечь яйцо. Пустыня Кара-Кум в Средней Азии занимает почти 150000 квадратных миль. Ее поверхность получает огромное количество солнечной энергии. Но пресная вода здесь редка или вовсе отсутствует, хотя прямо под жаждущими ее пастбищами лежат целые моря соленой воды. По пустыне бродят стада выносливых овец (три миллиона голов). Число их могло бы возрасти, если бы хватало пресной воды. Легко представить себе, какие экономические преимущества принесла бы ирригация этой пустыни.

Подсчитано, что нужно всего лишь 1,3 кубических ярдов воды, чтобы произвести 8 фунтов шерсти, около 17 пинт молока, до 22 фунтов мяса, или чтобы вырастить 4 унции хлопка¹²). Неудивительно, что Советский Союз¹³) решил обуздать эту солнечную энергию, и теперь в сердце пустыни строится внушительный комплекс, состоящий из дистилляторов (каждый размером свыше 700 квадратных ярдов), железобетонных резервуаров вместимостью в 740 кубических метров воды, колодца, водопроводных труб, солнечных электрогенераторов, водоотводных желобов и т. д.

Это отчаянное, но необходимое усилие. Может быть, усилия такого рода убедят людей, что вода и воздух слишком необходимы для всех видов интересующей их жизни, чтобы ими можно было варварски пренебрегать. Например, кажется неправдоподобным, что в том же Советском Союзе ежедневно закачивают в источники пресной воды

¹¹⁾ Kenneth S. Davis, John A. Day. Water — the mirror of science (Вода — зеркало науки). New York: Anchor Books, Garden City, 1961.

¹²⁾ Cnymnun, июнь 1969. Москва.

¹³⁾ Вместо «Советский Союз», который, разумеется, в этом качестве более не существует, надо читать «бывший Советский Союз», а вместо «СССР» — «бывший СССР». (Прим. автора, 1994).

миллионы кубометров сточных вод, делая эти источники почти бесполезными. Даже в СССР, стране с плановой экономикой, которую нельзя считать поэтому самой расточительной страной в мире, ежегодно спускают в реки около 3 000 000 тонн кислот, 2 000 000 тонн нефтепродуктов, 1 000 000 тонн жиров, сотни тысяч тонн солей, волокнистых масс и металлов.

В Соединенных Штатах (несомненно, самой расточительной из всех стран) целые реки и озера загрязняются до такой степени, что их нельзя больше использовать для питья или купания. Ежегодные отходы Америки (значительная часть которых попадает в реки и озера) включают около 142 миллионов тонн дыма и испарений, 7 миллионов тонн частей автомобилей, 20 миллионов тонн макулатуры, 48 миллиардов тонн жестяных банок, 26 миллиардов тонн бутылок и стеклянных банок, 3 миллиардов тонн каменного мусора и металлических обрезков, и 50 триллионов тонн горячей воды.

Но человек портит не только воды Земли. Может быть, вы слышали о необычных «смогах» в Лос-Анджелесе и Лондоне. В действительности они существуют в любом промышленном центре. Сжигание ископаемого топлива в течение столетия увеличило содержание двуокиси углерода в атмосфере на одну десятую, а к двухтысячному году ее возрастание может достигнуть четверти: это было бы катастрофой для погоды и климата, серьезно угрожающей всем формам жизни.

При тщательном анализе оказывается, что «Битва за текучие среды», за их защиту и против их разрушения, тоже основывается на законах механики текучих сред. Поэтому, как можно предположить, знание истории этого предмета важно также в том отношении, что оно поможет нам хотя бы минимизировать, если не совсем предотвратить, ущерб, причиняемый атмосфере и водным ресурсам. Для этого надо понять, что именно терпит ущерб или нуждается в защите, и прежде всего надо знать состав самих текучих сред.

Вода и воздух

Состав воды был предметом интенсивного изучения с самого возникновения химии и физики. Вряд ли возможно сказать, кто и когда в точности начал этим заниматься. Единственное, что мы знаем наверное, это что уже Герон Александрийский пытался узнать, почему

вода кипит и производит пар. Этот период механики текучих сред мы рассмотрим дальше.

В 1895 г. Э. В. Морли из Университета Западного Резерва*) в Кливленде, штат Огайо, сообщил, что весовое отношение кислорода к водороду в воде составляет 7,9395: 1, а отношение объемов — 1: 2,00288. В 1916 г. Ф. П. Берт и Э. Ч. Эдгар (Англия) полагали на основании своих экспериментов, что наиболее точное весовое отношение равно 7,9387: 1. Современное значение, принятое Комитетом атомных весов Международного химического союза, равно 15,9994/2:1,00797.

Вода может находиться в двух главных состояниях: твердом (лед) и жидком (вода). Иными словами, при атмосферном давлении лед плавится (превращается в воду) при 0°С. Если вода чиста, в особенности не содержит растворенных газов, ее можно нагреть без кипения до 100°С и даже выше. Но при нормальных условиях 100°С есть «точка кипения», т. е. при этой температуре образование пара становится столь интенсивным, что он занимает объем в 1700 раз больше объема воды.

Под «одной атмосферой» понимается давление, производимое атмосферой вследствие гравитационного притяжения столба воздуха, расположенного прямо над точкой, где измеряется давление. Одна атмосфера = 760 мм Нg. При давлении 770 мм точка испарения находится в 100,366°С, при 750 мм — в 99,360°С, при 740 мм — в 99,255°С, при 730 мм — в 98,877°С, при 388 мм — в 81,75°С, при 76 мм — в 46,15°С, при 1520 мм — в 120,65°С, при 7 600 мм — в 180,55°С. Разумеется, Нg означает здесь латинское название элемента ртути Ну-drargyrum, с атомным весом 200,59, атомным номером 80, точкой плавления —38,87°С, точкой испарения 356,585°С. Ртуть представляет собой серебристо-белый жидкий металл, единственный металл, остающийся жидким при комнатной температуре. Он широко используется в измерительных приборах механики текучих сред (например, в манометрах) вследствие своих замечательных свойств; упомянем одно из них, столь важное в манометрии: он не смачивает стекла.

Из других физических характеристик воды и текучих сред вообще важнейшей является плотность. Количество массы на единицу объема

^{*)} Western Reserve University. В Соединенных Штатах устраивались специальные учебные заведения для офицеров резерва. — Прим. перев.

есть плотность массы ρ ; вес на единицу объема есть плотность веса γ . Эти величины связаны равенством $\gamma = \rho g$, где g — ускорение силы тяжести. Величины ρ и γ различны для разных текучих сред и зависят от температуры, как это видно из следующей таблицы:

Жидкость	Температура	γ, κ г/ м ³	ρ , kr.cek ² /m ⁴
Вода	15	999	102
Морская вода	15	1020	104
Ртуть	15	13595	1385
Касторовое масле	o 15	970	99
Парафин	15	790-820	81-84
Бензин	15	680-720	69-73
Ацетон	20	790	80,5
Бензол	0	900	91,9
Пиво	_	1 040	106
Хлороформ	18	1 480	151
Метиловый спир	r 0	. 800	81,5
Алкоголь	15	790	80,5
Нефть	19	760–900	78-92

Природные воды могут быть загрязнены нерастворимыми взвешенными веществами, растворимыми неорганическими веществами, растворимыми органическими веществами. В океанах, морях и соленых озерах вода содержит главным образом хлористый натрий с небольшими количествами кальция, магния, калия, а также сульфатов, карбонатов и ряда других элементов в меньших концентрациях.

Перейдем к воздуху. Под воздухом понимается вся масса земной атмосферы, процентный состав которой может быть представлен сле-

дующей таблицей:

Азот	78,08
Кислород	20,95
Аргон	0,93
Двуокись углерода	0,03

и некоторые другие газы. Все эти данные относятся к так называемому сухому воздуху, то есть воздуху, из которого удален весь водяной пар.

Хотя воздух состоит из различных газов, в большинстве случаев он рассматривается как однородный газ. Каковы главные физические характеристики этого газа по сравнению с другими газами? Ответом служит следующая таблица:

Газ	Давление	γкг/м ³	ρ кг.сек $^2/$ м 4
Воздух	760 мм	1,188	0,121
Кислород	760 мм	1,312	0,134
Водород	760 мм	0,0827	0,00813
Гелий	760 мм	0,164	0,0167
Азот	760 мм	1,151	0,1174

Как показывает повседневный опыт, все текучие среды способны производить давление. Чтобы погрузить руку в воду и двигать ее в ней, вам понадобится некоторое усилие. Это усилие значительно меньше, если то же делается в атмосфере или в любом газе, поскольку их плотность гораздо меньше. Воздушный насос непосредственно демонстрирует, что покоящаяся атмосфера производит давление. Один из самых простых экспериментов этого рода состоит в том, что выкачивают воздух из тонкостенного стеклянного сосуда; когда разрежение достигнет известного уровня, зависящего от сопротивления стекла, давление внешнего воздуха разламывает сосуд. Давление движущегося воздуха иллюстрируется такими примерами, как вращение ветряной мельницы, плавание парусного корабля и другими общеизвестными фактами.

Все такие вещества, как вода, нефть, ртуть, пар, воздух и всевозможные другие газы, являются текучими средами, но чтобы прийти к

определению, позволяющему назвать некоторое вещество текучей средой, мы должны найти свойство, общее для всех этих различных видов материи и не зависящее от характеристик, отличающих их друг от друга. Это свойство состоит в крайней подвижности их частиц и в легкости, с которой эти частицы могут быть отделены от массы вещества и друг от друга. Иными словами, текучая среда — это вещество, частицы которого очень легко отделимы от всей его массы.

Газы (например, воздух) могут быть легко сжаты действием обычных сил, и когда сжимающая сила удаляется или уменьшается, расширяются в объеме. Жидкости в действительности тоже сжимаемы, но, как показали эксперименты Кантона в 1765 г., Перкинса в 1819 г., Эрстеда в 1823 году, Колладона и Штурма в 1829 году и других, сжимаемость их очень мала¹⁴).

Давление покоящейся жидкости полностью зависит от ее веса и от приложения некоторой внешней силы, тогда как давление газа, хотя изменяющееся под действием тяготения, главным образом зависит от его объема и температуры. Упругость атмосферного воздуха иллюстрируется действием обычного шприца. Если поршень шприца вытянут и его отверстие заткнуто, то требуется значительное усилие, чтобы продвинуть поршень более чем на малую долю его хода, а если шприц непроницаем для воздуха и достаточно прочен, нужна очень большая сила, чтобы довести поршень почти до конца. Этого эксперимента было достаточно, чтобы доказать нашим предкам, что давление воздуха возрастает при сжатии, так что воздух внутри шприца действует наподобие упругой пружины.

Оказалось также, что при повышении температуры упругая сила, развиваемая неизменным объемом газа, возрастает, а если газ расширяется при постоянном давлении, то его объем возрастает. Чтобы это продемонстрировать, ранние исследователи помещали плотно пригнанный поршень в вертикальный цилиндр с воздухом и давали ему прийти в равновесие, так что вес поршня поддерживался упругостью воздуха под ним, а затем повышали температуру воздуха в цилиндре; тогда поршень поднимался, а если ему мешали подняться, то с повышением температуры возрастала сила, нужная для удержания его в неподвиж-

¹⁴⁾ W. H. Besant. Elementary Hydrostatics. Fifth edition (Элементарная гидростатика). Cambridge, 1873.

ном положении.

Таким образом, простые эксперименты доставили фундаментально важную информацию. Люди узнали физические законы, управляющие термическими и упругими свойствами атмосферы. Со временем стали общеизвестны данные о плотности массы, плотности веса, давлении, температуре и химическом составе атмосферы в зависимости от высоты. Мы рассмотрим эти вопросы далее, в связи со вкладами в механику текучих сред Паскаля и других исследователей.

Первые применения текучих сред

Чтобы рассказать всю повесть о роли текучих сред в развитии физических наук, понадобилось бы обратиться к темным временам до возникновения организованной жизни, к временам, когда наши жившие в пещерах предки начали спрашивать себя, почему вода всегда стекает вниз. Но это нельзя сделать в книге, объем и характер которой мы избрали. Мы ограничимся поэтому обзором древнейших «речных цивилизаций», поскольку они замечательным образом свидетельствуют о применении текучих сред в интересах человека и жизни. Значительная сумма данных говорит о том, что в какое-то время более чем за 5000 лет до н. э. некоторая миролюбивая, художественно одаренная и наделенная высокими способностями раса людей покинула свое место обитания где-то в Центральной Азии и спустилась в Месопотамию, «страну между двумя реками», Евфратом и Тигром, — страну, иногда именуемую колыбелью человеческой цивилизации¹⁵⁾. Они обладали значительными инженерными навыками, о чем свидетельствуют их методы ирригации, а также их храмы и дворцы.

Астрономические знания этой цивилизации достигли Египта, где их использовали для установления календарного года, составившего в точности 365 дней, из 12 месяцев по 30 дней в каждом, с прибавлением 5 священных или «небесных» дней. Оказалось, что день, когда впервые становится видимой звезда Сотис (наш Сириус), весьма точно совпадает с разливами Нила, так что состояние этой великой реки становится чем-то вроде календаря. Далее, египтяне вели записи о последовательных разливах Нила, анализируя поведение наводнений. Это

¹⁵⁾ Sir James Jeans. The Growth of Physical Science (Passurue физических наук). Cambridge, 1947.

привело их к одному из интереснейших заключений — что в природе существует взаимодействие между временем года, воздухом и водой. Здесь уместно указать, что примерно за 3000 лет до н. э. китайцы также полагали, что между ветрами, облаками, дождем и разливами рек существует магическая связь.

Более общим образом, систематическое изучение памятников древности несомненно свидетельствует о том, что научное знание, как и почти все иное, связанное с первыми цивилизациями, зародилось на Востоке. Индия, Китай, Месопотамия — Вавилония, Египет, Финикия — и другие цивилизации породили многие стороны организованной жизни, и они были инициаторами исследований (хотя, может быть, «исследование» — слишком сильное выражение в этом случае) в области текучих сред, в изучении законов природы, связанных с атмосферой, климатом, реками и т. д. Можно сказать, что те, кто больше всех страдал, должны были извлечь из своих страданий большие уроки. Можно не сомневаться, что люди, испытавшие опустошительные удары торнадо, не могли не заметить их особенностей, а люди, перенесшие крайне жаркие и влажные летние месяцы, неизбежно должны были знать сопровождающие такую погоду резкие изменения физического состояния атмосферы.

Жизнь была столь полна превратностей, приносила столько бедствий, давала так много всевозможных уроков смирения, что египтянам, как и другим, приходилось тяжко за нее бороться; это и сделало их таким знающим и опытным народом. Френсис Бекон (1561–1626), английский философ и автор множества важных теорий, говорил¹⁶: человек — слуга и истолкователь природы, он способен сделать и понять ровно столько, сколько он уяснил себе из явлений природы своим опытом и своим мышлением. Египтяне немало знали о текучих средах. Их опытное знание и их человеческое умение составляли одно целое. Их цивилизация, вероятно, одна из самых развитых цивилизаций древности, возникла в тесной связи с тем, что происходило на берегах Нила¹⁷). Вероятно, раньше, чем кто-нибудь другой они знали, что

¹⁶⁾ The Philosophers of Science (Философы науки). Edited by Saxe Commins and Robert N. Linscott. New York: The Pocket Library, 1954.

¹⁷⁾ Elisabett M. Sewell. Ancient History of Egypt, Assyria and Babylonia. (Превняя история Египта, Ассирии и Вавилонии). London: Longmans, Green, 1845.

текучие среды, вода и воздух, способны не только разрушать, но при мудром использовании могут оказать человеку неоценимую помощь. Один только факт, что египетская цивилизация развилась на берегах своей великой реки Нил, весьма красноречив: он указывает, что уже тогда, между 3000 и 600 годами до н. э., цивилизация и вода были неотделимы друг от друга.

Египтяне видели, как почти ежегодно великая река затопляла свои берега и как она смывала их обработанные земли, дома, дороги и т. д. Каждое новое бедствие этого рода служило им новым уроком. Они начали узнавать из опыта, что в тех местах, где поперечное сечение потока сужалось, поток становился быстрее и глубже; и где это происходило, там была реальная опасность. Таким образом, еще ничего не зная о законе Леонардо да Винчи — соотношении скорости и сечения (которое будет рассмотрено в надлежащем месте), египтяне начали судить о предстоящих опасностях на основании этого же закона.

Одной из важных черт египетской цивилизации была ее относительная справедливость по отношению к неудачнику. Каждый раз, когда воды Нила смывали участок плодородной земли, оставшаяся земля заново распределялась. Это требовало определенных методов и техники измерения, причем измерения приходилось повторять. Может быть, это и вызвало к жизни знаменитый «египетский треугольник»: веревка в двенадцать единиц длины делилась узлами на отделы в три, четыре и пять единиц, а затем из нее делали треугольник с узлами в углах. Тогда угол против стороны в пять единиц всегда прямой (рис. 1). При этом можно сделать треугольник любого размера, так что получается удобное приспособление для деления земли на прямоугольные треугольники и прямоугольники.

Этот треугольник воплощает знаменитую теорему Пифагора (говорящую, что в прямоугольном треугольнике сумма квадратов длин катетов равна квадрату длины гипотенузы). Но, строго говоря, подлинным математическим автором ее был Евклид, греческий геометр, открывший школу в Александрии, фундаментальный труд которого Элементы (из 13 книг) стал основой геометрии 18.

Египтяне построили свои великие пирамиды или гробницы (где

¹⁸⁾ Начала Евклида. (Перевод Д. Д. Мордухай-Болтовского). М.: ГТТИ, 1949, в трех томах. (Автор ссылается на английский перевод. — Прим. перев.)

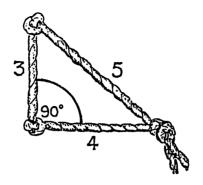


Рис. 1. Египетский треугольник: веревка в двенадцать единиц длины делится узлами на отделы в три, четыре и пять единиц, и из нее делается треугольник с узлами в углах.

Угол против стороны в пять единиц всегда прямой.

они хоронили своих царей и других важных людей) столь удачно, что они выстояли в течение 4000 лет, а это указывает на знание некоторых простейших законов статики и механики текучих сред — вероятно, не из математики, а из жизненного опыта. Как говорится в старой осетинской сказке, dony ahdau Pyrsyie arbacyd — знание о поведении воды пришло из Египта. Возможно, люди, страдавшие от разливов Нила, знали, что если вода способна сметать целые области, то она может совершать для человека и полезные дела; возможно, они знали, что каким-нибудь образом поднявшаяся вода обладает огромной энергией, почти сразу же доступной человеку. Было бы странно предполагать, что цивилизация, столь долго существовавшая у столь могучей реки. могла не знать о строительстве каналов, о началах орошения, о плотинах, мостах и простых способах подъема воды. В конце концов, мы знаем из истории, что египтяне строили в нильской долине лодки и корабли, в которых они не только пересекали реку, но спускались по ней в Средиземное море.

Далее, были так называемые египетские водяные часы, или кае-ncudpы, действовавшие следующим образом: вода капала правильным образом из большого каменного сосуда определенной формы (например,



Puc. 2. Египетские водяные часы: вода капала правильным образом из большого сосуда через малое отверстие, понижение уровня свободной поверхности калибровалось по отношению к движению солнца.

в виде усеченного конуса), через малое отверстие (рис. 2); понижение уровня свободной поверхности воды в сосуде калибровалось по отношению к движению солнца и, таким образом, показывало время. Разумеется, это было еще далеко от прикладной механики текучих сред в современном смысле слова, но при тщательном анализе этого устройства становится ясно, что его изобретатели знали из опыта немало свойств воды как текучей среды.

Вавилонская цивилизация в Юго-Западной Азии была примерно такого же возраста и характера, как цивилизация Нила. Но вавилонская земля была менее плодородна, климат не столь благоприятен; поэтому население для своего пропитания должно было подвергать свою родную землю более интенсивному орошению; а это требовало ирригационных систем (если только нарочито использованное здесь выражение «системы» не покажется слишком сильным; между тем, любая

ирригация содержит ряд элементов того, что мы теперь называем гидравликой).

Мифология и жидкости

Впрочем, не следует делать поспешного заключения, будто отношение человека к текучим средам всегда было рациональным. Напротив, в очень многих местах, даже в Египте и Вавилонии, такие явления природы, как наводнения, проливные дожди, бури и т. д., часто считались делом таинственных сил. Более того, вода и воздух сами по себе тоже нередко считались таинственными. Эта непреодолимая психическая установка показывает, что вещи, которые люди могли ежедневно наблюдать, то, что они пили и чем они дышали, тем не менее, казалось им сверхъестественным.

Увлекательные рассказы греческих и римских мифов не оставляли места для размышлений: рука, достаточно мощная, чтобы сотворить все чудеса жизни, могла создать также воздух, воду, реки, озера, моря, океаны, дождь и т. д. Эти мифы порождали другие. Предположения превращались в уверенность. И вскоре мифы и сказки стали передаваться из поколения в поколение. Вначале, говорили они, море и воздух были смешаны вместе, так что Земля не была еще твердой, море не было жидким, а воздух не был прозрачным. Овидий выразил это следующими стихами¹⁹):

No sun yet beam's from yon cerulean height; No orbing moon repair'd her horns of light; No earth, self-poised, or liquid ether hung; No sea its world-enclasping waters flung; Earth was half air, half sea, an embryo heap; Nor earth was fix'd, nor fluid was the deep; Dark was the void of air...

Над этой бесформенной массой царило беззаботное божество по имени Хаос, вид которого был неописуем, потому что не было света. Он делил свой трон с женой, темной богиней ночи по имени Нюкс или Нокс.

¹⁹⁾ H. A. Guerberg. The Myths of Hreece and Rome. London: George G. Harrap & Company, 1910.

Их сын, Эребус, в свою очередь, женился на своей матери Нюкс. После этого Эребус и Нюкс правили хаотическим миром до тех пор, пока их дети, Эфир (Свет) и Гемера (День), действуя вместе, не свергли их и не захватили верховную власть.

Их сияние впервые осветило пространство, обнаружившее всю свою бесформенность. Эфир и Гемера решили сделать из мира нечто прекрасное. Они призвали на помощь своего сына Эроса (Любовь). Совместными усилиями они создали море и землю. Вначале земля была безобразна. Эросу это не понравилось, он схватил свои несущие жизнь стрелы и пронзил ими холодное лоно земли. Сразу же ее бурая поверхность покрылась роскошной зеленью; разноцветные птицы порхали в листве новорожденных лесов; животные всех видов резвились на покрытых травой равнинах; стремительные рыбы плавали в прозрачных потоках.

Короче, теперь было все: земля, вода, воздух, свет и жизнь. Но какова была форма земли? Конечно, она была чем-то плоским. А чем она кончалась? Вокруг нее была великая река Океан, «неизменный, равномерный поток», от которого брали свое начало все воды ручьев и рек Греции.

В мифах о море присутствуют, конечно, Океан и Нептун (потрясатель земли). Мы узнаем, что жилище Нептуна было под глубокими водами, близ берегов Греции. Нерей, другое олицетворение моря, тоже едва ли отличим от своей родной стихии, точно так же, как тритоны, океаниды, нереиды и обольстительные сирены, рассматриваемые, впрочем, также как олицетворения ветров.

Мифы об облаках не только рассказывали о солнечных быках, о Центавре, Нефеле, Фриксе, Гелле и Пегасе; само небо было голубым морем, а облака — плавающими по нему кораблями.

В мифах о ветре одной из главных персонификаций был Меркурий. Вдобавок к множеству других своих качеств он изображался как «лживый, хитроумный бог ветра, изобретатель музыки», потому что его музыка была не чем иным как «мелодией ветров, способной пробуждать чувства радости и печали, сожаления и томления, страха и надежды, бурного восторга и крайнего отчаяния». Марс также был олицетворением ветра. Природа его, далее, обнаруживалась его непостоянством и капризностью; если он терпел неудачу, он давал об этом знать громким ревом. Имя его происходит от того же корня, что имя

индийского бога Марутс, означающее «перемалывающий», или «сокрушитель». Вначале оно применялось к «бурям, приводящим в смятение небо и землю», что ясно относится к бурям и грому.

Любопытно упомянуть здесь, что От и Эфиальт, исполинские сыновья Нептуна, тоже были вначале олицетворениями ветра и ураганов.

И так далее, и тому подобное. Очевидно, творцы древнегреческой мифологии — а я могу также прибавить, творцы мифологии Кавказа²⁰⁾ — были очень озабочены тем, что происходит в природе, но способны были только сочинять мифы и сказки, сыгравшие, впрочем, свою роль в первоначальном формировании истории и философии науки о текучих средах.

Платон и текучие среды

Жизнь всегда была водой, вода всегда была жизнью, но человек, главный герой жизни, ее активный деятель никогда не переставал портить воду. Почти все великие просветители прославляли эту приносящую жизнь жидкость, но столь же многие другие ее безжалостно уничтожали. Выдающийся французский писатель Антуан де Сент-Экзюпери выразил это чувство словами: «О Вода, у тебя нет ни вкуса, ни цвета, ни запаха, ты неописуема, но сколько ты доставляешь удовольствия и наслаждения — и никто не знает, что ты такое! Нельзя сказать, что ты необходима для жизни — ведь ты сама жизнь. Ты наполняешь нас радостью, необъяснимой нашими чувствами... Ты — величайшее богатство мира».

Но *что же* такое вода и воздух? Фалес Милетский (624-546 до н. э.), один из самых ранних греческих философов и, может быть, величайший философ своего времени, искал ответ на эти вопросы. Более того, он стремился выяснить общие конфигурации основных текучих сред, их пространственные формы. И он пришел к неправильному заключению, что все вещи материального мира первоначально произошли из воды, что вода поэтому превосходит все другое («вода лучше всего»); и что, соответственно, человек должен «уважать и любить

²⁰⁾ См., например, С. А. Бритаев, Г. З. Калоев. Iron Adamy Arhautta (Осетинские народные сказки). На осетинском языке. Орджоникидзе (теперь Владикав-каз), 1960. 435 с.

воду как источник всего существования». В самом деле, говорил он, то, из чего сделано все, должно рассматриваться как первое начало.

. Незачем соглашаться с этими представлениями и высказываниями или отрицать их. Мы просто отмечаем, что Фалес был один из первых мыслителей, пытавшихся создать натуральную философию текучих сред, что его подход составлял разрыв с мифами и сказками о морях, реках, потоках и воздухе; и одно это надо уже признать ценным вкладом в будущую науку о текучих средах.

Паскаль однажды заметил, что все вещи бывают лучше всего в их начале. Но в истории механики текучих сред дело обстояло иначе. Почти все ее первоначальные деятели, среди которых были некоторые великие исторические личности, утверждали, что вселенная устроена из четырех основных элементов: земли, воды, воздуха и огня. Думали, что эти элементы располагаются в виде сфер, вокруг общего центра. Твердое ядро всей этой системы, земля, была намного тяжелее других элементов, и потому занимала «нижнее положение». Следующим по тяжести элементом была вода: она непосредственно примыкала к поверхности земли. Затем следовал воздух и, наконец, огонь.

Среди сторонников этой теории четырех элементов были Пифагор (вероятно, 580-500 до н. э.), Эмпредокл, или, в принятом теперь написании, Эмпедокл (490-430 до н. э.), Платон (427-347 до н. э.), Аристотель (384-322 до н. э.) и др. Последним представителем этой теории был Данте (1265-1321).

Особый интерес представляют для нас взгляды Платона; он учил, что все четыре элемента в той или иной форме существовали do «создания мира Богом», в согласии с философией Гераклита (530–470 до н. э.), утверждавшего, что «мир, единый в своей сущности, не был создан ни Богом, ни человеком, а был, есть и всегда будет живым огнем, закономерно разгорающимся и закономерно угасающим»²¹⁾. Еще яснее выразил эту точку зрения Фридрих Энгельс (1820–95), вероятно, величайший представитель философии диалектического материализма: в своей книге Indeus In

Но вернемся к Платону. В своей метафизической теории он пы-

²¹⁾ О природе вещей Лукреция.

тался ответить на вопрос: Что реально существует? Он смотрел на поток воды и спрашивал: реально ли то, что я вижу? Реальны ли ветры, бури, дожди, наводнения и т. п.? И он безусловно отрицал реальность всего, что мы называем миром действительности, всех предметов и явлений природы, какие мы видим и наблюдаем. Впрочем, нало заметить, что это отвержение чувственного мира, как нереального, вовсе не составляет особой позиции Платона; ее разделяют с ним в той или иной степени почти все главные мыслители Древней Греции. И нельзя сказать, что Платон был глупец. В самом деле, при изучении его философии становится ясно, что он отвергает реальность для того, чтобы обнаружить, что же в самом деле реально. Когда он, например, заявляет, что $\pi \alpha \nu \tau \epsilon \lambda \hat{\omega} (\ddot{o}\eta, \pi \alpha \eta \tau \epsilon \lambda \hat{\omega} (\nu \omega \sigma \tau o \eta \tau. e. что «вполне$ реальное вполне познаваемо», то он хочет сказать, что вещи и явления могут быть несомненно реальны, если они выразимы в словесной или иной форме $^{22)}$. Протагор и другие, исходя из этой общей формулировки, пришли к выводу, что все факты и явления природы должны быть выразимы в математическом виде.

С другой стороны, Платон думал, что все материальные тела состоят из четырех элементов, но в различных телах эти элементы (земля, вода, воздух и огонь) сочетаются разными способами и в разных отношениях. Сами элементы, в свою очередь, отличаются друг от друга тем, что состоят из мельчайших частиц различной геометрической формы, а эти геометрические формы построены как различные комбинации более простых геометрических фигур²³). Современный физик скажет нам, что это был несомненно научный способ мышления, по своим выводам далеко не сводящийся к слепому отвержению действительности.

До нас, представителей «второго человеческого рода», дошло два рассказа об уничтожении первого: один из них, вавилонский, — это история потопа, повторенная в Книге Бытия; другой, египетский, — это история Атлантиды, переданная Платоном. Люди пытались разгадать загадку Платона в течение двадцати пяти столетий. Здесь его

²²⁾ См., например, Michael B. Foster. Masters of Political Thought (Мастера политической мысли). London: George G. Harrap and Company, 1942. V. 1.

²³⁾ G. C. Field. The Philosophy of Plato (Философия Платона). London: Oxford University Press, 1949.

интерес к текучим средам принял драматическую форму, но мы попрежнему стоим перед вопросом: что такое Атлантида — миф или история? Аристотель смеется: «Ее разрушил тот же, кто ее создал» 24). Это значит, что Атлантида — миф. Чтобы сказать это, Аристотель должен был быть самым беспощадным врагом Платона; может быть, так оно и было.

Но это не решает проблемы: Платон оставил больше загадок и проблем, чем разрешил. Для ученого здесь возможно лишь одно объяснение: Платон сам был не ученый, пытавшийся (среди прочих вещей) строить научные философии. Для него философ был человек, наделенный, не будучи ученым, силой научного мышления; впрочем, самое понятие «науки» было тогда еще ново, оно заключалось скорее в словах и аргументах, чем в формулировках математики и физики. Но век научного знания требует научных фактов и доказательств, откуда и происходят понятные трудности в истолковании Платона.

Аристотель и наука о текучих средах

Аристотель родился в Стагире, греческой колонии на македонском побережье, в 384 г. до н. э. В 367 г. до н. э. он переехал в Афины, чтобы изучать философию под руководством Платона, где оставался в течение 20 лет в (Платоновской) Академии. В 342 году до н.э. Аристотель стал учителем македонского царевича Александра (впоследствии прозванного «великим»). В 334 г. до н. э. он вернулся в Афины и открыл там философскую школу; примерно с этого времени он стал знаменит.

Вероятно, в истории человечества не было ничего сравнимого с влиянием этого одного человека, как в обширности его интеллектуальных достижений, так и в его воздействии на развитие научного знания в течение более двух тысяч лет. Но я займусь здесь только его вкладом в предмет этой книги. Многие из его допущений и теорий оказались неверными, но он породил сильную научную любознательность, возраставшую по мере возникновения наук. Ему не удалось понять внутренние физические структуры мира, но он сумел сформулировать

²⁴⁾ D. Merezhkovsky. The Secret of the West (Тайна Запада), London: Jonathan Cape, 1933.

некоторые основные законы природы, несомненно ценные для механики в целом и, в частности, для механики текучих сред.

Один частный аспект сочинений Аристотеля отрицательно воздействовал на научное мышление в течение ряда столетий после его смерти (в 322 г. до н. э.): это было отвержение им понятия вакуума. Он предпринял поистине героические усилия, чтобы доказать, что природа не терпит «пустоты», то есть вакуума; теория эта вполне справедлива и будет развита дальше в этой книге; но доводы Аристотеля, поддерживавшие ее, были совершенно ошибочны.

Диапазон его интересов и достижений был огромен. Среди прочего, он категорически утверждал²⁵⁾, что поскольку любое тело Вселенной имеет «тяжесть», оно стремится двигаться и движется (падает) к своему «естественному месту», а поэтому нижние слои материи, например, вода или атмосфера, должны быть плотнее верхних: это вполне справедливое заключение, весьма ценное для будущей механики текучих сред. Из этой теории «тяжести» он выводит также революционное заключение, что атмосфера имеет сферическую конфигурацию, окружающую землю. Но он ошибочно утверждает, что если тяжесть падает с заданной высоты в определенное время, то удвоенная тяжесть упадет с той же высоты за вдвое меньшее время. Лишь через тысячу девятьсот лет Галилей показал на опыте, что Аристотель ошибался, и что в действительности тела любого веса падают с заданной высоты в одно и то же время.

Все отрасли механики текучих сред основываются на принципе непрерывности. Коротко говоря, этот принцип говорит, что масса неразрушима и может быть полностью учтена во всех точках любой текучей среды как в состоянии покоя, так и при стационарном движении. Аристотель первый дал общую формулировку этого принципа. «Непрерывное можно определить, — говорил он, — как то, что делимо на части, которые и сами делимы до бесконечности, или как тело, делимое любым способом. Величина, делимая в одном направлении, есть линия, делимая в трех направлениях есть тело. Поскольку тело делимо в трех направлениях, оно делимо во всех направлениях. И величины, делимые таким образом, непрерывны.»

Для времени Аристотеля это было весьма замечательное опреде-

²⁵⁾ O nebe.

ление! И это еще не все. Подобно своим предшественникам и современникам, Аристотель считал «теорию четырех элементов» правильной теорией Вселенной. Но он сделал существенный шаг вперед. Он утверждал, что каждый из элементов — не что иное, как комбинация различных свойств одной и той же вещи — материи (materia). Вода столь «мокра, влажна и тяжела», земля столь «тяжела и тверда», воздух столь «легок и ощутим», а огонь столь «горяч», что нельзя сомневаться а их существовании: они реальны, а следовательно, и вся Вселенная реальна.

Но каждый из элементов не просто элемент сам по себе — это комбинация материальных свойств. Нечто сухое в сочетании с чем-то горячим производит огонь; нечто холодное в сочетании с чем-то сухим дает землю; нечто влажное в сочетании с чем-то холодным дает воду, и т. д. Таким образом, по Аристотелю, элементы могут превращаться друг в друга и тем самым обмениваться свойствами. Промежуточное положение в таком полном превращении занимают всевозможные тела физического мира: камень, железо, растительность, реки, дождь и т. д.

В аэродинамике мы обязаны Аристотелю его пионерскими представлениями о движении снарядов и о сопротивлении воздуха. Он также первый отметил, что если тело движется в атмосфере, то окружающий воздух нагревается, а в некоторых условиях тело даже плавится — да, он говорит «плавится». Конечно, он не был аэродинамиком; конечно, он ничего не знал о современных математических теориях температур аэродинамической стагнации, кинетического нагрева и т. п.; это делает его общие представления еще более интересными.

Современная наука и техника также обязаны Аристотелю его более общими идеями о движении. В своей работе О небе он, например, установил различие между так называемым естественным движением и вынужденным движением. «Если отпустить камень, он будет двигаться (падать) свободно, естественным образом, в определенном направлении. Но если заставить его изменить это направление, прилагая к нему силу, то получится вынужденное или неестественное движение». Это представление приводит его к выводу, что «невозможно сказать, почему тело, приведенное в движение в пустоте, должно когда-нибудь остановиться. В самом деле, почему оно должно остановиться в одном месте, а не в другом? Вследствие этого оно либо необходимым обра-

30M останется в покое, либо, если движется, будет двигаться без конца, пока не столкнется с каким-нибудь препятствием.»

Чтобы оценить историческую важность этой формулировки, надо, по-видимому, напомнить, что Галилей (1564–1642) в своей Механике также писал, что тело «безразлично к движению или покою, и само не выказывает никакой склонности двигаться в каком-либо направлении или сопротивляться, если его приводят в движение». Гюйгенс (1629–95) в своей работе De motu corporum ex percussione («О движении тел под действием толчка») писал, что «любое движущееся тело стремится двигаться по прямой линии с неизменной скоростью до тех пор, пока не встретится с препятствием». И сэр Исаак Ньютон (1642–1727) в своих Philosophiae naturalis principia mathematica («Математические начала натуральной философии») приходит к выводу, что «каждое тело упорствует в своем состоянии покоя или равномерного движения по прямой линии, если приложенная к нему сила не вынуждает его изменить это состояние».

Итак, мы видим, что в истории и философии закона инерции Аристотель был в действительности первым, Галилей вторым, Гюйгенс третьим, а Ньютон лишь четвертым. Одно это дает уже Аристотелю право на видное место среди основоположников общей механики и механики текучих сред. Но он сумел продвинуться и дальше, хотя и не всегда в правильном направлении. Кажется, его эпистемологический*) ум действовал примерно таким образом: самые плотные слои атмосферы — это самые близкие к поверхности земли; с ростом высоты плотность убывает; если принять этот естественный закон, то должна быть высота, за которой уже нет плотности, то есть нет никакой массы, и там будет абсолютный вакуум или пустота; но тогда чем будет заполнено пространство? Как, например, лучи света могут проходить через пустоту?

«А поэтому мы утверждаем, — говорит он, — что огонь, вода, воздух и земля способны превращаться друг в друга, и что каждое из них потенциально скрыто в других. Но ни воздух, ни огонь не заполняет пространство между землей и самым внешним небом. Пространство между небесными телами должно быть заполнено некото-

Эпистемология — то же, что гносеология, или теория познания. — Прим. перев.

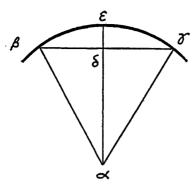
рым веществом, которое отлично от воздуха и от огня, но которое имеет переменную чистоту и свободу вследствие смещения, и не равномерно по качеству, особенно вблизи границы между воздухом и земной областью...».

Для того времени это было поистине удивительное заключение! И не только для того времени. Попытайтесь припомнить некоторые из ваших школьных экспериментов. В стеклянном сосуде, со всех сторон непроницаемом для воздуха, помещают электрический звонок, непрерывно звучащий под действием электрического тока, источник которого также находится внутри стеклянного сосуда. Затем, откачивая воздух из сосуда воздушным насосом, вы отчетливо замечаете, что звук звонка становится все слабее, и наконец полностью исчезает. Таким образом вы можете прийти к выводу, что звук состоит из последовательных сжатий и разрежений воздуха и что вследствие этого звук не может возникнуть в пространстве, где нет воздуха, т. е. в вакууме.

Впрочем, здесь было или могло быть и другое заключение. Видимость тела происходит от того, что исходящие от него лучи света достигают наших глаз. В совершенно темной комнате мы не смогли бы ничего увидеть. Лишь когда мы впускаем свет и когда его лучи отражаются от предметов, эти предметы становятся видимыми для нас. Но в вашем стеклянном сосуде, с его разреженным воздухом, когда вы не могли больше слышать звуки звонка, можно было все время видеть, как молоточек ударяет о колокол. Следовательно, лучи света способны распространяться без воздуха, то есть проходить через вакуум. Вы можете, далее, сказать, что когда вы видите на небе солнце и звезды, это также означает, что их свет способен проходить через пустое пространство Вселенной²⁶).

Но как это можно себе представить? Аристотель и его находчивые последователи апеллировали к понятию «мирового эфира», или просто «эфира», без которого распространение света оставалось бы непостижимой загадкой. Им приходилось обращаться к этому старому пасынку теоретической физики, поскольку у них не было ни квантовой механики, ни ядерной физики, ни общей теории поля. Так они нашли убежище от страха перед пустотой, и представление о всеобщей непре-

²⁶⁾ Dr Harry Schmidt. Relativity and the Univers («Относительность и Вселенная»). London: Methuen & Co. Ltd., 1921.



Puc. 3. Чертеж Аристотеля для доказательства того, что поверхность воды есть сфера.

рывности материи и (еще неизвестной) энергии было спасено — хотя бы на некоторое время.

Еще одно любопытное замечание. Аристотель был хороший наблюдатель. Он заметил глазами и рассмотрел умом тот факт, что ни вода, ни какая-либо другая жидкость никогда не образует наклонной поверхности. «Как это объяснить?» — спросил он²⁷. «В самом деле, если небо (1) вращается по кругу и (2) движется быстрее всех других вещей, то оно должно быть сферическим. Если вода расположена вокруг земли, воздух вокруг воды и огонь вокруг воздуха, то и верхние тела будут следовать тому же правилу...». И вот как он доказал свое утверждение относительно воды:

Пусть $\beta \varepsilon \gamma$ — дуга круга с центром в α (рис. 3). Тогда линия $\alpha \delta$ — кратчайшее расстояние от α до $\beta \gamma$. Вода будет течь по направлению к δ со всех сторон, пока ее поверхность не станет равноудаленной от центра. Следовательно, вода займет отрезки равной длины на всех прямых, исходящих из центра, а затем придет в равновесие. Но геометрическое место точек, равноудаленных от центра, есть окружность. Поэтому поверхность воды $\beta \varepsilon \gamma$ сферична.

Аристотель был чистый теоретик. Около двадцати лет своей жизни, с возраста 17 лет до 36, он был членом Академии Платона; таким образом, он был проникнут платонизмом в такой мере, как, пожалуй,

²⁷⁾ О небе, II,IV, стр. 161 (Ссылка на английский перевод. — Прим. перев.)

никто из великих философов и ученых не был проникнут мыслью другого. Конечно, это не значит, что Аристотель соглашался с любой доктриной Платона или что он не работал в других областях. Напротив, его расхождения с Платоном были резки и общеизвестны, а его эпистемология выходила далеко за пределы представлений его учителя.

Рождение статики текучих сред

Марк Туллий Цицерон (106–43 до н. э.), римский оратор, государственный деятель и философ, писал в своих Tusculanae Disputationes* (книга V, разд. 23), что он разыскал в Сиракузах могилу Архимеда (287–212 до н. э.). Что же побудило столь выдающегося человека разыскивать могилу? Цицерон дает на это простой ответ: я хотел спасти от забвения имя человека утонченного и благородного воспитания, посвятившего свою жизнь математическим исследованиям и изобретениям, более кого-нибудь другого (разумеется, до того времени) способствовавшего приращению знания.

В 213-212 годах до н. э. римляне вели кровавую завоевательную войну против Сиракуз под командованием генерала Марка Клавдия Марцелла (268-208 до н. э.). Марцелл был искусный командир, но сопротивление Сиракуз было еще более искусным, потому что его организатором и руководителем был Архимед. Однажды римляне атаковали со всех сторон; сиракузяне думали уже, что это конец, но Архимед внезапно привел в действие свои военные машины: камнеметы, деревянные снаряды, устройства для запуска водяных волн. Враг понес тяжелые потери и вынужден был отступить. Примерно через неделю была применена та же тактика, и затем она повторялась. Римлянам, привыкшим к быстрым триумфам, пришлось сражаться целый год.

Когда, в конце концов, Сиракузы пали (212 год до н. э.), Марцелл приказал разыскать их мужественного защитника, пощадить его жизнь и использовать его изобретательность в интересах римских войск. Между тем, Архимед продолжал свои исследования. Однажды, когда он рассматривал геометрический чертеж, нарисованный на песке на полу его дома (что было обычным способом делать чертежи), в его кабинет вошел римский солдат. Возник спор: солдат хотел повести его к Марцеллу, но Архимед ответил, что пойдет лишь после того, как решит

^{*} Тускуланские диспуты. — Прим. перев.

задачу. Тогда солдат начал разрушать его чертеж; Архимед потребовал, чтобы тот сошел с чертежа. Солдат, не зная, кто был этот старик, выхватил меч и убил его.

Это была одна из величайших трагедий в истории науки. Потому что, как выразился Лейбниц, 'Qui Archimedem et Apollonium intelligit recentiorum summorum virorum inventa parcius mirabitur' — «Тот, кто овладел творениями Архимеда и Аполлония, не будет удивлен открытиями величайших людей нашего времени». И в самом деле, Архимед был гигантской фигурой, навсегда запечатленной в истории. Его математические исследования привели его к многочисленным, величайшим открытиям и изобретениям, революционизировавшим самый стиль научного мышления. Его работы Измерение круга, Квадратура параболы, Сфера и цилиндр, Копоиды и сфероиды, Механика, Гидравлика и другие книги, статьи и изобретения были столь новы, столь оригинальны, столь остроумны и, прежде всего, столь прекрасны в своей точности, что научный мир сразу же признал его — еще при его жизни — выдающимся исследователем, основоположником механики и механики текучих сред²⁸⁾.

Архимед был, по-видимому, первым, кто исследовал внутреннее строение жидкостей. Об этом он написал очень немного, но это немногое имеет огромное значение. Прежде всего, он постулировал, что жидкости по самой своей природе не могут иметь внутренних «пустот», то есть должны быть непрерывны. Далее, «если части жидкости непрерывны и равномерно распределены, то та из них, которая наименее сжата, выталкивается той, которая более сжата». Здесь мы имеем две важных концепции классической механики текучих сред: (1) давление, приложенное к любой части среды, передается любой другой части, и (2) течение среды вызывается и поддерживается силами давления.

Отсюда почти автоматически вытекают знаменитые теоремы (или предложения) Архимеда; они состоят в следующем:

(1) Если тело легче жидкости и помещено в жидкость, то часть

Archimedes quae supersunt omnia cum Entocii Ascalonitae commentariis. Ex recensione J. Torelli, Veronensis cum nova versione latine. Oxford, 1792. Des unvergleichlichen Archimedis Kunst-Buecher. Nuernberg, 1670. Oeuvres d'Archimede, traduites litteralement avec un commentaire par F. Peyrard. Paris, 1807. (Труды Архимеда: подлинник с латинским переводом; немецкий перевод и французский перевод. — Прим. перев.).

тела останется над поверхностью (предл. IV).

- (2) Если тело легче жидкости и помещено в жидкость, то оно будет погружено настолько, чтобы объем жидкости, равный объему погруженной части тела, имел тот же вес, что и все тело (предл. V).
- (3) Если тело легче жидкости полностью и насильственно погружено в нее, то тело испытывает давление вверх, равное разности между его весом и весом равного объема жидкости (предл. VI).
- (4) Если тело погружено в жидкость, которая легче его самого, то оно упадет на дно, потому что будет легче на вес жидкости, имеющей тот же объем, что и само тело (предл. VII).

Каковы же были допущения и постулаты, на которых Архимед воздвиг прекрасное здание своих предложений? Он допустил, совершенно справедливо, что равные веса жидкостей, то есть части покоящейся жидкости равного веса, находящиеся на равном расстоянии от центра земли, находятся в равновесии по отношению друг к другу; и он принял все следствия этого основного постулата. Он доказал также, что если неравные веса подвешены на неравных расстояниях, то больший вес должен быть на меньшем расстоянии. Эти и аналогичные допущения, постулаты и теоремы были важны для развития его предложений, относящихся к чистой статике текучих сред.

Концепция Архимеда о непрерывности и давлении, рассмотренная выше, позволила ему прийти к выводу, что каждая часть жидкости сжата (или, как было бы, пожалуй, лучше сказать, находится под давлением) жидкостью, находящейся выше ее. Исходя из этого, он доказал ряд предложений, из которых, в свою очередь, вытекает, что любая жидкость должна иметь сферическую поверхность (как нам уже известно из задачи Аристотеля):

«Если тело, вес которого равен весу того же объема жидкости, погружено в эту жидкость, то оно погрузится в нее настолько, что никакая часть его не останется над поверхностью, но не опустится ниже²⁹⁾. Чтобы доказать это предложение, допустим, что тело имеет тот же вес (тяжесть), что и жидкость. Предположим теперь, что тело погружено лишь отчасти, т. е. часть его остается над поверхностью покоящейся жидкости. Пусть плоскость, проходящая через центр земли, пересекает

²⁹⁾ Des unvergleichlichen Archimedis Kunst-Buecher. Nürnberg, 1670. (Указанный выше немецкий перевод трудов Архимеда. — Прим. перев.)

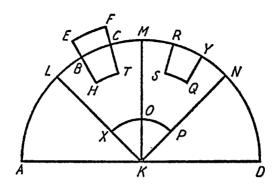


Рис. 4. Схема Архимеда для доказательства того, что если тело, вес которого равен весу того же объема жидкости, погружено в эту жидкость, то оно погрузится в нее настолько, что никакая часть его не останется над поверхностью, но не опустится ниже.

жидкость (рис. 4) и частично погруженное в нее тело таким образом, что сечение жидкости есть ABCD, а сечение тела есть EHTF. Пусть K — центр земли, BHTC — погруженная и BEFC — не погруженная части тела. Построим теперь пирамиду, основанием которой является параллелограмм на поверхности жидкости, а вершина находится в центре земли. Пусть пересечение граней этой пирамиды плоскостью, содержащей дугу AMD, состоит из KL и KM. Построим в жидкости, притом ниже EFTH, другую сферическую поверхность XOP с центром K таким образом, чтобы XOP было сечением этой поверхности плоскостью, содержащей дугу АВСО. Возьмем другую пирамиду, равную первой, смежную и непрерывно примыкающую к первой, такую, что сечения ее граней суть KM и KN. Предположим, что в жидкости имеется другое тело, «отвердевшая жидкость» RSQY, размерами и конфигурацией тождественное с погруженной частью ВНТС. Части жидкости, ограниченные поверхностью ХО в первой пирамиде и поверхностью OP во второй пирамиде, одинаково расположены и непрерывно примыкают друг к другу; но они не одинаково сжаты; $^{\rm B}$ самом деле, часть жидкости, ограниченная OX, сжимается телом ЕНТГ, а также жидкостью, содержащейся в объеме между поверхностями LM, OX и поверхностью пирамиды. Между тем, вес жидкости, содержащейся между MN и OP, меньше, чем тяжесть жидкости между LM и OX вместе с «отвердевшей жидкостью»; в самом деле, «твердое тело» RSQY меньше «твердого тела» EHTF — так как RSQY равно BHTC — а мы предположили, что погруженное тело имеет ту же тяжесть, что и жидкость. Если теперь вычесть равные части, то остатки не будут находиться в равновесии. Следовательно, часть жидкости, ограниченная поверхностью OP, будет выталкиваться частью жидкости, ограниченной поверхностью XO, так что не будет состояния покоя. Итак, никакая часть погруженного тела не может оставаться над поверхностью. Но тело не может также погрузиться глубже, потому что оно имеет ту же тяжесть, что и жидкость, и эквивалентно расположенные части жидкости будут его выжимать, аналогично предыдущему». (См. Hystory of Mechanics, Rene Dugas, Routledge and Kegan Paul, 1957).

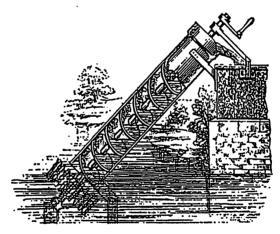
Читатель, конечно, согласится, что это доказательство — как и другие, ему подобные — несколько многословно, содержит повторения и скорее напоминает логические, чем математические рассуждения. Но общий ход аргументации Архимеда был и остается столь же здравым, как сама статика текучих сред. Иначе и не могло быть: его выводы почти автоматически следовали из его первоначальной концепции непрерывности и передачи давления. Впрочем, тут же надо сказать, что окончательная формулировка закона передачи давления в жидкости была дана не им, а Стевином и Паскалем, как мы увидим дальше в этой книге.

Вот один из самых знаменитых анекдотов, касающихся предложений Архимеда: «Гиерон, царь Сиракуз, дал золото ювелиру для изготовления короны. Корона была вручена царю, она имела требуемый вид и надлежащий вес, но подозревали, что мастер присвоил себе часть золота, заменив его равным весом серебра. Архимеда пригласили для консультации. Вскоре после этого, находясь в общественной бане, он заметил, что его тело выталкивается вверх с силой, возрастающей по мере того как он глубже погружается в воду. Поняв смысл этого наблюдения, он выбежал в том, в чем был, и побежал по улицам, восклицая: $\varepsilon \upsilon \rho \eta \kappa \alpha!$ $\varepsilon \upsilon \rho \eta \kappa \alpha!$ — я нашел! я нашел!» И в самом деле, он это нашел. Его эксперименты показали, что вода позволяет точно

определить состав твердого тела, потому что вытесненный объем воды весит в точности столько же, сколько теряет в весе погруженный в нее предмет.

Остается, конечно, технический вопрос: как он это сделал? И внимательное чтение разных источников подсказывает ответ: вероятно, он определил объем воды, вытесненной определенными количествами золота, серебра и всей короной, а затем вычислил количество золота и серебра, заключенное в короне.

Одним из интереснейших гидравлических изобретений Архимеда был архимедов винт, машина для подъема воды (рис. 5), который может использоваться (и используется) для многих целей: для ирригации речной водой, для закачивания в машины смазки, для смешивания и подачи бетонной массы и т. д., и т. п.



Puc. 5. Архимедов винт — машина для подъема воды.

Как мы видим, Архимед занимает особо важное место в истории механики текучих сред. Не существует учебника по механике текучих сред, который не начинался бы или не содержал бы закон или принцип Архимеда (когда твердое тело погружено в жидкость, жидкость давит на него вертикально вверх с силой, равной весу вытесненной жидкости; эта сила называется плавучестью). Уже по одной этой причине — а она не единственна — Архимеда вполне можно назвать «отцом статики текучих сред».

Герон Александрийский

Конечно, невозможно описать вклады всех, кто занимался изучением текучих сред. Но невозможно и пропустить тех, кто заложил краеугольные камни этого предмета и запечатлел на нем свою личность. Одним из таких людей был Герон (Геро) из Александрии, греческий ученый и инженер, живший предположительно в третьем веке, автор многочисленных трудов по математике, механике и физике. 30)

Почему же греческий ученый оказался в египетской Александрии? Сейчас мы это расскажем. Александр Великий, царь Македонии, поставил себе целью не что иное, как создать всемирную империю и стать ее монархом. В 332 году до н. э. он основал новый город под названием Александрия на равнине у впадения Нила в море; это должен был быть самый великолепный город в мире, столица его государства. Такое предназначение привлекло в Александрию многих выдающихся философов, ученых, инженеров и художников того времени. Но после смерти Александра государство разделили между собой люди, сумевшие захватить в свои руки какую-нибудь из областей. Египет достался одному из его генералов, Птолемею, избравшему своей столицей еще строившуюся Александрию. Этот человек, очень умный и честолюбивый, хотел превратить свою столицу в центр культурной жизни. Для этого он построил музей, где находились произведения искусства, библиотека, университет и другие учреждения. Евклид (живший, по-видимому, около 330-270 годов до н. э.) был куратором библиотеки и заведовал ее математическим отделением; Архимед учился в Александрийском университете; с Александрией были связаны великие астрономы, такие, как Аристарх (310-230 до н. э.), Эратосфен (276-195 до н. э.), Гиппарх (190-210 до н. э.) и другие ученые. Среди них был и математик Герон, получивший поэтому имя Герона Александрийского. Герон по-своему подражал Архимеду, и не без успеха. Как и для Архимеда, геометрия была для него, главным образом, средством решения практических задач. По-видимому, можно полагать, что Герон был первым, кто разработал геометрические и тригонометрические методы определения высот — например, высот деревьев и гор, а также сформулировал предложения о вычислении объемов физических тел разной формы.

³⁰⁾ Среди его трудов — Mechanica, Geometria, Geodaesia, Pneumatica.

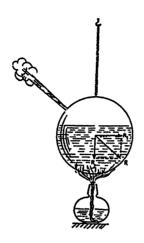


Рис. 6. Открытие реактивной силы Героном Александрийским (воображаемая схема).

Возникает вопрос, был ли Герон первым инженером. Вероятно, нет. Известно, например, что в Индии и Китае были высоко развитые шивилизации не менее чем за три тысячи лет до нашей эры; вряд ли это было бы возможно без науки и техники. Китайцы сохранили записи наблюдений комет и бурь, наводящие на мысль, что у них должны были быть прикладные ученые и инженеры. Писаная история Китая, а в меньшей степени также Индии, дает основания для предположения, что там должна была в какой-то мере существовать техника гидравлики и мелиорации. Известно также, что около 3000-го года до н. э. общества, возделывавшие аллювиальные равнины близ Нила, а также Тигра и Евфрата, строили уже ирригационные каналы и сооружали паруса для лодок. Более того, шумеры осушили болота вдоль нижнего Евфрата у его впадения в Персидский залив, и орошали землю каналами намного ранее 3000 лет до н. э. Греки из Микен, город которых был знаменит между 1400 и 1100 годами до н. э., обладали уже достаточными техническими навыками, чтобы предупреждать наводнения и отводить ручьи. Во всяком случае, первый инженер-строитель, имя которого до нас дошло, был Евфалин из Мегары.

И все же роль Герона в истории техники текучих сред была исключительной. Он оставил около сотни основных идей, набросков и рисунков, часто с подробными описаниями машин, деталей машин, моделей, измерительных приборов, винтов, цилиндров, поршней, клапанов, сосудов и т. д. Но, к несчастью, он опередил свое время, и многие его изобретения не получили признания при его жизни.

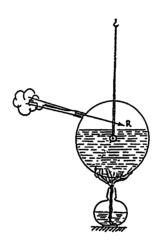


Рис. 7. Открытие реактивного движения Героном Александрийским (воображаемая схема).

Чем больше размышляещь об изобретениях Герона, тем яснее становится, что у него был в высшей степени логичный, любознательный ум. Например, он должен был задавать себе вопрос: при достаточном нагревании дерево сгорает, железо плавится, камень разрушается — но что происходит с водой, с газами и т. п.? Чтобы ответить на это, он, вероятно, нагревал воду в каком-нибудь закрытом сосуде, пока она вскипала. После этого он, вероятно, повторял этот опыт, проделав в сосуде отверстие, и замечал, что через это отверстие вырывается свистящая струя пара. Далее, я могу себе представить — хотя и не могу доказать ссылкой на источники, — что его сосуд был подвешен на цепи так, что отверстие не могло быть в наивысшей точке. Оно не могло

быть и где-то снизу, раз сосуд должен был содержать воду; отверстие можно было сделать лишь так, как изображено на рис. 6. Но тогда струя пара создает реактивную силу R в противоположном направлении. Ее компонента R_1 толкает подвешенный сосуд слева направо, создавая тем самым реактивное движение. Сделав это революционное открытие, он должен был сделать, и сделал, следующий революционный шаг, который и был связан с его именем. Как хороший геометр, он, вероятно, задался вопросом: линия действия реактивной силы R (и ее компонент R_1 и R_2) проходит через центр сосуда; что же произойдет, если это не так? Для ответа на этот вопрос он приделал к отверстию короткую трубку, как показано на рис. 7. Тогда, как только вода в сосуде закипала и струя пара начинала вырываться через трубку, сосуд начинал вращаться в противоположном направлении.



Рис. 8. Реактивный двигатель Герона.

Но подвешенное положение сосуда имело серьезный недостаток: когда отверстие (трубка) оказывается ниже уровня воды, вода выливается. Надо было либо заставить сосуд вращаться в горизонтальном направлении, либо устроить так, чтобы в сосуде был только пар, а не вода. Остальное было уже простой техникой. Чтобы машина вращалась равномерно, Герон приделал две, три или четыре отводных трубки, как показано на рис. 8. Так родилось нечто очень важное:

будущая турбина, будущая водяная мельница (Бейкера) и будущий реактивный двигатель. Поистине, простота — мать изобретения.

Через Темные Века — к Возрождению

Как мы видели, механика текучих сред уходит своими корнями в очень далекие времена. И хотя ее отрасли никогда не возникали без препятствий, она все же набирала силу. Но, как это было всегда и как это продолжается по сей день, худшим врагом человеческих достижений был сам человек. После падения Римской Империи колесо цивилизации стало вращаться все медленнее и, наконец, совсем остановилось; в некоторых аспектах жизни оно повернулось даже в обратную сторону.

Варвары, вторгшиеся с севера Европы, готы, вандалы, ломбарды и франки, как стаи воронов набросились на границы империи, разрывая на части и разрушая все, что можно было назвать цивилизацией. Варвары-захватчики ничего не понимали в римском искусстве управления, и вместо римского права, прежде господствовавшего от Тиса*) до Тигра, возникли хаос, насилие, кровопролитие и произвол. Как же могли эти варвары, не ведающие науки и техники, поддерживать в порядке римские стены, дороги, мосты, акведуки? Не ведающие книг и письма, как могли они понять, что рукописи, бросаемые в костер или на свалку, содержат в себе знание? Знающие только грубые ремесла, как могли они оценить картины, вазы и прекрасные статуи, которые они весело выбрасывали из окон или делали мишенью для своих луков и копий? Часы истории повернулись на тысячу лет назад, и над целым континентом воцарились Темные Века³¹).

В конце этой эпохи родилось то, что назвали французским словом renaissance, русским словом «возрождение», английским словом 'revival' или 'rebirth'. Вряд ли надо объяснять, что Возрождение не было внезапным; оно не было делом какого-нибудь одного человека, или даже одной нации. Нет, Возрождение — это был День, который на время сменила Ночь, но который неизбежно должен был вернуться. Конечно, Темные Века были и в самом деле темны. Но они не были беспросветно черными. Многие восставали против господства варварских порядков

^{*)} Тис — река на севере Англии. — Прим. перев.

³¹⁾ Elisabeth Underwood. A Short History of the World (Краткая всеобщая история), Edinburgh and London: W. & R. Chambers, Ltd, 1959.

и слепого авторитета, прокладывая путь к Возрождению. Борьба была долгой, но завершилась успехом. Долгая темная зима отступила перед дуновением, повеявшим из старой Греции в Италию, а затем свет Нового Просвещения, распространившись повсюду, рассеял мрак, окутывавший человеческий дух. Европа начала вновь открывать сокровища знания Древнего Рима и Греции, погребенные в развалинах Римской Империи.

Вероятно, вы кое-что читали из сочинений Данте Алигьери (1265—1321), великого итальянского поэта, создателя итальянского литературного языка. В своем знаменитом «Аде» (l'Inferno) он писал*):

Земную жизнь пройдя до половины, Я очутился в сумрачном лесу, Утратив правый путь во тьме долины.

Может быть, он был последним из великих поэтов Темных Веков, утративших свой правый путь, но он искал и новые пути. Поэтические выражения его — «я некогда был человеком», «невежественно поклонялись ложным богам», «гордыня сокрушилась, охваченная пламенем» — как и многие другие, свидетельствуют о том, как он относился к Темным Векам. Стихи его полны и мыслей, и вдохновения. У него был глубокий, неутолимый интерес к силам, управляющим обществом и природой; это демонстрируют, несомненно, и рисунки, сопровождающие его произведения. И, как я вам сейчас расскажу, он интересовался также механикой текучих сред — то есть, разумеется, тем, что должно было в будущем стать важной частью этой науки.

Но сначала скажу несколько слов о греческой мифологии. В ней есть фантастические сюжеты, повлиявшие на мышление многих великих людей. По некоторым из мифов далеко на юге, у берегов великой реки Океан, лежат прекрасные Острова Счастливых, куда переносятся, не испытав смерти, люди добродетельной жизни, снискавшие себе расположение богов: там они наслаждаются вечным блаженством. У этих островов есть свое солнце, своя луна и свои звезды, и они не знают холодных ветров. ³²).

Приводится перевод М. Лозинского: Данте Алигьери, Божественная Комедия. М., 1961. Автор ссылается на английский перевод. (Прим. перев.).

³²⁾ H. A. Guerber. The Myths of Greece and Rome («Мифы Греции и Рима»). London, 1910.

В мифе о ветре Меркурий (или Гермес) — одно из главных действующих лиц. Он похитил быков бога солнца (олицетворяющих облака). Меркурий был «лживый, изворотливый бог ветра», и он изобрел музыку, потому что его музыка была не что иное, как «мелодия ветров». Другим олицетворением ветра был Марс (или Арес), имя которого, как я уже заметил, происходит от того же корня, что имя индийского бога Марутс. Первоначально оно применялось к «бурям, приводящим в замешательство небо и землю». Далее, был еще миф об облаках, говоривший, среди прочих вещей, что «само небо — это голубое море, а облака — это плавающие по нему корабли, гонимые страхом перед ветром». Когда титан Прометей похитил с неба огонь и одарил им людей, это прямой намек на молнию («небесный бурав, высекающий огонь из облаков»).

Таким образом, погода и климат весьма занимали греков. Они не смогли создать научную метеорологию. Но они создали некоторую основную модель мира, нечто вроде Alma Mater*), направлявшую исследователей в определенную сторону. Данте был одним из них. Он принимал теорию четырех стихий и непреклонно настаивал на том, что четыре элемента существуют в сферической форме. Центр системы, земля, полностью покрыта воображаемым жидким элементом; третий элемент, атмосфера, прижат к предыдущей сфере, как мягкая сферическая оболочка; и, наконец, четвертый элемент, огонь, окружает сферическую атмосферу. Водная оболочка земли холодна, а огненная горяча; поэтому зажатая между ними атмосфера подвержена действию двух противоположных элементов, отчего она деятельна, сурова и беспокойна. Конечно, для Данте это не означало, что атмосфера не может оставаться неподвижной. Но поскольку сферы не изолированы друг от друга непроницаемыми сферическими стенами, движения одной из них воздействуют на состояние покоя других, так что время от времени сферическое строение мира искажается.

Как я полагаю, отсюда можно заключить, что Данте пытался объяснить физические причины ветров, бурь, дождей и т. д.; и, сколь ни наивна его теория, он по крайней мере сделал шаг вперед от мифоло-

Кормилица, приемная мать (дат.). В студенческом жаргоне это выражение означало, с ласковым оттенком, оконченное говорящим учебное заведение. — Прим. перев.

гических сказок. Одна из книг Аристотеля называется Meteorologia; книга Теофраста из Эреса (371–286 до н.э.) называлась О знаках ветров и погоды; и вообще, греки придавали большое значение тому, что мы сейчас называем метеорологией, но никакой метеорологии в собственном смысле не выработали, потому что в их теориях и философских системах господствовал дух мифологии и мистицизма.

Данте не был ни ученым, ни философом в смысле Платона и Аристотеля. Но он был великим поэтом, и его поэтическая любознательность побуждала его входить в глубокие долины. Он не произвел ничего похожего на метеорологию, но его тезис, что атмосфера не находится в состоянии перманентного спокойствия, что в ней происходят движения и процессы (сколь бы неверно ни было его историческое происхождение) мог вызвать интерес у будущих ученых и, в частности, метеорологов.

Обратимся теперь к другому наследнику Темных Веков. Николай Кребс из Кузы (1401-64) был ученый, которому недоставало обычной научной логики; гуманист, так и не нашедший времени завершить свои гуманистические идеи; философ, не сумевший возвести до конца свои Хрустальные Дворцы; сторонник религиозного примирения, не сумевший построить прочные мосты братства; короче, это был человек, никогда не располагавший временем, чтобы превратить свои многочисленные теории и идеи в связную и полную систему. Этот самый кузанец предлагал следующий метод определения влажности атмосферы: поместить на одну чашку весов некоторое количество шерсти, а на другую камни, и уравновесить их; тогда во влажную погоду шерсть станет тяжелее, а вес камней останется тем же, и можно будет определить влажность атмосферы...

Общие замечания о Леонардо да Винчи

Метеорология³³⁾ — это наука об атмосферных явлениях, и Леонардо да Винчи (1425-1519) был первым, кто подошел к ее проблемам научным, или почти научным образом.

Диапазон интересов Леонардо охватывал общую философию, анатомию, натуральную философию, оптику, акустику, свет, астрономию,

 $^{^{33)}}$ Meteoros = то, что движется в атмосфере + logos (учение).

физическую географию, атмосферу, физику и механику полета птиц, философию и механику летающих машин, математику, природу воды, строительство каналов, военную технику, философию и технику живописи, архитектуру, музыку и так далее. Читая его работы³⁴⁾ и изучая его картины, рисунки и т. д., трудно усомниться в том, что Леонардо да Винчи был не только великим человеком эпохи Возрождения, но и самым одаренным из мыслителей, инженеров, ученых и художников — в одном лице — за всю историю цивилизации.

В смысле философии и эпистемологии Леонардо опередил свое время на сотни лет. Все его мышление в действительности строилось на представлении, что природа дает человеку возможность технического и художественного творчества, и что весь этот неограниченный мир человеческого творчества принадлежит ему самому. Он настаивал, может быть, ошибочно, на том, что художник — это подлинный философ, способный воссоздавать природу, некоторым образом, в более глубоком ее существе; он извлекает из природы больше, чем может непосредственно усмотреть не только глаз, но и разум. Далее, он утверждал: «Никакое знание не может быть достоверно, если оно не основано на математике или на некоторой другой науке, в свою очередь опирающейся на математические науки», и еще: «инструментальная, или механическая наука — благороднейшая из всех, превосходящая все другие и самая полезная».

Разумеется, это сильное высказывание о математике не было случайным. Он предупреждал: «Пусть тот, кто не математик, не читает элементы моих трудов». Он имел в виду при этом, что без некоторого знания основ математики никто не может быть ученым — механиком, оптиком, астрономом, специалистом по жидкостям и газам, художником или даже поэтом — а сам Леонардо был всем этим в одном лице, и еще многим другим. «Я знаю, — писал он, — что многие со мной не согласятся; более того, многие скажут, что мой труд бесполезен, но это будут те, кто стремится лишь к материальным богатствам и вовсе лишен мудрости, составляющей пищу и единственное подлинное вино ума». Как он повторял при разных обстоятельствах, это те, кто любит

³⁴⁾ Jean Paul Richter. The Literary Works by Leonardo da Vinci («Литературные произведения Леонардо да Винчи»). London: Oxford University Press, 1939.
V. I, р. 112. См. также Ritchie Calder. Leonardo and the Age of the Eye («Леонардо и век глаза»), London: William Heinemann Ltd, 1970.

грубую практику без знания, и потому подобен моряку, садящемуся на корабль без руля, и никогда не уверенному, куда он плывет.

«Нет, — уверял Леонардо, — практическое знание всегда должно опираться на надежную теорию. Художник должен знать смысл таких понятий, как «точка», «пиния», «поверхность», «объем» и т. д. Он должен знать, что наименьшая точка в природе больше любой математической точки, потому что естественная точка обладает непрерывностью, а все, что непрерывно, бесконечно делимо; математическая же точка неделима, так как не имеет размеров». Говоря, что естественная точка обладает непрерывностью, Леонардо имеет в виду, что у нее есть тело, т. е. масса и объем.

Как мы уже показали, концепция непрерывности возникла в трудах Аристотеля, Архимеда и других. Но Леонардо да Винчи попытался придать ей более широкую математическую, а затем и физическую основу. Представьте себе, например, две смежных частицы в некоторой жидкости. Это физические тела, у них есть объемы и, следовательно, поверхности. Как же следует математически трактовать эти поверхности — как разрывы? В наше время такой вопрос кажется наивным, но во времена Леонардо на него приходилось отвечать вполне серьезно. И вот как он на него ответил:

«Поверхность есть ограничение тела. Но ограничение тела не есть часть этого тела; поэтому то, что не является частью никакого тела, есть ничтожное; ничтожное же не занимает пространства. В самом деле, поверхность состоит из бесконечного числа линий, а линия из бесконечного числа (математических) точек, которые, будучи неделимы, не занимают пространства; но то, что не занимает пространства, не существует... Поэтому никакое ограничение двух смежных (жидких) тел не является частью ни одного из них...».

Любопытно прибавить, что Леонардо снова и снова повторяет эту концепцию, изящно применяя ее к теории линейной перспективы в живописи. Но для нас ее значение сводится попросту к следующему: воображаемое деление текучей среды на тела не разрушает ее непрерывности, составляющей фундаментальное представление во всем физическом и математическом здании механики текучих сред.

В той же теории линейной перспективы Леонардо сделал ряд замечаний об одной из текучих сред — атмосфере. «То, что атмосфера притягивает к себе все образы существующих в ней предметов, и притом не их формы, а лишь их природу, можно ясно видеть на солнце, потому что вся атмосфера полностью пронизывается (солнечным) светом и теплом. Можно ясно показать, что все тела всецело лежат своими образами в окружающей атмосфере. Каждое тело в свете и в тени наполняет окружающий воздух бесконечным числом своих образов... Тело атмосферы полно бесконечным числом пирамид, состоящих из сияющих прямых линий, производимых границами тел». А затем следует один из фундаментальных фактов природы, на котором построена целая отрасль современной механики текучих сред: «Точно так же, как брошенный в воду камень становится центром и причиной многих кругов, — говорит Леонардо да Винчи, — и как звук распространяется кругами в воздухе, так же и любой предмет, помещенный в светящуюся атмосферу, расплывается кругами и наполняет окружающий воздух бесконечным числом образов самого себя».

И так далее, и тому подобное. Великий художник и инженер был также великим геометром, физиком и оптиком, выяснившим множество загадок, связанных с водой и воздухом. Прекрасные геометрические иллюстрации³⁵⁾, живописно сопровождающие его сочинения, убедительно показывают, что все им выращенное имело глубокие корни.

Но мы не коснулись еще его самых главных трудов. Трудно представить себе более блестящую, более заслуживающую бессмертия научную работу, чем работа Леонардо «О свойствах и о движениях человеческого тела». Поскольку тогда не было ни анатомии, ни связанных с нею наук, надо осознать, что она открыла не новый горизонт, а новое небо знания! Анализируя текст и рассматривая сопровождающие его иллюстрации, вы чувствуете учащение вашего интеллектуального пульса, ваш восхищенный ум переносится во время чудес, ваше научное воображение обретает крылья. Могло ли это быть в действительности? Да, это было, вот оно здесь, перед вашими глазами. Гете сказал однажды, что хорошая архитектура подобна застывшей музыке; что ж, труды Леонардо — это непревзойденный источник живой музыки*)!

³⁵⁾ См., например, Leonardo da Vinci. Tagebucher und Aufzeichnungen. («Лневники и рисунки»). Leipzig, 1953.

^{*)} К несчастью, научные и технические труды Леонардо не были опубликованы ни им самим, ни сохранившими их владельпами его рукописей: публикация их только в двадцатом веке — одна из самых тяжелых потерь в истории культуры. — Прим. перев.

Что же можно сказать о его «Ботанике для живописцев, с начапами пейзажной живописи»? Вряд ли кто-нибудь выполнил работу такой полноты. Можно представить себе, как этот предмет, весело играя в его уме, прорывался в это удивительное сочинение. Читая его, вспоминаешь слова Дмитрия Мережковского о Микеланджело: «сила его была подобна красоте и полноте его гения, подобна бурному ветру, срывающему горы и раскалывающему скалы перед лицом Господа»; но Леонардо был еще сильнее, потому что спокойствие сильнее бури³⁶).

Впрочем, философы часто отказывались дать ему место в своей среде, потому что он был «человек без образования». Да, конечно, в теориях Леонардо иногда встречаются философские неточности. Но внимательный читатель его бессмертных трудов не может не сравнить его с силой, которая определяется как «бесплотная действующая причина, невидимая мощь, изгоняющая все, что ей противится, — то, что побеждает и истребляет причину сопротивления». Таков был Леонардо: могуч, неутомим, полон энергии, непревзойден в техническом умении, неистощим, как могучая река с обильным источником и множеством притоков.

Оригинальные работы Леонардо да Винчи о текучих средах

Леонардо да Винчи был также великим инженером-строителем и планировщиком городов. Он изучал, анализировал, планировал и проектировал едва ли не все на свете: дороги, улицы, каналы, мосты, дома, торговые центры, аркады, водяные резервуары, плавательные бассейны, сосуды для сбора дождевой воды и т. д., и. т. д. Дома должны быть обращены спиной друг к другу; дороги и улицы должны иметь определенную ширину; главные улицы должны быть свободны от экипажей, чтобы давать место для прогулок, и проведены таким образом, чтобы обеспечивать кратчайшее сообщение; предметы потребления, такие, как дрова, вода, вино, должны доставляться через задние двери; уборные, конюшни и другие источники неприятных запахов должны опорожняться в подземные каналы; город должен быть построен таким образом, чтобы наводнения от рек не могли затоплять

³⁶⁾ Дмитрий Мережковский. Повесть о Леонардо да Винчи. (Автор ссылается на английский перевод 1928 года. Прим. перев.)

погреба и улицы и не повышали уровень воды в каналах. Типичный план города показан на рис. 9.

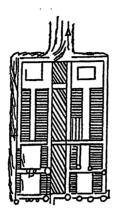


Рис. 9. План города Леонардо да Винчи.

Работы Леонардо по астрономии, механике машин, строительной технике, оптике, жидкостям и газам и т. д. вызывают ощущение, что математика присутствует где-то рядом; что за каждой основной концепцией стоит прикладная математика; что его чертежи и схемы — это особого рода математические уравнения. «Механика, — говорит он, — это рай математических наук, поскольку в ней математика приносит свои плоды³⁷⁾. Нельзя с уверенностью сказать, где математика не может быть применена, или с чем она не связана».

Это объясняет, хотя бы отчасти, почему его технические чертежи почти всегда столь точны с математической точки зрения; примером может служить закон, связывающий скорости и площади.

Леонардо да Винчи был превосходным наблюдателем, а его родина, Италия, была богата явлениями природы и процессами, заслуживающими наблюдения; примером могут служить разного рода водопады — это область знания, где одно открытие влекло за собой другое. Как

³⁷⁾ Leonardo da Vinci, Leisure Arts, V. I (Леонардо да Винчи, «Свободные искусства», том I). Novara, Italy: Istituto Geografico de Agostini, 1964.

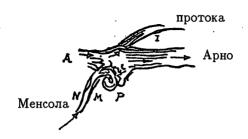
видно из его заметок, он собирался написать отдельные книги о морях, реках, законах движения воды и, более общим образом, о методах измерения свойств жидкостей. Вот написанный им типичный план³⁸): «Содержание книги: о самой воде, о море, о подземных потоках, о реках, о природе глубин, о препятствиях, о гравии, о поверхности воды, о предметах, движущихся в воде, о регулировании рек, о водостоках, о каналах, о машинах, вращаемых водой, о подъеме воды, о веществах, разрушаемых водой».

Но жизнь Леонардо, как и жизнь каждого человека, с каждым днем близилась к концу, и эта книга, как и многие другие, так и не явилась на свет. Но он оставил нам не только планы и изобретения. Его планы градоустройства охватывали почти все основные идеи о водоснабжении. «В Италии жаркое лето, — писал он, — и летом некоторые реки совсем пересыхают, а другие частично; это плохо для городов. Но как этому помочь? Прежде всего, города и деревни следует строить поблизости от тех рек, воды которых не слишком поднимаются или спадают. А затем, люди должны научиться управлять своими реками».

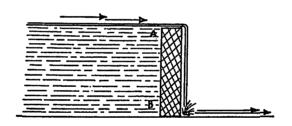
«Почему, например, река Арно разрушает свои берега? — спрашивал Леонардо. — Потому что ее притоки вносят в нее массу почвы, песка и камней, откладывая их на дне реки, особенно с противоположной стороны, и нарушают этим ход течения, внося в него искажения». Но если бы и не было таких искажений, энергия этих притоков все равно нарушала бы «естественное поведение главной реки», а «потревоженная река беспощадна». Например, река Менсола не только портит дно главной реки (Арно), но также образует водоворот при своем впадении. Этот водоворот приводит массу жидкости в круговое движение, а тем самым «вгрызается в противоположный берег и разрушает его». С другой стороны, если противоположный берег недостаточно высок, то может образоваться протока (рис. 10). Этих и других «нарушений» можно избежать с помощью водных ворот, заставляющих реки сливаться друг с другом «мирным способом».

Читатель может спросить, почему нужно много водных ворот.

³⁸⁾ The Literary Works of Leonardo da Vinci («Литературные произведения Леонардо да Винчи»). London: J.P.Richter, 1939. См. также Tagebücher und Aufzeichnungen von Leonardo da Vinci («Лневники и рисунки Леонардо да Винчи»). Leipzig, 1953.



Puc. 10. Река Менсола не только разрушает дно главной реки Арно, но также образует водоворот, и может порождать протоки.

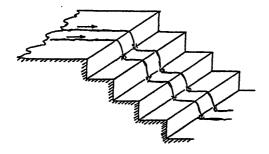


Puc. 11. Падающая вода ударяет по дну и разрушает его.

Леонардо говорит, 39) что если сделать только одни ворота (рис. 11), то высота AB окажется чрезмерной, что нежелательно, так как «падающая вода будет с большой силой ударять по дну» и, следовательно, постепенно разрушать его. Чтобы избежать этого, надо разбить высоту AB на несколько меньших высот (рис. 12).

Затем он говорит о судьбе реки Адды. Вода в этой реке «сильно убавилась, так как ее отводят во многих округах для орошения полей», а поэтому люди, живущие на ее берегах, испытывают нехватку воды.

³⁹⁾ The Literary Works of Leonardo da Vinci («Литературные произведения Леонардо да Винчи»). London: J.P.Richter, 1939. См. также Tagebücher und Aufzeichnungen von Leonardo da Vinci («Дневники и рисунки Леонардо да Винчи»). Leipzig, 1953.



Puc. 12. Как уменьшить разрушительную силу падающей воды.

Как этому помочь? На что он отвечает: «часть воды этой реки «выпивается землей», то есть теряется, но если устроить маленькие каналы (под поверхностью земли), то потерянная вода будет снова собираться и приносить пользу людям».

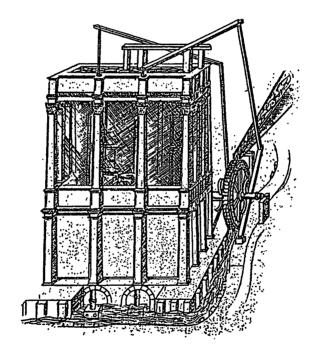
«Вода земли и кровь в живом теле текут аналогичным образом; этому не препятствует малый размер вен, проводящих кровь. Воды земли, в своем постоянном движении, возвращаются из глубин моря на высочайшие вершины гор, как будто вопреки природе тяжелых тел; и в этом они подобны крови живого существа, всегда движущейся от сердца, аналогичного морю, к голове, аналогичной вершинам гор; здесь она может порвать вену, как можно видеть при кровотечении из носа; и вся эта кровь, льющаяся из вены, должна была подняться до этого уровня. Когда же кровь падает из вены на землю, она повинуется закону всех других тел тяжелее воздуха, так как всегда ищет более низкое место⁴⁰)».

Каковы же были законы, управляющие потоком воды или крови? Он утверждает, что все внутренние моря и озера существуют благодаря рекам. Один из самых важных законов поведения морей или озер состоит в том, что они, а также океаны «проявляют волновое движение» и волны всегда обрушиваются на их дно вблизи берегов (рис. 13). Относительно рек он утверждает, что существует один общий закон

Literary Works of Leonardo da Vinci, vol.II («Литературные произведения Леонардо да Винчи», том II). London: Oxford University Press, 1939.



Puc. 13. Волны обрушиваются на их дно вблизи берегов.



Puc. 14. Водяная мельница по Леонардо.

для всех случаев: в местах, где поток несет большое количество воды, скорость потока больше, и обратно. В другом месте он формулирует ту же мысль иначе: где река становится мельче, вода течет быстрее. Эта идея прослеживается во всех его рисунках воды, крови или потоков воздуха.

Рассмотрим, к примеру, его знаменитую водяную мельницу (рис. 14). Она содержит элементы обычного автоматического управления скоростью колеса, имеет механизм тормоза и (для данной цели еще более важно) форма канала подачи воды предполагает, что Леонардо использует ту же взаимосвязь поперечного сечения потока и его скорости, так называемый закон поперечного сечения, а именно что скорость V потока больше там, где поперечное сечение A меньше (и обратно), произведение этих двух величин постоянно:

$$VA = const.$$

или $V_1A_1=V_2A_2=$ const, или $V_1:V_2=A_2:A_1$. Другими словами, если сужается поперечное сечение потока, то возрастает скорость потока на этом поперечном сечении. Возрастание V означает возрастание инетической энергии той же массы, то есть возрастание ее действующей мощности. Мы еще неоднократно вернемся к этим вопросам. В то же время можно с уверенностью сказать, что открытие этих законов ставит Леонардо да Винчи в один ряд с отцами механики текучих сред.

Я использовал выше слова «действующая мощность» умышленно. Мощность — это интенсивность выполнения работы, $P=dW/dt\equiv W/t$, где P — мощность, W — работы, d — дифференциал и t — время, и работа определяется как произведение перемещения (допустим, в метрах) на силу (допустим, в килограммах), действующую в направлении этого перемещения.

Отсюда вопрос, с которым сталкивается каждый ученый или философ на протяжении всей истории цивилизации: что такое сила? И ясно, что Леонардо да Винчи обнаружил свою неспособность дать хороший ответ.

Он дал такие ответы⁴¹): сила — это духовная мощь, невидимая энергия, которой наделены все тела, выведенные из естественного равновесия вызванным насильственным воздействием извне; невидимая энергия, которая возникает и передается через воздействие и без него от подвижных тел к неподвижным телам, придавая последним подобие жизни, и эта жизнь функционирует чудесным образом; насилие, которое умирает в свободе, которое превращает в руины с яростью все,

Literary work. Литературные работы. London: Oxford University Press, 1939. Vol. II.

что стоит на его пути, которое меняется и заставляет все тела менять форму и местоположение, которое всегда противодействует силам природы, которое не что иное, как желание летать. Вес не меняется сам по себе, а сила всегда скрыта; вес имеет тело, сила нет; вес материален, сила духовна; если одно вечно, другое смертно.

Вы можете сказать: цепочка полумистических восторженных причитаний. Но в другом месте он также говорит, что независимо от происхождения, сила сохраняет мир единым. Или, с другой стороны, окончательные результаты, физические законы, инженерные сооружения, предложенные Леонардо, предполагают, что его мистицизм не увел его с тропы науки и технологии. Кроме того, некоторые из предыдущих определений совершенно научны.

Леонардо и механика текучих сред

Обратимся теперь к более специальным вкладам Леонардо в механику текучих сред. Термин «механика текучих сред» применяется здесь в широком смысле, определенном выше. Леонардо, как и его предшественники и современники, верил, что Вселенная состоит из Земли, Воды, Воздуха и Огня. Центр водной сферы был для него подлинным центром Земли. В этой сфере масса (сейчас мы сказали бы «плотность массы») значительно меняется от поверхности к центру, но остается непрерывной. Вода проникает во все пространства между скалами, камнями, песчинками, а потому между Землей и Водой нет вакуума. Точно так же невозможен вакуум между атмосферой и огнем. Таким образом, заключает Леонардо, «всякий, кто говорит о возникновении вакуума, говорит глупости».

Как читатель еще увидит впоследствии, всеобщий закон непрерывности материи-энергии и в самом деле есть самый основной закон Вселенной, иначе говоря, во Вселенной, не имеющей ни начала, ни конца, нет мест разрыва материи-энергии, то есть абсолютно пустых областей. Леонардо пользовался старомодным словом «вакуум», но в действительности он находился в согласии с современной концепцией универсальной непрерывности.

Один из практических вопросов, рассмотренных им, был следующий. Человек и животные могут жить в одном из четырех элементов — в атмосфере, но почему же они не могут жить в воде? И он нашел прак-

тическое решение. «Впрочем, я не хочу публиковать или раскрывать это, — говорит он⁴²⁾, — из-за дьявольской природы людей, которые использовали бы мой метод как способ уничтожать (друг друга) на дне моря... Могу лишь сказать, что конец дыхательной системы можно привязать к скале или некоторым иным способом держать над поверхностью воды».

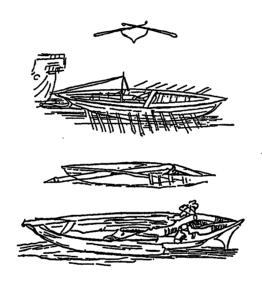


Рис. 15. Наброски лодок, выполненные Леонардо.

Затем он обсуждает различные проблемы навигации. Древние, говорит он, пользовались мельничными колесами в качестве двигателя своих судов. Эти колеса касались поверхности воды своими лопастями. Но если вода движется вместе с кораблем, скажем, в реке, и с той же скоростью, то колеса останутся неподвижными; если же вода течет быстрее корабля, то работа колес становится слишком сложной. Почему бы тогда не воспользоваться другим двигателем: прикрепить к кораблю щит таким образом, чтобы на него давил ветер? Если установить

⁴²⁾ Tagebücher und Aufzeichnungen von Leonardo da Vinci, Leipzig: 1953.

такой щит под углом, в зависимости от силы ветра, то корабль будет двигаться с требуемой скоростью...

Конечно, парус был известен и до Леонардо да Винчи. Но здесь он является в качестве технического проекта, как большой кусок ткани, обычно парусины, натянутый поперек ветра, чтобы двигать корабль в воде. Неудивительно, что это привело его к решению другой задачи: какова должна быть внешняя форма самого судна? Он дал ответ в виде набросков и рисунков лодок разных типов и размеров (рис. 15).

Независимо от того, применяется ли движущее колесо или движущий щит (то есть парус), важно, чтобы корабль двигался в воде с наименьшим возможным сопротивлением. «Поэтому, — говорит Леонардо, — человек должен учиться у рыб, поскольку они живут в воде и имеют форму, позволяющую им легко двигаться. Удивительное зрелище — как дельфины выпрыгивают из воды и делают резкие повороты, не встречая сопротивления. То же, — продолжает он, — относится к рыбам и другим животным, способным к продолжительному плаванию».

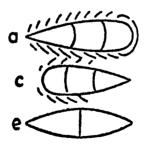


Рис. 16. Скемы Леонардо, относящиеся к теории тел наименьшего сопротивления.

Он имеет в виду следующее (рис. 16): когда тело, движущееся в воде, имеет форму (с) и направлено тупой стороной вперед, то частицы среды гладко огибают лишь переднюю часть его поверхности; в определенном месте они перестают быть «спокойными» и становятся «бурными»: в современных терминах — они отделяются от поверхности и образуют сбегающий вихрь.

Если то же тело движется острой стороной вперед, как изображено на рис. (a), то гладкое течение длиннее; но все же и в этом случае есть «ярость», а потому тело встречает сопротивление, хотя и меньшее, чем в первом случае.

Если, наконец, тело имеет форму (e), то частицы воды сохраняют гладкое движение вдоль всего тела, а потому сопротивление оказывается меньшим, чем в случае (a). И, наконец, форма рыбы осуществляет одновременно и наименьшее сопротивление, и маневренность.

Маневренность корабля, полагал он, очень похожа на маневренность рыбы. «И в самом деле, начала всех вещей нередко приводят к важным результатам: как можно видеть, почти неуловимое движение руля имеет силу повернуть корабль большой величины с тяжелым грузом и притом среди всей массы давящей на него со всех сторон воды, и против порывов ветра, действующих на его могучие паруса. Поэтому можно не сомневаться, что и птицы, способные держаться против ветра, не взмахивая крыльями, обязаны этой способностью небольшим движениям крыла или хвоста, позволяющим им опускаться ниже или подниматься выше ветра и таким образом избегать падения».

Вообще, согласно Леонардо, есть большое сходство между движением тел в воде и в воздухе. Плавание в воде объясняет людям, что делают птицы в воздухе. Но сначала надо понять, каким образом человек учится плавать, лежать на воде, защищаться от вихрей и водоворотов, тянущих его вниз, каким образом человек, утянутый на дно, находит движения, выводящие его на поверхность, и почему человек не может оставаться под водой, не сдерживая выдох.



Рис. 17. Плавательный спасательный круг по Леонардо.

Прежде чем летать, вы должны научиться плавать, а для этого, — советует Леонардо, — у вас должен быть спасательный пояс или кольцо из кожи (рис. 17). Часть этого пояса, накрывающая грудь, должна быть двуслойной, с расстоянием в палец между слоями, и точно так же она должна быть двойной от груди до колен; причем кожа должна быть непроницаемой для воздуха. Когда вам надо прыгнуть в море, надуйте юбку вашего пояса через двойной слой на груди; прыгните в море и дайте волнам нести себя; держите во рту воздушную трубку, соединенную с поясом.

Что касается полета в воздухе, то сначала человек должен изучить поведение птиц. Тогда он заметит несколько важных фактов. Прежде всего, «летательная машина», какова бы она ни была, должна избавить человека от положения грудью вверх, чтобы он мог находиться в равновесии, как он это делает в лодке. Во вторых, центры тяжести человека и машины должны уравновешивать друг друга, и в случае надобности перемещаться. В третьих, крыло, или машина, должна быть не слишком тяжелой, иначе воздух не сможет ее удержать. Прежде чем изготовлять крылья, человек должен изучить анатомию птичьих крыльев, а также грудных мускулов, движущих крыльями.



Puc. 18. Летучая мышь Леонардо.



Рис. 19. Птица Леонардо.

Однако, — предупреждает Леонардо, — человек слишком тяжел, чтобы летать, как птица. Его летательная машина должна была подражать не чему иному, как летучей мыши (рис. 18), поскольку пленки усиливают всю ее конструкцию, в то же время доставляя большую подъемную силу. Если же вы захотите подражать крыльям птиц, покрытым перьями (рис. 19), то перья — гораздо более прочная структура, так как они расположены отдельно, между ними проходит мало воздуха и они не растягивают друг друга. Но летучей мыши помогает пленка, связывающая все и непроницаемая для воздуха. Короче говоря, рассекайте летучую мышь, упорно изучайте ее, и устройте вашу летательную машину по этому образцу.

Какие другие машины человек может применить для этой цели, — спрашивает Леонардо, — и отвечает: таких немного, потому что воздух «намного более разрежен», чем вода, а потому его малая поддерживающая сила ограничивается «крылатыми машинами» и «воздушными винтами». Последний можно представить себе либо как целый водоподъемный винт Архимеда, либо как часть его (рис. 20). Если такая часть «ввинчивается в воздух» с достаточно большой скоростью, она создает направленную вверх силу, достаточную, чтобы поднять человека в воздух. Мы узнаем здесь идею современного вертолета.

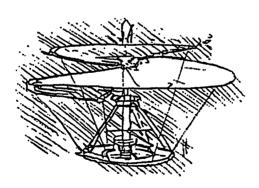


Рис. 20. Воздушный винт Леонардо — предок современного вертолета.

Посмотрите, как удары крыльев о воздух поддерживают тяжелого орла в крайне разреженном воздухе; посмотрите также, как движущийся воздух наполняет надувающиеся паруса и гонит тяжело нагруменный корабль. Из этих примеров ясно, — говорит он, — что человек с достаточно большими крыльями, надлежащим образом привязанными к его телу, мог бы научиться преодолевать влечение тяжести и сопротивление воздуха и победил бы атмосферу.



Рис. 21. Спасательный пояс Леонардо, сделанный из надутых воздухом мешков.

Но допустим, что крылья сломаются или что машина расстроится и выйдет из повиновения; как можно тогда спасти человека? — спрашивает Леонардо. И он дает четыре ответа, входящие в наше время в азбуку летательного искусства. Прежде всего, если машина расстроится на большой высоте, то у нее будет время вернуться в нормальное рабочее состояние, если только она построена достаточно прочно и достаточно сопротивляется воздуху. Во-вторых, каждый, кто летает, должен носить специальные мешки, соединенные наподобие четок (рис. 21) и прикрепленные у него на спине. Тогда человек, падающий с высоты, может избежать повреждений. В третьих, происшествия рассматриваемого рода могут быть вызваны ветром или изменениями в атмосфере, поэтому «нам нужны часы, показывающие часы, минуты и секунды, чтобы измерять, какое расстояние пройдено вместе с ветром, и чтобы знать качество и плотность воздуха, и когда должен пойти дождь». В-четвертых, тело, движущееся в неподвижном воздухе, испытывает такое же сопротивление воздуха, какое испытывает то же тело в неподвижном состояний, встречая движение воздуха с той же скоростью (принцип Леонардо да Винчи); поэтому, если привязать к падающему человеку горизонтальный парус, то воздух будет сопротивляться его падению; еще безопаснее сделать парус формы, показанной на рис. 22. Объяснительная записка, сопровождающая рисунок, говорит: Wenn ein Mensch ein Zeltdach aus abgedichteter Leinwand, das 12 Ellen breit und 12 hoch sein soll, über sich hat, so wird er sich aus jeder noch so grossen Höhe herabstürzen können, ohne Schaden

zunehmen⁴³⁾ («Если человек имеет над собой покрытие в виде палатки из уплотненного полотна, в двенадцать футов шириной и в двенадцать высотой, то он может броситься со сколь угодно большой высоты без вреда»). Так родилась идея современного парашюта.

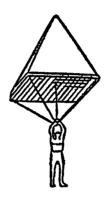


Рис. 22. Парашют Леонардо.

Работа Леонардо над механикой полета охватывает широкий круг проблем. Его рисунки птиц в различных ситуациях полета и его объяснения к ним столь прекрасны в своей точности, что послужили твердой основой механики полета самолетов.*)

Воздух (или атмосфера) означал для него непрерывное и однородное вещество, состоящее из молекул. Яркость воздуха, — говорит он, — происходит от водяного пара, «растворившегося в нем в виде неощутимых молекул». Эти молекулы, освещенные солнцем с противоположной стороны, создают видимую в воздухе яркость; а «видимый в нем цвет лазури происходит от темноты, скрытой за воздухом».

Далее, пар — это вода, а вода тяжелее воздуха: каким же образом

⁴³⁾ Tagebücher und Aufzeichnungen von Leonardo da Vinci, Leipzig: 1933.

^{•)} См., впрочем, сделанное выше примечание о времени публикации. Последнее замечание автора, разумеется, относится к существу механики полета, а не к истории ее возникновения. — Прим. перев.

она проникает в атмосферу? Леонардо дает следующее объяснение⁴⁴): «обратные вихри» ветра в устьях некоторых долин бьют по воде, вычерпывая для нее большую впадину в дне, и втягивают затем воду в воздух в виде вихря, по форме напоминающего колонну, а по цвету — облако. «Я видел, — пишет он, — как это произошло на песчаном берегу Арно. Песок был вычерпан до глубины выше человеческого роста; и гравий, вращавшийся вокруг и разбрасываемый в стороны, образовал в воздухе нечто вроде большой колокольни...».

Очевидно, Леонардо говорит здесь о так называемом торнадо — яростно вращающейся колонне воздуха, почти всегда наблюдаемой в форме обращенного усеченного конуса. Пожалуй, это самое разрушительное из всех атмосферных явлений. Его вихревая воронка, обычно в несколько сот ярдов диаметром, вращается, как циклон, со скоростью ветра от 100 до 300 миль в час. Вследствие сильного вращения, внутри торнадо возникает значительное понижение давления, втягивающее не только песок и гравий, но и целые дома. Меньшие торнадо, или вихри, бывают обычно не более нескольких сот футов в высоту и нескольких десятков футов в диаметре. Они возникают, как правило, в неглубоком слое очень неустойчивого воздуха, непосредственно примыкающем к земле.

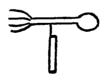


Рис. 23. Флюгер Леонардо.

Сильные ветры — не просто безобидное явление природы; нередко они причиняют человечеству большой вред. Но нельзя ли их предупредить, сделать их полезными для людей? Да, конечно, — говорит Леонардо, — если, например, наблюдать или измерять движение тени

⁴⁴⁾ Leonardo da Vinci, vol.II. Istituto Geografico de Agostini. Novara. Italy, 1964. The Literary Works of Leonardo da Vinci, («Литературные сочинения Леонардо да Винчи»). London, 1939.

облака на поверхности земли или воды, то мы узнаем направление и скорость ветра, потому что именно ветер движет облако. Но поскольку невозможно бежать за этой тенью через реки, озера, скалы и леса, нужен менее утомительный метод, и Леонардо его изображает: это очевидный предшественник современного флюгера (рис. 23). Надпись, относящаяся к рисунку, гласит: Modi di pesare l'arie eddi sapere quando s'a агготреге il tepo («Способ взвешивания воздуха, чтобы узнать, когда переменится погода»).

Симон Стевин (1548-1620)

После Леонардо одной из крупнейших личностей в науке был Симон Стевин, часто именуемый также Стевинусом, родившийся в Брюгге в 1548 году и умерший в Гааге в 1620 году. Он был военным и гражданским инженером у Морица Нассау, и это он ввел в общее употребление десятичные дроби. Подобно Леонардо, это был человек с разнообразными дарованиями. Он изобрел движимый парусом экипаж для двадцати четырех пассажиров и опубликовал несколько книг, в том числе книгу под названием «Статика и гидравлика» (Лейден, 1586), в которой он пытался, не без успеха, пересмотреть некоторые основные понятия своих предшественников и дать им правильное математическое выражение. Леонардо в своей «Оптике» развил до полного совершенства понятие треугольника. Но именно Стевин (насколько известно) впервые ввел понятие треугольника сил (в действительности, треугольника векторов) или, что то же самое, параллелограмма сил.

За этим открытием стояла, в общих чертах, следующая философская теория. Вообще говоря, материальное тело находится под действием различных сил, имеющих разные направления. Например, падающее тело находится под действием его собственного веса, сопротивления воздуха и силы ветра; первая из этих сил направлена вертикально вниз; последняя действует в направлении ветра, препятствуя, таким образом, телу падать вертикально; а сила сопротивления воздуха всегда действует в направлении, противоположном направлению движения тела. Вопрос состоял в том, как описать действие такой системы сил.

«Представим себе, — говорит Стевин, — что имеется цепь ABCD, перекинутая через ребро призмы (рис. 24). Она будет находиться в

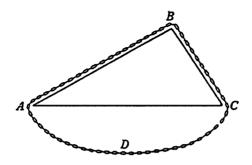


Рис. 24. Цепь Стевина.

покое, вместе со свисающей частью D. Если мы удалим из нее часть D с помощью разрезов в точках A и C, то оставшиеся части BA и BC все еще останутся в равновесии. А это значит, что любые два тела на гранях BA и BC, связанные бечевкой, также останутся в равновесии, если их веса относятся, как длины граней. Отсюда с помощью простой математики получается правило параллелограмма сил, как видно из его следующего доказательства. Вот окончательный результат.

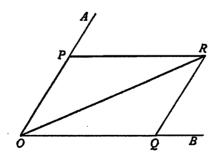


Рис. 25. Параллелограмм сил Стевина.

Пусть силы разного направления приложены в точке O (рис. 25). Пусть длины OP и OQ пропорциональны величинам сил. Тогда диагональ параллелограмма OR, построенного на этих силах, есть резуль-

тирующая сила, действующая на тело в точности так же, как если бы обе силы OP и OQ действовали одновременно и независимо».

Впрочем, следует заметить, что идея разложения сил указанным образом не была чужда и Леонардо. Он задавался вопросом, каким образом вес тяжелого тела, подвешенного к двум нитям, распределяется между ними. И он думал, что вес тела, подвешенного в точке b, распределяется между нитями bd и ba в отношении длин ea и de (рис. 26). Такое заключение неверно, но, как мы видим, Леонардо также уделил этой проблеме некоторое внимание.

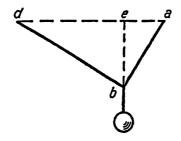


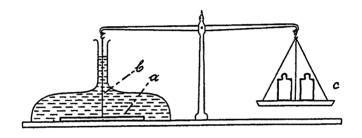
Рис. 26. Схема разложения сил, согласно Леонардо.

Но вернемся к Стевину. Он сделал серьезную, и притом небезуспешную попытку дать Предложениям Архимеда математическое и экспериментальное доказательства. Занимаясь этим, он обогатил статику текучих сред Архимеда дальнейшими примерами и иллюстрациями. Один из его наиболее важных вкладов, и несомненно оригинальный, был «принцип отвердения». Согласно этому принципу, твердое тело любой формы, с той же плотностью, что и жидкость, останется в этой жидкости в полном равновесии, каково бы ни было его положение, не нарушая при этом давления в остальной части жидкости.

Чтобы понять и оценить важность этого принципа, надо иметь в виду, что в рассматриваемое время еще не было математических методов для вычисления того, как распределяется давление на опущенное в жидкость тело. Можно думать, что Стевин был первым, кто попытался создать такой метод, на основе его «принципа отвердения».

Именно он установил, что давление не зависит от формы тела, а зависит только от веса столба жидкости над ним 45).

Другой его оригинальный вклад — установление так называемого «гидростатического парадокса»: давление на дно сосуда, содержащего жидкость, зависит лишь от (горизонтальной) площади дна и от глубины под поверхностью жидкости, но не зависит от формы сосуда. Вот как он это доказывает (рис. 27): одна и та же легкая пластина (а) помещалась на дно сосудов разной формы, которые все наполнялись одной и той же водой. Во всех случаях давление измерялось с помощью бечевки (b) гирями (c), и оказывалось одинаковым.



Puc. 27. Гидростатические весы Стевина.

Наконец, Стевин описывает, как он и его сотрудник Грет (Gretius) ставили опыты над падением тел под действием тяжести и обнаружили, что легкое и тяжелое тело, брошенные с одинаковой высоты, долетали до земли в одинаковое время. Это противоречило теории Аристотеля, по которой тела разного веса не должны были достигать земли за одно время.

Стевин полностью использовал идею Леонардо о затворах от наводнений и развил на этой основе целую систему оборонительных линий, а также руководил строительством каналов, водных резервуаров и т. д.

⁴⁵⁾ Histoire des sciences mathématiques et physiques chez les Belges. Brussels: L. A. J. Quetelet, 1866.

Галилео Галилей (1565-1642)

Архимед заложил основы статики текучих сред; Леонардо да Винчи и Стевин первые возобновили ее изучение; но Галилео Галилей основал общую динамику, без которой не было бы ни механики текучих сред, ни механики вообще. Он не мог согласиться с некоторыми основными понятиями механики Аристотеля. Например, он не мог поверить, как и Стевин, что тела разного веса падают по-разному, и чтобы доказать свою правоту, провел ряд опытов сбрасывания различных тел с одной и той же высоты, вероятно, с вершины падающей башни в Пизе, причем оказалось, что пушечное ядро и мушкетная пуля достигали земли за одно и то же время, вопреки учению Аристотеля⁴⁶).

Уже в 1604 году Галилей пришел к заключению, что расстояния, пройденные падающими телами, пропорциональны квадратам времен падения, $s=kt^2$, где k — постоянный коэффициент; это один из классических законов механики. Отсюда следовало, что расстояния, пройденные за равные времена, относятся друг к другу, как последовательные нечетные числа, начиная с единицы.

Оказалось, что предыдущий закон имеет основное значение и в общей механике, и в механике текучих сред. Но роль Галилея в механике текучих сред идет дальше этого. Он ввел в недвусмысленной форме понятия «инерции» и «импульса», усовершенствовал древние водяные часы, усовершенствовал параллелограмм сил Стевина, стал известен как «отец баллистики» и т. д., и т. д. Чрезвычайно интересен способ, которым он развил свою баллистическую теорию. «Представьте себе, — говорит он, — что вы запускаете шар, движущийся по горизонтальной плоскости. Тогда если он движется беспрепятственно, то сразу же после достижения края плоскости шар начнет двигаться также вниз под действием собственного веса, т. е. движение будет иметь компоненты по направлениям вперед и вниз, и траекторией шара будет парабола» (рис. 28). Он назвал этот вид движения проекцией (откуда происходит слово projectile*).

Это утверждение верно и для жидких частиц. Но Галилей изучал

⁴⁶⁾ Sir James Jeans. *The Growth of Physical Science* («Развитие физической науки»). Cambridge, 1947.

^{•)} Англ. «снаряд». — Прим. перев.

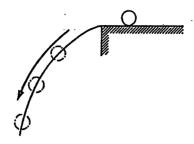


Рис. 28. Парабола Галилея — траектория снаряда.

механику текучих сред в более широком смысле⁴⁷). В работе под названием Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua o que in quella si muovono*) (Флоренция, 1612) он изложил превосходную теорию статики текучих сред. Кстати, в этой публикации он ввел понятие 'momento' (англ. momentum — «импульс»).

Если, — говорит он, — два тела совершенно равного веса (сегодня мы сказали бы — массы) движутся с равными скоростями, то они имеют одинаковую «силу», или одинаковый импульс: «это то самое свойство, то действие, та сила, активное начало которой движет тело, и которой тело сопротивляется». Может быть, следует прибавить, что теперь импульс тела определяется как произведение его массы на линейную скорость, в то время как момент количества движения, или угловой момент (англ. moment of momentum, или angular monentum), определяется как произведение его момента инерции на угловую скорость. Таким образом, импульс есть $m\bar{v}$, а угловой момент есть $I\bar{\omega}$. И импульс, и угловой момент — векторные величины. Чтобы подчеркнуть важность галилеева «momento», напомним также, что ввиду отношения импульса к силе, участвующей в законах Ньютона, это фундаментальное понятие всей динамики, и, в частности, динамики текучих сред; в силу этого Галилей занимает также выдающееся место среди создателей науки о течениях вещества.

⁴⁷⁾ См. «Полное собрание сочинений Гали́лея», Флоренция: 1908.

 ^{*) «}Рассуждение о предметах, находящихся над водой или движущихся в воде». — Примеч. перев.

Как я уже сказал, Галилей предполагал, что скорость падающего тела в любой момент пропорциональна времени, прошедшему с момента, когда тело отпущено; каким же образом он мог измерять столь малые промежутки времени?

Прежде всего, он очень остроумно усовершенствовал водяные часы, устроив их так, что вода капала в сосуд, а затем с большой точностью измерялся вес упавшей воды; но все же времена, которые надо было измерять, были слишком уж малы. Соответственно этому Галилей замедлил ход своего эксперимента, заменив быстрое вертикальное падение медленным скатыванием по пологому склону и предполагая, что в обоих случаях должны действовать одни и те же законы — как оно и было в действительности. Он взял доску примерно двенадцати ярдов длиной, вырезал в ней узкий жолоб и, установив ее со слабым наклоном, скатывал по ней тщательно отполированные стальные шары. При помощи этого простого устройства он сумел проверить свое предположение, что скорость падения равномерно возрастает со временем.

Галилео Галилей показал, что действие силы состоит не в том, что она производит движение, а в том, что она изменяет движение, то есть производит ускорение. Много позже сэр Исаак Ньютон придал этому выводу математическую форму в своем знаменитом втором законе; с этого времени все отрасли динамики, в том числе гидродинамика, могли развиваться на прочной философской основе.

Может быть, именно здесь уместно сделать особенно важное замечание. Как писал покойный сэр Джеймс Джинс: ⁴⁸⁾, «Последователи Аристотеля учили, что всякое движение нуждается в поддерживающей его силе, так что тело, на которое не действует никакая сила, должно покоиться. В соответствии с этими представлениями сам Аристотель ввел свой Неподвижный Движитель, который есть Сам Бог, поддерживающий движение планет, а средневековые богословы предположили, что этой цели служат сменяющие друг друга команды ангелов. И вот оказалось, что для сохранения движения тела требуется всего лишь, чтобы его предоставили самому себе; причем тело, на которое не действует никакая сила, вообще говоря, не будет оставаться в покое, но будет двигаться с постоянной скоростью по прямой линии, поскольку ничто не будет изменять его движение». (Курсив автора).

⁴⁸⁾ The Growth of Phisical Science («Развитие физической науки»). 1947.

Я думаю, что эти утверждения и подобные высказывания других авторов, по меньшей мере, вводят в некоторое заблуждение. В самом деле, во вселенной нет и никогда не было таких тел, на которые не действовала бы никакая сила; поэтому никогда не бывает, чтобы тело, не находящееся под действием сил, двигалось с постоянной скоростью — или с какой бы то ни было скоростью вообще.

Галилей знал, конечно, что его скатывающиеся шары испытывают действие трения и сопротивления воздуха, в особенности последнего, которое он очень серьезно изучал. Если бы не сопротивление воздуха, — говорил он, — то траектория шара, срывающегося с горизонтальной плоскости, была бы совершенной параболой, но «сопротивление воздуха влияет на движение тела». Впрочем, он не предложил метода его измерения, а по другому поводу позволил себе заметить: «сопротивление воздуха настолько мало, что им можно пренебречь». Некий Сальвиати критиковал Галилея за это допущение, говоря, что, напротив, сопротивление воздуха «очень значительно» и может «превратить параболу в не-параболу».

Уже Архимед опроверг учение аристотелевой школы, по которому тело тонет или плавает в воде в зависимости от его формы. Галилей же доказал на опыте, что тело тонет не вследствие его формы, а в зависимости от его плотности по отношению к плотности жидкости, в которую оно погружено. Архимед и Леонардо да Винчи не только пользовались понятием «давления», но знали, что в каждой точке соприкосновения с жидкостью тело находится под определенным давлением. Симон Стевин первым сформулировал различие между липкой (то есть вязкой) и нелипкой (то есть идеальной) жидкостью, а Галилей показал теоретически и экспериментально, что давление в каждой точке жидкости зависит только от «столба жидкости» над этой точкой (откуда, кстати, и происходит термин «столб жидкости» в современной гидромеханике).

Все мы знакомы с так называемым сифоном: это, как правило, U-образная трубка, через которую жидкость поднимается вверх, а затем переводится на более низкий уровень (рис. 29). Есть свидетельства о том, что уже Архимед, а может быть и Леонардо, понимали возможность этого явления. Кажется неправдоподобным, чтобы его не знал Стевин.

Галилей не только был знаком с принципом сифона, но изучал его,

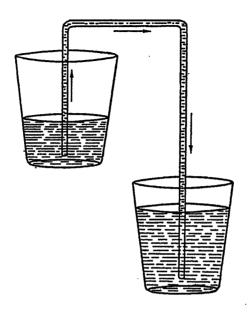


Рис. 29. Принцип сифона.

теоретически и экспериментально. Это привело его к заключению, что небольшая масса жидкости (заключенная в узкую трубку) может находиться в равновесии с большой массой жидкости (содержащейся в широком сосуде), потому что — как он выражается — небольшое понижение уровня жидкости в сосуде вызывает большое увеличение ее высоты в трубке⁴⁹⁾.

Как нам рассказывают⁵⁰⁾, ero Discorsi («Рассуждения»), книгу о статике жидкостей, подвергли критике Л. де Куломб (L. de Coulombe) и В. ди Грациа (V. di Grazia), а защищал ее Бенедетто Кастелли (Benedetto Castelli) (1577–1644). Последний был автором трактата об

¹⁹⁾ Полное собрание сочинений Галилея. Итальянское национальное издание, Флоренция: 1908.

⁵⁰⁾ René Dugas. A History of Mechanics («История механики»). London: Routledge and Kegan Paul, Ltd, 1955.

измерении текущей воды (Della misura dell'acque correnti, 1628); он применял закон Леонардо о связи скорости с площадью AV= const и подчеркивал его важность во всех задачах о течении жидкостей.

Леонардо был, по-видимому, первым, кто пытался определить вес воздуха по отношению к трем другим «элементам» природы или, по крайней мере, об этом задумался. Галилей же, вероятно, первый в самом деле взвесил баллон, наполненный воздухом, в холодном и нагретом состоянии.

Эванджелиста Торричелли (1608-47) и Отто фон Герике (1602-86)

Другой выдающийся итальянский математик, Торричелли, в весьма значительной степени содействовал рождению и формированию механики текучих сред. Среди прочих вещей он занялся галилеевыми траекториями снарядов и сделал следующий шаг в этом вопросе. Например, Галилей лишь бегло заметил, что если два в точности одинаковых тела приводятся в движение в точках A и B (рис. 30) с точно одинаковыми скоростями, то они будут двигаться по одной и той же параболической траектории. Но Торричелли подверг эту задачу более основательному анализу⁵¹⁾ и дал ей тщательное теоретическое доказательство.

Как известно, Галилей интересовался тем, что Аристотель и другие называли horror vacui*). Но лишь ученик и коллега Торричелли, Винченцо Вивиани (1622–1703) разработал метод исследования этого вопроса и провел его во Флоренции в 1643 году. Чтобы понять, что сделали Торричелли и Вивиани и какие у них были мотивы, я посоветовал бы вам выполнить простой собственный эксперимент у себя в кухне или в ванной. Наполните водой обыкновенный стакан, затем прикройте его ладонью руки и поверните в этом состояние вверх дном; далее, слегка погрузите его в воду (содержащуюся в каком-нибудь сосуде), и удалите руку; тогда вы заметите две вещи: во-первых, вода в стакане не стекает вниз, хотя и стоит выше, чем в сосуде, куда по-

⁵¹⁾ René Dugas. A History of Mechanics. London: Routledge and Kegan Paul, Ltd, 1955.

^{*) «}Страх пустоты» (лат.). — Прим. перев.

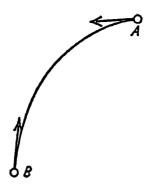


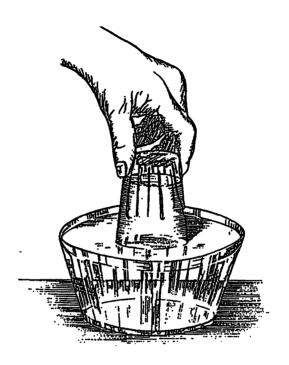
Рис. 30. Парабола Торричелли.

гружен стакан; во-вторых, над водой в стакане оказывается небольшое пространство без воды (рис. 31).

Это пространство, свободное от воды, есть так называемая «торричеллиева пустота» или «вакуум Торричелли». Позже Вивиани заменил стакан изогнутой стеклянной трубкой, а воду ртутью, что дало ему гораздо лучшую возможность измерить величину вакуума. Но что же удерживает воду в стакане и ртуть в трубке? Конечно, это атмосферное давление. Чем больше это давление, тем выше будет столбик воды или ртути или, что то же, тем меньше будет высота вакуума. Так эксперименты Торричелли и Вивиани привели к изобретению манометра — очень важного прибора в механике текучих сред.

Позже читатель увидит, почему я здесь не прибавляю, что этот опыт опровергает horror vacui Аристотеля и его последователей.

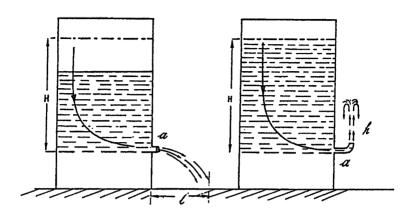
Примерно десятью годами раньше и совершенно независимо horror vacui был исследован также Герике в Магдебурге, в Германии. Его опыты были гораздо более изощренные и уж, конечно, более механические. Несомненно, вы помните из школьного учебника физики следующее описание: Герике, бургомистр Магдебурга, соорудил два больших полушария, приставил их друг к другу, выкачал воздух из получившегося таким образом шара, то есть создал вакуум внутри этого шара, и после этого понадобилось шестнадцать лошадей, по четыре пары на каждое полушарие, чтобы отделить полушария друг от друга. Таким



 $Puc. \ 31. \ \Pi$ ростой опыт, демонстрирующий вакуум Торричелли.

образом, Герике также доказал, что может существовать глубокий вакуум — глубокий, но не абсолютный.

В истории механики текучих сред Торричелли пользуется также репутацией изобретателя гидродинамики, что несоразмерно с его подлинным вкладом в эту науку. Мы попытались собрать все его работы по динамике потоков жидкости, но не нашли достаточно оригинальных открытий, оправдывающих такое название. Но, несомненно, он изучал свойства истекающих потоков воды. Он проделал дырочку а вблизи дна сосуда с водой (рис. 32), а затем, вставляя в нее насадки различной конфигурации, заметил, что, во-первых, с помощью насадки можно «усилить» поток воды; а во-вторых, что при данной насадке расстояние l зависит только от высоты H воды в сосуде.



Puc. 32. Схема Торричелли для вывода знаменитого «закона Торричелли».

Далее, Торричелли задал себе вопрос: вытекающая струя достаточно сильна, чтобы пройти расстояние l; на какую же высоту она может подняться, если заставить ее течь вверх? Несомненно, он пытался ответить на этот вопрос теоретически и, вероятно, определил вес жидкости над отверстием насадки как «силу, выталкивающую струю из отверстия». Затем он экспериментировал с подлинными вертикальными струями и обнаружил, к своему удивлению, что всегда h < H, или $H - h = \Delta h > 0$.

Как он справедливо замечает, этому могут быть две причины: вопервых, сопротивление трения об насадку; во-вторых, сопротивление воздуха после выхода из насадки. Пренебрегая последним, он принимает в расчет два установленных ранее факта: во-первых, расстояние свободного падения есть $s=h=\mathrm{const}\,t^2=gt^2/2$, и во-вторых, скорость свободного падения v=gt. Отсюда он и выводит знаменитый закон Торричелли,

$$s = h = \frac{g}{2} \frac{v^2}{g^2} = \frac{v^2}{2g}, \quad v = \sqrt{2gh},$$

столбовой камень в истории механики текучих сред — величайший для того времени, если не для всей истории механики текучих сред. С этой

Блез Паскаль

формулой мы еще не раз встретимся (например, в параграфе, посвященном работам Даниила Бернулли).

Блез Паскаль (1623-62)

Паскаль, один из великих французских ученых и философов, проводил эксперименты с равновесием жидкостей и с разностями бариметрического давления на разных высотах. Он повторил опыт Торричелли, применив красное вино и стеклянную трубку, и более полным образом объяснил явление сифона. Он был блестящим апологетом христианской веры и выдающимся ученым, пытавшимся построить компромисс между догмами о сверхъестественном и научными открытиями, но это ему так и не удалось. В его работе «Равновесие жидкостей и вес массы воздуха» (1663) Паскаль не только рассмотрел все гидро- и аэростатические проблемы, изучавшиеся его предшественниками, но расширил и развил их в логически связную теорию статики текучих сред⁵²⁾. Он занимался следующими задачами: изменение веса жидкости с глубиной; равновесие жидкостей; равновесие между жидкостью и твердым телом; тела, полностью погруженные в жидкость; погруженные сжимаемые тела; животные в воде и т. д.

Установив таким образом основные законы для покоящейся воды, Паскаль мог легко перейти к изучению атмосферы, что он и сделал. Он знал, что «тяжесть» ее была доказана уже давно миланским математиком и философом-естествоиспытателем Джироламо Кардано (1501–76), но он хотел определить ее настоящий вес. При решении этой задачи и других, с ней связанных, Паскаль сформулировал почти все основные законы аэростатики, например: (1) поскольку любая часть воздуха имеет вес (массу), то, следовательно, и весь он имеет вес (массу); (2) поскольку масса воздуха покрывает всю поверхность Земли, его вес повсюду давит на Землю; (3) вследствие гидростатического закона более высокие части Земли, такие как вершины гор, испытывают меньшее давление, чем низкие части; (4) тела в воздухе сдавливаются со всех сторон.

Далее, он обращает внимание на повседневный опыт: почему так трудно раскрыть сложенные мехи, если все их отверстия закупорены;

^{52) «}Собрание сочинений Паскаля». (Translated into English by H. B. and A. G. H. Spiers), New York: Columbia University Press, 1937.

почему две полированные поверхности, приложенные друг к другу, так трудно разделить, как будто они склеены; почему шприц, опущенный в воду, при поднятии поршня наполняется водой, как будто к нему прилипшей; и т. д.?

«Главная причина всех этих явлений — это вес воздуха, — говорит Паскаль, — хотя до сих пор они приписывались horror vacui...». Таким образом, он знал уже, что определенного рода вакуум в самом деле возможен. Но он знал также, что невидимая сила атмосферы может творить «чудеса давления». Пожалуй, можно сказать метафорически, что в день, когда ученый и учащийся мир осознали роль атмосферного давления, сразу же широко открылись ворота по пути к статике текучих сред.

Одним из заключений Паскаля была его теорема, по которой данный объем текучей среды имеет вес, соответствующий глубине (атмосферной высоте), на которой он взят. Другое интересное заключение он формулирует в таких выражениях: «тело никогда не движется вследствие своего веса — оно движется лишь тогда, когда движется его центр тяжести». Первое из этих заключений привело людей к установлению законов изменения физических свойств атмосферы с высотой; второе же стало азбукой гидравлической механики и всевозможных машин.

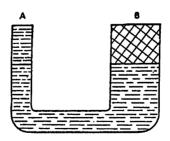


Рис. 33. Схема гидростатического равновесия, согласно Паскалю.

«В самом деле, — говорит Паскаль, — поршни A и B (рис. 33) на-ходятся в равновесии, потому что их общий центр тяжести есть точка, делящая прямую, проходящую через их центры тяжести, в отношении

их весов. И если они станут двигаться, то их пути будут относиться друг к другу, как их обратные веса, а их общий центр тяжести будет находиться в точности там же, где был раньше».

Технические следствия этого простого принципа оказались революционными. Прежде всего, еще до Стевина и Паскаля было известно, что давление жидкости нормально к поверхности, на которую оно действует. Во-вторых, Стевин, и в особенности Паскаль, показали, что давление, приложенное к поверхности жидкости, почти мгновенно передается всем частям жидкости. В-третьих, Стевин предположил, а Паскаль доказал, что давление в любой точке жидкости одно и то же во всех направлениях и зависит только от глубины.

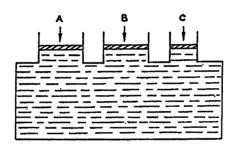


Рис. 34. Принцип пропорционального гидростатического давления.

Давление жидкости измеряется силой (в килограммах), приложенной к единице площади (в квадратных метрах), т. е. p = сила/площадь. Было показано, что если замкнутый сосуд наполнен водой и A и B — два одинаковых отверстия на верху сосуда (рис. 34), закрытые поршнями, то любое давление, произведенное на A, должно быть уравновешено равным давлением на B, чтобы этот поршень не был вытолкнут наружу; и что если C — поршень другого размера, то приложенное к нему давление должно относиться к давлению на A, как площадь C относится к площади A, причем это верно и в том случае, если поршня B вовсе нет 53). Более общим образом, если в сосуде любой формы

⁵³⁾ W. H. Besant. Elementary Hydrostatics («Элементарная гидростатика»). Cambridge: Deighton, Bell & Co., 1873.

имеется несколько отверстий, закрытых поршнями, которые удерживаются в равновесии подходящими силами, то любая добавочная сила P, приложенная к одному из поршней, для сохранения равновесия требует приложения ко всем другим поршням добавочных сил, отношение которых к P должно быть равно отношению площади поршней к площади того поршня, где приложена сила P.



Рис. 35. Воображаемая трубка среды.

Начиная со Стевина, все занимавшиеся проблемами этого рода стремились понять механизм передачи давления в текучей среде. Разные авторы предлагали различные объяснения и доказательства, итогом которых было следующее рассуждение, обычно приписываемое Паскалю. Пусть А и В — две точки в покоящейся жидкости; опишем вокруг прямой AB как вокруг оси цилиндр с плоскими гранями, перпендикулярными AB, и представим себе, что этот цилиндр стал твердым (рис. 35). Равновесие этого цилиндра поддерживается давлением жидкости на его концы, параллельным этой оси, давлением жидкости на кривую поверхность, перпендикулярную этой оси, и его весом, который вертикален. Вычисляя составляющую вдоль направления АВ, мы видим, что разность давлений в A и B должна быть равна составляющей веса в направлении BA, и так как вес остается неизменным, то любое изменение давления в A вызывает такое же изменение в B. Более того, если жидкость содержится в сосуде любой формы и прямая АВ не лежит полностью в жидкости, то две точки можно соединить рядом отрезков, таких как АСДВ (рис. 36), и любое изменение давления в A вызывает такое же изменение в C, которое, в свою очередь, вызывает такое же изменение в B, и наоборот.

Но и Стевин, и Паскаль, как и многие другие, должны были еще доказать равенство давлений во всех направлениях в любой точке жидкости. Доказательство предложил Паскаль. Он представил себе в жидкости бесконечно малую призму, находящуюся в равновесии (рис. 37, 38).

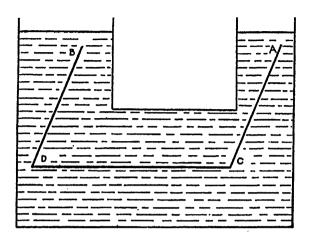


Рис. 36. Схема доказательства распределения гидростатического давления.

Пусть d — длина призмы, a,b,c — стороны треугольника, w — вес единичного объема жидкости и p,p',p'' — давления на стороны AC,CB и BA; тогда Паскаль вполне правильно заключает, что результирующие силы равны $(p \cdot bd), (p'ad)$ и (p''dc), а вес $= \frac{1}{2}ab \cdot dw$.

Поэтому, взяв вертикальную и горизонтальную составляющие, имеем

$$\frac{1}{2}abw = p'a - p''c\cos B, \quad pb = p''c\sin B;$$

но $a=c\cdot\cos B$, $b=c\cdot\sin B$, откуда p=p'', $p'-p''=\frac{1}{2}b\cdot w$. Далее, Паскаль предполагает, что стороны a и b бесконечно уменьшаются, так что p, p' и p'' становятся давлениями в различных направлениях в точке C. Тем самым показано, что p'=p'' и, следовательно, p=p'=p'', то есть все три давления в точке C равны. Поворачивая призму вокруг AC и меняя углы A и B, Паскаль доказывает, что утверждение справедливо для всех направлений.

Таковы были основные этапы развития статики текучих сред. Но механика текучих сред еще должна была возникнуть; наука о движениях текучих сред под действием сил еще не существовала, хотя Торричелли и сделал важный шаг в этом направлении.

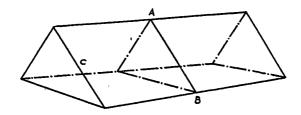


Рис. 37. Результирующее давление сил, действующих на грани бесконечно малой призмы среды.

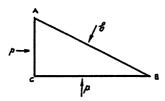


Рис. 38. Бесконечно малая призма среды.

Сэр Исаак Ньютон (1642-1727)

Невозможно выделить какой-нибудь частный вклад Ньютона в механику текучих сред, поскольку почти все фундаментальные концепции этой науки построены на основных законах Ньютона.

Его второй закон вводит новое понятие силы: сила — то, что изменяет импульс, а импульс определяется Ньютоном как произведение массы тела на скорость движения; масса же определяется как «произведение объема тела на его плотность». Надо сразу же сказать, что в природе нет ньютоновых (сосредоточенных) сил; но поскольку определение Ньютона удовлетворяло, и до сих пор удовлетворяет всем основным потребностям классической механики, мы проявим к нему «терпимость», оставив его на некоторое время без комментариев (см. последний раздел книги).

Второе замечание, имеющее важное историческое значение, состоит в следующем. Как мы видели, проблемы гравитации, инерции и движения тел были сформулированы до Ньютона. Но ни одна из них не появилась в столь простой, прекрасной в своей завершенности форме, как в ньютоновых законах движения. Его Philosophiae Naturalis Principia Mathematica («Математические начала естественной философии») стали поворотной точкой всех путей механики — по выражению Лагранжа, «величайшим произведением человеческого ума». Лаплас сказал, что вклад Ньютона в научное знание превосходит все достигнутое в истории науки до него, и что его Principia будут всегда сиять, как светоч человеческого гения.

Если сжато изложить механику Ньютона, то в основе ее лежат следующие законы.

Материальное тело никоим образом не изменяет своего движения, иначе как под действием приложенной к нему силы; покоящееся тело остается в покое, а равномерно движущееся — продолжает двигаться в том же направлении, с той же скоростью, пока на него не подействует сила; скорость изменения момента пропорциональна вызывающей его силе; для каждого действия силы существует противодействие, или реакция. В еще более сжатой и популярной форме это сводится к следующим трем законам движения: (1) каждая материальная частица сохраняет свое состояние покоя или равномерного движения по прямой линии, если только сила не вынудит ее изменить это состояние; (2) скорость изменения момента $(m\bar{v})$ со временем пропорциональна движущей силе и происходит в направлении прямой, по которой действует сила; (3) взаимодействие между двумя частицами представляется в виде двух сил, равных по величине, но противоположно направленных вдоль прямой, соединяющей частицы.

Как мы увидим в дальнейшем, эти законы, при всей их глубокой важности, не свободны от философской критики. Но даже и эта критика требует знания... тех же законов! — в особенности второго закона, имеющего следующую математическую форму:

$$\overline{F} = \frac{d}{dt}(m\overline{v}) \equiv m\frac{d\overline{v}}{dt} = m \cdot \overline{a} = \frac{W}{a}\overline{a},$$

где F — сила, m — масса, \bar{v} — скорость, \bar{a} — ускорение, W — вес, t — время, а d — символ дифференцирования.

Сэр Исаак Ньютон постулировал, что каждая существующая в природе текучая среда состоит из совершенно сферических упругих

частиц, находящихся на равном расстоянии друг от друга. Тогда согласно первоначальной теории Ньютона движущееся в такой среде твердое тело сообщает импульс всем частицам, которые оно встречает на своем пути. Частицы же не сообщают свое движение соседним частицам.

Исходя из этого, Ньютон пытался построить теорию сопротивления текучей среды и получил интересные результаты. Он нашел, что для твердого цилиндра сопротивление равно весу цилиндра жидкости с тем же основанием, что и твердый цилиндр, высота которого вдвое больше той высоты, с которой должно падать тяжелое тело, чтобы достичь скорости движения цилиндра. Сопротивление движению сферы оказалось равным половине сопротивления движению цилиндра в тех же условиях.

Но вскоре сам Ньютон опроверг эти заключения. Предположив теперь, что поток жидкости не является потоком изолированных шаров, выстроенных в совершенном порядке, а непрерывной цепью частиц, он изучил действие такого потока на кривую поверхность и пришел к новому выводу, что сопротивление, испытываемое твердым цилиндром в поступательном движении, равно весу цилиндра жидкости, основание которого то же, что у твердого цилиндра, и высота которого равна половине высоты, с которой должно упасть тяжелое тело, чтобы достичь скорости движения цилиндра в жидкости; это вчетверо меньше, чем в предыдущей теории. Он нашел также, что длина цилиндра не влияет на сопротивление — заключение, к которому мы еще вернемся впоследствии.

Сущность теории Ньютона состоит в том, что молекулы или частицы предполагаются движущимися по прямым до соударения с поверхностью тела. Когда это происходит, они теряют компоненту импульса, нормальную к телу. Если взять, например, наклонную плоскую пластину (рис. 39), то получаем

$$R = (mv)_n = (\rho \cdot A \cdot v_{\infty}v)_n = \rho A_n v_{\infty} v_n$$

= $\rho A \sin \alpha v_{\infty} v_{\infty} \sin \alpha = \rho A v_{\infty}^2 \sin^2 \alpha$,

где ρ — плотность массы потока, A — площадь пластины и α — угол наклона к потоку. Это — так называемый ньютонов закон сопротивления «с квадратом синуса». Впрочем, этого закона нет в трудах самого

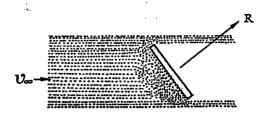


Рис. 39. Ньютонова модель потока, падающего на наклонную пластину.

Ньютона; он был выведен другими исследователями⁵⁴⁾.

До сих пор мы рассматривали главные этапы истории механики текучих сред, предполагая их идеальными, то есть не вязкими. Но это не значит, что первооткрыватели этой науки не знали о существовании трения в реальных средах.

В самом деле, Микель Анджело Буонарроти (1475-1564), более изваестный как Микеланджело, великий итальянский скульптор, живописец, архитектор и поэт Высокого Ренессанса, который был автором многих крупнейших инженерных проектов в Риме, в том числе гидравлических, заметил, что скорость потока воды больше в центре этого потока, чем у его берегов. Это позволяет предполагать, что он знал о существовании в жидкости трения. Леонардо да Винчи, в свою очередь, определял даже главные параметры, влияющие на сопротивление реальной жидкости движению твердого тела. Рене Декарт (1596-1650) (по латыни Renatus Cartesius, откуда происходит английский термин cartesian coordinates — декартовы координаты), французский ученый и философ, установивший в своей La géometrie («Геометрии») $^{55)}$ «картезианскую» систему математической уверенности, также изучал проблему трения между двумя слоями жидкости. Затем были Торричелли и Вивиани, пытавшиеся даже найти на опыте связь между кинематическими характеристиками и трением в струях воды; Даламбер же при-

⁵⁴⁾ Theodore von Karman. Aerodynamics («Аэродинамика»). Ithaca: Cornell University Press, 1953.

⁵⁵⁾ См., например, Descartes. Philosophical Writings («Философские труды») (selected and translated into English by Norman Kemp Smith). New York: Random House, 1958.

шел к выводу, что без помощи опыта невозможно получить надежные результаты в этом вопросе. «Я должен признаться, — говорит он, — что не знаю, как теоретически объяснить сопротивление жидкостей, потому что теория приводит к нулевому сопротивлению...».

Проблема сопротивления текучих сред оставалась нерешенной до конца 17-го столетия, когда Ньютон в Англии и Гильельмини (Guillelmini) в Италии, независимо друг от друга, опубликовали свои знаменитые работы. Гильельмини в своей книге Della natura de fiumi («О природе потоков», Roma, 1697) сделал решительную попытку проанализировать физическую природу трения между жидкостью и твердыми поверхностями и найти его математическое выражение⁵⁶). Но его опередил, и во времени, и в существе дела, сэр Исаак Ньютон⁵⁷).

Между прочим, Ньютон писал, что жидкость — это тело, частицы которого могут двигаться относительно друг друга под действием любой силы, что подразумевает отсутствие трения. Но в той же книге он не только допускает существование трения, но и определяет его силу: даже Ньютон не свободен от противоречий!

Если части массы жидкости вынуждаются двигаться относительно друг друга, — говорит теория Ньютона, — то это движение постепенно убывает, если его не поддерживают внешние силы. И обратно, если часть массы жидкости сохраняет свое движение, то это движение постепенно сообщается остальной жидкости. Эти эффекты, наблюдавшиеся задолго до рождения Ньютона, он приписывает defectus lubricitatis, то есть недостатку скользкости, или внутреннему трению, или — в современной терминологии — вязкости среды. Вот соответствующие иностранные термины: frottement intérieur и viscosité по-французски; innere Reibung и Viscosität или Zähigkeit по-немецки; внутреннее трение и вязкость по-русски*).

Если A и B (рис. 40) — две частицы вязкой текучей среды, скользящие одна по другой, то существует трение, или вязкое сопротивление вдоль поверхности ab. Сила этого сопротивления называется сдвигающей силой, а величина сдвигающей силы на единицу площади называ-

⁵⁶⁾ Bossu. Traité d'hydrodynamique («Курс гидродинамики»). Т. 2.

⁵⁷⁾ Philosophiae naturalis principia mathematica («Математические начала естественной философии»), Book II, 1687.

^{•)} А также internal friction или viscosity по-английски. — Прим. перев.

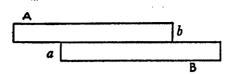


Рис. 40. Два слоя текучей среды, скользящие друг по другу.

ется напряжением сдвига.

Величина напряжения сдвига зависит от скорости, с которой два слоя среды скользят друг по другу:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dy},$$

где μ — коэффициент абсолютной или динамической вязкости, определяемый соотношением

$$\mu = \rho \nu$$

где ν — так называемая «кинематическая вязкость», а ρ — плотность массы среды.

В обозначениях рис. 41 подлинное описание Ньютона имеет следующий вид:

«Если твердый бесконечно длинный цилиндр, погруженный в бесконечную равномерную жидкость, вращается равномерным движением вокруг заданной оси, причем жидкость понуждается к вращению только этим воздействием цилиндра, и каждая часть жидкости сохраняет равномерное движение, то я утверждаю, что периоды времени вращения частей жидкости относятся, как их расстояния от оси цилиндра.

Пусть AFL — цилиндр, равномерно вращающийся вокруг оси S, и пусть концентрические круги BGM, CHN, DIO, EKP и т. д. разделяют жидкость на бесконечное множество концентрических цилиндрических слоев одинаковой толщины. Тогда, поскольку жидкость однородна, давления, производимые смежными слоями друг на друга, будут (по нашей гипотезе) пропорциональны их смещениям относительно друг друга и площадям граничных поверхностей, по которым производятся эти давления. Если давление на некоторый слой больше или

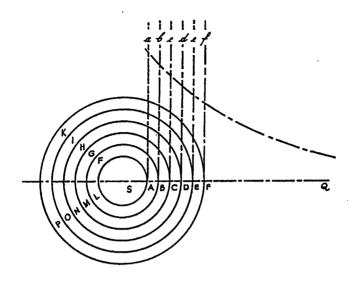


Рис. 41. Ньютонова схема жидкого трения.

меньше действует на вогнутую сторону, чем на выпуклую, то более сильное давление преобладает и либо ускоряет, либо замедляет движение слоя в зависимости от того, согласно ли оно или противоположно движению такового. Поэтому для того, чтобы каждый слой сохранял свое равномерное движение, давления, производимые на обе стороны, должны быть равны, а их направления противоположны. Поэтому, так как давления пропорциональны площадям граничных поверхностей и их смещениям относительно друг друга, расстояния будут обратно пропорциональны площадям, то есть обратно пропорциональны расстояниям поверхностей от оси. Но разности угловых движений вокруг оси пропорциональны отношениям смещений к расстояниям, или прямо пропорциональны смещениям и обратно пропорциональны расстояниям; то есть, соединяя вместе эти отношения, обратно пропорциональны квадратам расстояний. Поэтому, если проведены линии Aa, Bb, Cc, Dd, Ee и т. д., перпендикулярные различным частям бесконечной прямой линии SABCDEQ и обратно пропорциональные квадратам

- SA, SB, SC, SD, SE и т. д., и если предположить, что через концы этих перпендикуляров проходит гиперболическая кривая, то суммы разностей, то есть все угловые движения, будут пропорциональны соответствующим суммам линий Aa, Bb, Cc, Dd, Ee, то есть (если, чтобы составить равномерно жидкую среду, число слоев бесконечно увеличивать, а их толщины бесконечно уменьшать) пропорциональны гиперболическим площадям AaQ, BbQ, CcQ, DdQ, EeQ и т. д., аналогичным суммам; а времена, обратно пропорциональные угловым движениям, будут также обратно пропорциональны этим площадям. Поэтому период времени для любой частицы, например D, обратно пропорционален площади DdQ, то есть (как видно из известных методов квадратуры кривых) прямо пропорционален расстоянию SD. Q.E.D.*).
- СЛ. (следствие) І. Следовательно, угловые движения частиц жидкости обратно пропорциональны их расстояниям от оси цилиндра, и абсолютные скорости равны.
- СЛ. II. Если жидкость содержится в цилиндрическом сосуде бесконечной длины и содержит внутри себя другой цилиндр, и оба цилиндра вращаются вокруг общей оси, и времена их обращения относятся как их полудиаметры, и каждая часть жидкости сохраняет свое движение, то периоды обращения различных частей пропорциональны расстояниям от оси цилиндра.
- СЛ. III. Если к угловому движению цилиндра и жидкости, движущихся указанным образом, прибавить или убавить произвольное общее количество, то, поскольку в этом новом движении взаимное трение частей жидкости остается неизменным, движение частей по отношению друг к другу не изменится; в самом деле, смещения частей относительно друг друга зависят от трения. Любая часть будет сохранять свое движение, которое вследствие трения, действующего с обеих сторон в противоположных направлениях, не ускоряется и не замедляется.
- СЛ. IV. Поэтому, если отнять у общей системы из цилиндра и жилкости все угловое движение внешнего цилиндра, то получается движение жидкости в покоящемся цилиндре.
- СЛ. V. Поэтому, если жидкость и внешний цилиндр покоятся, а внутренний цилиндр равномерно вращается, то жидкости сообщается

^{*)} Quod erat demonstrandum (лат. «что и требовалось доказать»). — Приж. перес.

круговое движение, постепенно распространяющееся на всю жидкость; и это будет продолжаться с постоянным возрастанием до того времени, когда различные части жидкости приобретут движение, определенное $_{\rm B}$ СЛ. IV.

СЛ. VI. И поскольку жидкость стремится распространить свое движение еще далее, то ее воздействие увлечет за собой и внешний цилиндр, если только цилиндр не удерживается от этого вынужденно; и ускорит его движение до того, что периоды обращения обоих цилиндров станут равны. Но если внешний цилиндр вынужденно удерживается в неподвижном положении, то он будет стремиться замедлить движение жидкости; и если внутренний цилиндр не удерживается в прежнем движении некоторой приложенной к нему внешней силой, то он постепенно прекратит это движение. Все эти утверждения подтвердятся, если выполнить опыт в глубокой стоячей воде».

Ролью температуры в жидком трении — то есть вязкости — Ньютон пренебрег, но этот вопрос в дальнейшем изучали Дюбуа (Du Buat), Жирар (Girard) и другие, в особенности Пуазейль (Poiseuille). Они показали, что сила трения убывает с возрастанием температуры, а это, в свою очередь, выдвинуло и другой вопрос: какова физическая природа вязкости?

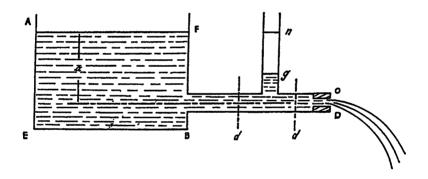
Навье (Navier) впервые ввел в общие уравнения движения (см. стр. 113) коэффициент μ (через 150 лет после Ньютона!), а Пуассон (Poisson) приписал жидкое трение изменению «силы отталкивания» между частицами жидкости; современная физика считает такое представление неприемлемым. Другую теорию предложили Сен-Венан (Sain-Venant), Клейц (Kleitz), Гельмгольц (Helmholtz), Мейер (Меуег), Кирхгоф (Kirchhoff) и другие; согласно этой теории, быстрые перемещения частиц текущей жидкости создают в ней силы, пропорциональные относительным скоростям слоев жидкости.

Даниил Бернулли (1700-82)

Точно так же, как великие реки питаются небольшими потоками, часто едва заметными в их истоках и вдоль берегов реки, так наука и техника начинаются с небольших индивидуальных вкладов, пока не превращаются, наконец, во все возрастающий поток знания и умения. Великая река механики текучих сред тесно связывается с именем Да-

ниила Бернулли, автора первого учебника в этой области⁵⁷⁾. Читая \mathfrak{q} перечитывая его, я вполне соглашаюсь с его автором, что его теория «нова, поскольку она рассматривает и давление, и движение жидкостей». Так как эта книга трудно доступна среднему читателю, мне хотелось бы привести некоторые подробности, говорящие о методах \mathfrak{q} технике Бернулли.

Глава 13 книги называется Hydrodynamica («Гидродинамика»). «Пусть имеется большой сосуд AFEB (рис. 42), — начинает Бернулли, — который должен быть все время наполнен водой. Пусть сосуд имеет горизонтальную цилиндрическую трубку BD с отверстием О на конце, через которое вода вытекает с постоянной скоростью. Требуется определить давление воды на стенки трубки BD.



Ръс. 42. Историческая схема Бернулли, изображающая вытекание воды, из которой он вывел свой знаменитый «закон Бернулли».

Решение: пусть высота поверхности воды над отверстием O равна a; тогда скорость воды, вытекающей в точке O, если исключить первые моменты истекания, должна считаться постоянной и равной \sqrt{a} , поскольку мы полагаем, что сосуд все время полон. Если же отношение поперечного сечения трубки и ее отверстия равно n/1, то скорость воды

⁵⁷⁾ Hydrodynamica, sive de viribus et motibus fluidorum commentarii («Гидродинамика, или замечания о силах и движениях жидкостей»). Berlin (написано в Ст. Петербурге), 1738.

в трубке будет равна \sqrt{a}/n . Но если бы отверстие OD вовсе отсутствовало, то предельная скорость воды в той же трубке была бы равна \sqrt{a} , что больше \sqrt{a}/n . Следовательно, вода в трубке стремится ускориться, но встречает препятствие на конце OD. Эти препятствия и противодействия сжимают воду; сжатие передается стенкам трубки, которые испытывают поэтому возросшее давление. Таким образом, ясно, что давление на стенки пропорционально ускорению или увеличению скорости, которое приобрела бы вода, если бы препятствие мгновенно исчезло и вода стала бы вытекать прямо в воздух.

Таким образом, задача в том, чтобы определить, какое ускорение приобрела бы частица dd, если бы трубка BD была в какой-то момент перерезана в точке d, а вода продолжала течь через O; это в точности давление текущей воды на частицу dd, производимое на стенку трубки. Чтобы найти его значение, рассмотрим весь сосуд ABddD и найдем для него ускорение в ближайшей окрестности вытекающей частицы воды, имеющей скорость \sqrt{a}/n .

...Пусть v — переменная скорость в трубке Bd. Поперечное сечение трубки, как и раньше, равно n, и Bd=c, dd=x. В точке B имеется равная частица, готовая войти в трубку в тот же момент, когда частица dd ее покидает. Но тогда частица в точке B, масса которой равна $n \cdot dx$, входит в трубку, она приобретает скорость v и также живую силу (то есть кинетическую энергию) nv^2dx . Поскольку сосуд AB бесконечно велик, частица в точке B была в состоянии покоя перед тем, как вошла в трубку, а потому nv^2dx есть полностью новая сила. К этой живой силе мы должны прибавить приращение живой силы, приобретаемое водой в Bb, когда частица dd вытекает, а именно $2ncv\,dv$. Эта сумма соответствует реальному спуску частицы $n\,dx$ с высоты BE, то есть a. Итак, мы имеем $nv^2\,dx + 2ncv\,dv = na\,dx$, или

$$\frac{vdv}{dx} = \frac{a - v^2}{2c}.$$

Но в любом потоке приращение скорости dv пропорционально произведению давления на время, в данном случае равное dx/v. Поэтому в нашем случае давление, испытываемое частицей dd, пропорционально $v \, dv/dx$, то есть $(a-v^2)/2c$.

В момент, когда перерезается трубка, $v = \sqrt{a}/n$, или $v^2 = a/n^2$; это выражение следует подставить в правую часть уравнения, кото-

рая после этого обращается в $(n^2-1)/2n^2c$. А последнее выражение представляет количество, пропорциональное давлению воды на часть трубки ac, каковы бы ни были поперечные сечения трубки и отверстия на ее конце.

Таким образом, если давление воды определено для одного случая, то оно определено и для всех других случаев, и это верно также, когда отверстие бесконечно мало, или когда n бесконечно велико по сравнению с единицей; в самом деле, очевидно, что в таком случае вода производит полное давление, соответствующее a; это давление мы обозначим через a. Но когда n бесконечно велико, то единица исчезающе мала по сравнению с n^2 , и количество, пропорциональное давлению, оказывается равным a/2c. Следовательно, если мы желаем знать, каково будет давление при любом n, то мы должны поставить следующий вопрос: если а соответствует количеству a/2c, то какое давление будет соответствовать количеству $(n^2-1)a/2n^2c$? Мы приходим, таким образом, к ответу $(n^2-1)a/n^2$.

Поскольку c исчезает из вычисления, мы заключаем, что все части трубки, как близкие к сосуду AB, так и более далекие, испытывают одно и то же давление текущей воды, меньшее, чем давление на дне EB. Чем больше отверстие O, тем больше и эта разность давлений. И стенки же не испытывают вовсе никакого давления, когда препятствие OD отсутствует, потому что в этом случае вода вытекает из всего открытого конца.

Если проделать где-нибудь в стенке трубки отверстие, очень малое по сравнению с O, то вода будет вытекать из него со скоростью, достаточно большой, чтобы поднять ее (воду) на высоту $(n^2a-a)/n^2$, если на пути ее не окажется препятствий...».

Следующая задача, которую Бернулли анализирует и-решает, такова: определить давление воды, текущей с постоянной скоростью по трубе любой формы. Решение получается в виде

$$\frac{v\,dv}{dx}=\frac{a-v^2}{2a},$$

где a — постоянное число, значение которого зависит от геометрия трубы. Если фактическое давление равно a-b, где b — высота, со ответствующая заданному значению v, и если a-b < O, то давление

 $_{
m CTahobutcs}$ всасыванием, то есть стенки трубы испытывают давление $_{
m chapy}$ жи.

Остаток главы (еще 24 страницы) излагается в том же стиле, характерном для Бернулли. Две выделенные формулы представляют собой две несколько различных формы подлинного уравнения Бернулли.
В видоизмененных формах они появляются и на многих других странипах учебника. И тут мы сталкиваемся с одним из самых интригующих вопросов в истории механики текучих сред: кто же, собственно, был автором знаменитого «уравнения Бернулли», появляющегося в каждом учебнике гидродинамики —

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const?}$$

В самом деле, эта формула не имеет прямого сходства с двумя предыдущими уравнениями Бернулли. В действительности он был первым, кто предпринял фундаментальное исследование зависимости p=p(v) или v=v(p), и первым, кто пришел к заключению, что возрастание v непременно приводит к убыванию p, и обратно; но он определенно сделал это не в виде той формулы, которая ему приписывается. Впрочем, эта «тайна» выясняется при внимательном изучении эйлеровых уравнений движения.

Леонард Эйлер (1707-83)

Леонард Эйлер был не просто автором, внесшим свой вклад в механику текучих сред — он был основоположником этой науки, ее математическим архитектором: в приведенном выше сравнении его надо отождествить не с одним из притоков, а с самою рекой.

Напомним, что геометрия — это отрасль математики, занимающаяся формой и размером предметов, тогда как механика текучих сред — это наука о движении (и равновесии) тел, деформируемых под действием сил (и тем самым переменных). Анализируя два этих определения, мы уясняем себе, что некоторые теоремы и аксиомы геометрии не отвечают философским и физическим требованиям механики вообще и механики текучих сред в частности; трудно себе представить, чтобы гений Эйлера этого не сознавал.

Например, точка обычно определяется в геометрии как элемент, $^{\text{положение}}$ которого не имеет протяженности, линия определяется как

путь, описываемый движущейся точкой, а движение определяется как изменение положения в пространстве. Но движение неотделимо от материи. Точка, не имеющая протяженности и, следовательно, массы, есть тем самым ничто; а ничто не может иметь ни пути, ни импульса, ни движения*).

По-видимому, Эйлер был первым, кто преодолел это фундаментальное противоречие, введя историческое понятие «частицы жидкости» и доставив тем самым механике текучих сред мощное орудие физического и математического анализа. Частица жидкости представляется как бесконечно малое тело, достаточно малое, чтобы его можно было математически рассматривать как точку, но достаточно большое, чтобы обладать такими физическими свойствами, как объем, масса, плотность, инерция и т. д. Подобно Ньютону, Эйлер определяет массу как произведение объема на плотность массы жидкости, занимающей этот объем. Отсюда следует классическое в наше время определение плотности массы: это количество жидкости на единицу объема. Математически

$$\rho = \frac{dm}{dV} \equiv \frac{M}{V} (\text{kg} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4).$$

Но поскольку по второму закону Ньютона вес W любого физического тела равен $W=m\cdot g$, отсюда следует, что

$$ho = rac{W}{gV} = rac{\gamma}{g},$$
 или $\gamma =
ho g ({
m kg/m^3}).$

Таким образом, понятие частицы жидкости стало осмысленным, логичным и могущественным. Начиная с этого времени, каждый знал, что частица жидкости — не математическая, а физическая точка, обладающая объемом, весом, массой, плотностями, удельной теплоемкостью и т. д. Но в какой форме ее представлять себе? И как определить ее движение?

Опять-таки, Эйлер дал на эти вопросы прекраснейшие ответы — явно или неявно. Представим себе непрерывную кривую линию l в

^{•)} Разумеется, предыдущий отрывок намеренно написан на языке философии 18го века и изображает гносеологические представления эпохи Эйлера. Читатель, не знакомый с квантовой механикой, может не знать, что частицы нулевой массы обладают в ней полной реальностью, имеют импульс и энергию, хотя им и нельзя приписать «пути». Но Эйлер и его современники не могля этого знать и рассуждали именно так, как сказано выше! — Прим. перев.

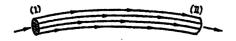
потоке жидкости, касающуюся в каждый момент времени вектора скорости той частицы жидкости, через которую она проходит: это так называемая линия тока. Слово «касающаяся» означает, что вдоль линии тока вектор скорости везде параллелен той части l, где он действует. Эйлер использовал этот факт несколько сложным способом, но если мы применим теорему (векторной механики), по которой векторное произведение двух параллельных векторов равно нулю, то получим

$$ar{v} imes dl = \left| egin{array}{ccc} ar{i} & ar{j} & ar{k} \\ v_x & v_y & v_z \\ dl_x & dl_y & dl_z \end{array} \right| = 0.$$

Так как единичные векторы i, j, k не равны нулю, обозначая $dl_x = dx$, $dl_y = dy, dl_z = dz$, имеем

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y} = \frac{dz}{v_z}.$$

Это и есть классическое уравнение Эйлера для линии тока, один из золотых ключей к тайнам механики текучих сред. Оно отвечает на второй поставленный выше вопрос и, более того, приводит к ряду дальнейших идей и понятий. Например, можно представить себе в жидкости трубку тока, состоящую из линий тока (рис. 43). Поскольку векторы скорости параллельны линиям тока в точках своего действия и поскольку стенки трубки тока состоят из линий тока, никакое количество жидкости не может ни войти в эту воображаемую трубку, ни выйти из нее через ее стенки. Поэтому количество (масса) жидкости, входящей через поперечное сечение I за единицу времени, должно быть в точности равно количеству (массе) жидкости, выходящему из трубки через сечение II за единицу времени. Таким образом, в трубке тока не может быть ни накопления, ни потери массы, т. е. $m_1 - m_2 = dm = 0$. Но $dm = \rho dV$.

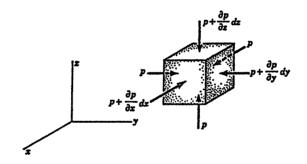


Puc. 43. Воображаемая трубка тока.

Какова же должна быть конфигурация dV? Общий ответ состоит в том, что она может быть любой. Но Эйлер выбрал бесконечно малый параллелепипед со сторонами dx, dy, dz (рис. 44) и, следовательно, объемом dV = dxdydz. Тогда условие, что в трубке тока не происходит «ни накопления, ни потери массы», принимает вид $dm = \rho dV = \rho dxdydz = 0$. Интегрирование этого выражения приводит к еще одной исторической формуле, характерной для Эйлера:

$$m = \iiint\limits_{(V)} \rho \, dx dy dz + \text{const},$$

выражающей закон сохранения массы в потоке и имеющей фундаментальное значение во всех отраслях механики текучих сред.



Puc. 44. Бесконечно малый жидкий параллелепипед Эйлера.

Любая величина, имеющая количественную меру в обычном алгебраическом смысле и направление в пространстве, есть вектор; примеры векторов — скорость, ускорение и сила. Обычные алгебраические величины, не связанные с направлением в пространстве и не имеющие направленного характера, — это скаляры; типичные примеры скаляров — масса и температура. Леонард Эйлер применял в своем анализе и векторы, и скаляры, хотя и не называл их этими терминами. Все его математические операции производились в декартовых (прямоугольных) компонентах. Но, конечно, это были компоненты векторов. В

самом деле, если R_x , R_y , R_z — компоненты в любой прямоугольной системе, то $\bar{i}R_x+\bar{j}R_y+\bar{k}R_z=\bar{R}$ образует вектор, где $\bar{i},\,\bar{j},\,\bar{k}$ — единичные векторы.

Лалее, так как гидродинамическая теория Эйлера основана на конпепциях сохранения массы и непрерывности (что в действительности олно и то же), то R_x , R_y , R_z (и тем самым \overline{R}), каков бы ни был их физический смысл, должны быть непрерывными функциями пространства (координат) и времени. Это ведет к важным определениям. Во-первых, пвижущиеся частицы жидкости имеют вес, ускорение, скорость, массу и т. д. Поэтому пространство, занятое потоком, то есть движущимися частицами, заполнено векторами и скалярами, оснащено ими и пронизано ими. Во-вторых, если каждой точке пространства, занятого непрерывным потоком, соответствует вектор \overline{R} определенного направления и величины, вообще говоря, меняющийся от точки к точке, то говорят, что в пространстве задано векторное поле, то есть пространство рассматривается как носитель векторов \overline{R} . Если \overline{R} означает \overline{v} , то мы имеем поле скоростей, то есть поле вектора скорости \bar{v} , представляющее в каждой точке направление и абсолютную величину потока. Если \overline{R} означает ускорение, получаем поле ускорений и т. д.

В аналитическом смысле векторное поле \overline{R} непрерывно, если и его величина, и его направление непрерывно меняются от точки к точке и со временем; в этом случае предполагается, что \overline{R} и его компоненты (каков бы ни был их физический смысл) везде имеют определенные производные по крайней мере первого и второго порядков по пространственным координатам и времени.

Установив, таким образом, явно или неявно, этот фундамент, Леонард Эйлер принимается возводить на нем само здание математических операций. И здесь он проявляет чудесную силу своего несравненного мастерства. Как сказал Лагранж, «Эйлер не просто внес свой вклад в механику текучих сред, а создал ее». К сожалению, план нашей книги не позволяет нам воспроизвести весь блеск его математической виртуозности. Рассматривая эти великолепные дифференциальные уравнения, с их симметричной картиной частных производных, я проникаюсь впечатлением, что Эйлер был для механики текучих сред тем же, чем Леонардо да Винчи или Рембрандт для искусства.

Впрочем, мы приведем здесь в интересах читателя по крайней мере пару образцов математического стиля Эйлера. Это дифференциальное

уравнение непрерывности

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0$$

и дифференциальные уравнения движения жидкости

$$\begin{split} \frac{dv_x}{dt} &= a_x = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z}, \\ \frac{dv_y}{dt} &= a_y = g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z}, \\ \frac{dv_z}{dt} &= a_z = g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}. \end{split}$$

Это кровь и плоть механики текучих сред. Замечательно, что эти уравнения не изменились с тех пор, как их вывел Эйлер. Открыв их, Эйлер, по выражению Лагранжа, свел всю механику текучих сред к вопросам чистого анализа, и если эти уравнения удается проинтегрировать, то при всех обстоятельствах определяется поведение текучей среды под действием заданных сил.

Луи де Лагранж (1736-1813)

Сам Лагранж и преодолел это «если», о котором он говорил, с величайшим мастерством. Как согласится каждый, кто когда-нибудь изучал его знаменитую Mécanique analytique («Аналитическую механику»), впервые опубликованную во Франции в 1788 году, он настолько отличился в истории механики текучих сред, что имя его можно поставить наряду с именем Эйлера; более того, в некоторых отношениях он даже превзошел Эйлера. Аристотель, Архимед, Галилей, Торричелли, Стевин, Паскаль, Гюйгенс, Бернулли, Клеро, Декарт, Даламбер и многие другие содействовали формированию этой науки; но Ньютон был первым, кто заложил ее прочный фундамент, Эйлер возвел ее стены, а Лагранж соединил все, или почти все другие части, превратив это сооружение в безопасное и удобное здание. Он особенно заботился об организации и совершенствовании механики, ее математического языка и ее методов.

«Я ставил себе целью, — говорил Лагранж, — свести теорию механики и искусство решения принадлежащих ей задач к общим формулам и объединить различные принципы механики в одну систему». Он преуспел в этом с гениальным мастерством. Но здесь меня интересует, главным образом, его прямой вклад в механику текучих сред.

Эйлер рассматривал движение индивидуальных частиц жидкости вдоль их траекторий. Но Лагранж полагал, что поскольку число таких частиц бесконечно, движение каждой индивидуальной частицы должно быть некоторым образом описано. Для этого он предложил выбрать в качестве характеристик движения частицы ее исходные (начальные) координаты, при t=0.

А именно, пусть (a,b,c) суть координаты некоторой частицы жидкости при t=0. Тогда траектория этой частицы (среди траекторий бесконечного числа частиц) будет та, которая проходит через точку (a,b,c). Таким образом, координаты (x,y,z) рассматриваемой точки вдоль ее траектории будут x=x(a,b,c,t),y=y(a,b,c,t),z=z(a,b,c,t), где (a,b,c,t)— переменные, называемые теперь переменными Лагранжа. Эти уравнения описывают некоторое семейство траекторий, заполняющее целую область потока, причем параметрами этих траекторий являются (a,b,c).

Итак, в методе Эйлера компоненты скорости частицы жидкости суть функции от пространственных координат и времени, тогда как в методе Лагранжа они задаются указанными выше уравнениями. На математическом языке в методе Эйлера

$$v_x = v_x(x, y, z, t), \quad v_y = v_y(x, y, z, t), \quad v_z = v_z(x, y, z, t),$$

в то время как в методе Лагранжа

$$v_x = \frac{\partial x}{\partial t}$$
 $v_y = \frac{\partial y}{\partial t}$, $v_z = \frac{\partial z}{\partial t}$.

При этом сам Лагранж признавал, что метод Эйлера был и остается более удобным и логичным.

Однако трудность состояла в том, что три эйлеровых уравнения движения жидкости содержали пять неизвестных (v_x,v_y,v_z,p,ρ) , а потому требовалось два добавочных уравнения. Эйлер указал, а Лагранж показал, что такими уравнениями могут служить дифференциальное

уравнение непрерывности и уравнение физического состояния. Тогда согласно формальной логике математики эти уравнения должны быть интегрируемы. Как говорит Д. П. Рябушинский: «В этих обстоятельствах Лагранж, человек с высокими академическими принципами в гордостью, не мог признать себя побежденным: он должен был получить решение». И здесь мы должны вернуться к нашему предыдущему вопросу: кто же был настоящим автором так называемого уравнения Бернулли?

Понятие «полного дифференциала» было уже известно Эйлеру в А. К. Клеро (А. С. Clairaut, 1713-65); последний применил его к решению задач статики текучих сред⁵⁹⁾. Но Лагранж первый развил из него мощное орудие механики текучих сред. Он пришел к выводу, что уравнения Эйлера могут быть решены лишь при двух специальных условиях: (1) для потенциальных (невихревых) течений и (2) для непотенциальных (вихревых), но стационарных течений.

Первый из этих случаев потребовал введения так называемого «потенциала скоростей» $\varphi=\varphi(x,y,z)$ такого, что

$$v_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z}.$$

Это был еще один революционный шаг в развитии механики текучих сред, сохраняющий свое жизненное значение и по сей день. Введение потенциала скоростей сделало возможным выполнение чрезвычайно интересной математической операции, сводящей уравнения движения Эйлера к единственному уравнению в полных дифференциалах,

$$d\left(\frac{v^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho} + \frac{\partial \varphi}{dt} - d\Phi\right) = 0.$$

Интеграл этого уравнения есть

$$\frac{v^2}{2} + \int \frac{dp}{\rho} + \frac{\partial \varphi}{\partial t} - d\Phi = C(t).$$

⁵⁹⁾ Théorie de la figure de la terre tirée des principes de l'hydrodynamique («Teopus формы Земли, выведенная из принципов гидродинамики»). Paris: Durand, 1743.

Это и есть интеграл Лагранжа эйлеровых уравнений движения безвихревой (потенциальной) сжимаемой жидкости. Подобный же вид имеет
интеграл для второго случая (стационарного течения). Для стационарного течения

 $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0,$

а зависящая от времени постоянная C(t) обращается просто в C. Если вдобавок поток несжимаем, то

$$\int \frac{dp}{\rho} = \frac{p}{\rho}.$$

Следовательно,

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} - \Phi = C = \text{const},$$

или

$$\frac{\rho v^2}{2} + p - \rho \Phi = \text{const} .$$

Здесь $\Phi = \Phi(x,y,z)$ — потенциал тяготения такой, что

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = g_x, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial y} = g_y, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} g_z,$$

где g — ускорение силы тяжести. Если направить ось Oy вертикально вверх, то $g_x = g_z = 0$ и

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = -g_y \stackrel{\cdot}{=} -g,$$

а потому $\Phi = -gy$ и $-\rho\Phi = \rho gy$. Вспомним теперь уравнение состояния: $p = \rho RT$, или $\rho = p/RT^*$. Следовательно, $\rho gy = pgy/RT$, или $\rho gy/p = gy/RT$. Подставляя сюда известные значения $(T=288^\circ$ и $g=9,81\text{m/cek}^2)$, находим, что третий член в левой части интеграла Лагранжа пренебрежимо мал по сравнению с первым и вторым членами, так что

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const} \, .$$

 $^{^{\}circ}$) Температура T в уравнении состояния берется здесь в градусах Кельвина, как $^{\circ}$ то принято в наше время. — Π рим. nepes.

В итоге, как мы показали, так называемое «уравнение Бернулли» — вероятно, самое основное уравнение всей механики текучих сред, приписываемое Д. Бернулли во всех известных нам учебниках — в действительности вовсе не принадлежит Бернулли: это ИНТЕГРАЛ ЛАГРАНЖА ЭЙЛЕРОВЫХ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ.

Между тем со временем появились другие методы применения этих уравнений.

Жан Лерон Даламбер (1717-83)

Из интеграла Лагранжа уравнений Эйлера вытекает, как показал, впрочем, и Даниил Бернулли, что чем больше скорость в данной точке потока, тем меньше давление в этой точке, и обратно. Но по закону Леонардо да Винчи: чем больше скорость, тем меньше поперечное сечение, и обратно.

Из этих законов механики текучих сред следует много интересных выводов. Например, уже наши предки знали, что реки текут быстрее там, где они уже; но они не знали того факта, что в более узких местах ниже давление р. Впрочем, опытные капитаны знают, что опасно держать движущиеся суда близко друг от друга; причина этого в том, что в таком случае поперечное сечение воды между ними становится малым, а потому скорость воды возрастает и уменьшается давление воды между судами, что создает их притяжение друг к другу. Другой пример: печные трубы почти всегда строились с сужением на конце; это сужение, то есть уменьшение площади поперечного сечения и вследствие этого возрастание скорости дыма, вызывает соответствующее уменьшение давления, а это приводит к эффекту всасывания, предотвращающему выход дыма в комнату.

Жан Лерон Даламбер первый применил эти закономерности к исследованию сопротивления идеальной жидкости движущемуся в ней телу⁶⁰⁾. Но результаты его почти героических усилий оказались столь сложными в математическом отношении и столь далекими от понимания среднего читателя, что не оказали большого влияния на дальнейшее развитие механики текучих сред. Впрочем, они привели к некоторым новым идеям и теоремам, заслуживающим внимания.

⁶⁰⁾ Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides («О равновесии и движения жидкостей»). Paris, 1744.

Даламбер ввел широко известные и важные понятия «застойной $_{\text{ТОЧКИ}}$ » (т. е. точки на поверхности тела, погруженного в поток, где скорость потока равна нулю) и «застойной зоны». Он описывает их следующим образом: «частицы, движущиеся вдоль центральной линии $_{\text{ТОКА}}$ по направлению к точке O, не достигают O, а останавливаются как раз перед этой точкой, а потому в точке O и непосредственно перед ней жидкость неизбежно застаивается» 61).

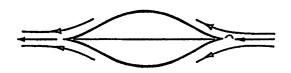


Рис. 45. Конфигурация тела с острыми ребрами, по Даламберу.

Он был приведен в недоумение полученными результатами, поскольку просто отказывался понять «роль» застойной жидкости, даже в сколь угодно малом количестве. Чтобы избежать этой трудности, он предложил конфигурацию тела с «бесконечно острыми ведущими ребрами» (рис. 45), при которой «больше не будет застойной жидкости, и вся жидкость будет протекать мимо передней поверхности» без возмущений. Можно спорить о том, следует ли считать это предвидением современных скоростных аэродинамических конфигураций (с острым ведущим ребром); я оставляю этот вопрос без рассмотрения.

Но что можно сказать о задней стороне тела? «На первый взгляд может показаться, — говорит Даламбер, — что здесь движение должно быть иным. Но теория движения жидкостей, — говорит он, — показывает, что компоненты скорости впереди и позади тела в точности одинаковы, а потому и все другие условия должны быть такими же. Но если так, — продолжает он, приводя математические доказательства в своем обычном стиле, — то давление жидкости на переднюю поверхность равно и противоположно давлению на заднюю поверхность, а поэтому результирующее давление будет абсолютно отсутствовать».

Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides («Опыт новой теории сопротивления жидкостей»). Paris, 1752.

Это и есть «парадокс Даламбера», который можно точнее сформу. лировать следующим образом: в идеальной жидкости сопротивление телу, движущемуся с постоянной скоростью, равно нулю. Современное доказательство можно найти в обычных учебниках механики текучих сред, и мы его не приводим.

Даламбер впервые ввел также нечто вроде представления о ламинарном течении, то есть течении, состоящем из параллельных слоев жидкости. Пусть вообще скорости различных слоев жидкости в один и тот же момент времени представлены переменной v. Если обозначить через dv приращение скорости в ближайший момент, то величина dv будет различна для разных слоев — положительна для одних, отрицательна для других. Короче, пусть $v \mp dv$ выражает скорость каждого слоя, когда он занимает место непосредственно лежащего под ним. «Я утверждаю, — говорит Даламбер, — что если предположить каждый слой движущимся с бесконечно малой скоростью (по отношению к соседним с ним слоям), то жидкость остается в равновесии» 62).

В самом деле, если предполагается, что скорость каждого слоя не меняется по направлению, то в момент, когда v переходит в $v \mp dv$, можно считать, что любой слой имеет обе скорости $v \mp dv$ и $v \pm dv$. Но поскольку слой сохраняет лишь первую из этих скоростей, то, следовательно, скорость $\pm dv$ должна быть такой, чтобы не изменять первую из них, то есть должна обратиться в нуль. Поэтому если каждый слой перемещается со скоростью $\pm dv$, то жидкость остается в покое 63).

Заключения, выведенные Даламбером из этого анализа, представляют большой интерес для изучающих механику текучих сред. Кроме того, он доказал аналитически применимость к жидкостям принципа «живой силы». Далее, он проанализировал ставшую уже классической задачу о жидкости, вытекающей из сосуда, где она поддерживается на постоянной высоте. И, конечно, не следует забывать принцип Даламбера, согласно которому третий закон Ньютона справедлив не только для сил, действующих на свободные тела, но и действующих на тела, закрепленные в стационарном равновесии*).

⁶²⁾ Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides. David: Paris, 1752.

⁶³⁾ Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides. Paris, 1744.

К сожалению, в этом обзоре работ Даламбера опущены его исследования о распространении волн, в том числе знаменитое волновое уравнение Далам-

Шевалье де Борда (1733-99) и др.

Мы подходим все ближе к современной механике текучих сред, оказавшейся в конечном счете гораздо более сложной системой, чем описанная выше. Как выразился Шевалье де Борда, французский математик и навигационный астроном, реальные потоки «гораздо более утонченны, чем характер самой изощренной дамы». Он указал, например, что не все потоки находятся «в согласии» с законами Даниила Бернулли, Леонардо да Винчи и Лагранжа, т. е. не всегда увеличение площади поперечного сечения приводит к пропорциональному уменьшению скорости потока и увеличению давления потока. «Когда (говорит он) вполне нормальный поток подвергается внезапному расширению, что может случиться и в трубке, и на поверхности тела, то этот поток возмущается до такой степени, что теряет часть своей кинетической энергии, т. е. живой силы» 64).

Это утверждение стало известно под именем теоремы Борда (см. вклейку I). Как обнаружилось, она имеет далеко идущие следствия для прикладной механики текучих сред. Например, понятие срыва потока стало органической частью изучения реальных течений и содействовало появлению новой отрасли механики текучих сред, изучающей потоки через всевозможные клапаны и отверстия. Вряд ли следует называть их все потоками Борда, и не все они изучались при его жизни. Но, может быть, уместно описать их в связи с его вкладом.

Отверстие — это площадь с замкнутым периметром, через которую может вытекать жидкость. Оно может открываться в атмосферу, что составляет случай свободного истечения, или может быть частично или полностью погружено в истекающую жидкость. Типичные примеры отверстий показаны на рис. $46 \ (a,b,c)$.

Отверстие может быть очень малым, как в случае отверстий для просачивания или калибровки, или большим, как, например, ворота шлюза в плотине. Во всех случаях высота столба жидкости над отверстием измеряется от уровня поверхности жидкости до центральной линии отверстия.

бера, описывающее, в частности, распространение волн в воде и в воздухе. Вероятно, это связано с общей ориентацией книги на движения тел в текучей среде. — Прим. перев.

⁶⁴⁾ Mémoires de l'Académie des Sciences («Мемуары Академии наук»). Paris, 1766.

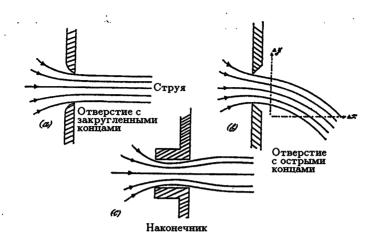


Рис. 46. Типичные схемы отверстий.

Струя из отверстия с острыми краями сходится во всех направлениях, и продолжает таким образом сходиться на протяжении приблизительно половины диаметра отверстия, вдоль течения. Сжатое сечение известно под названием vena contracta. Отношение площади поперечного сечения contracta к площади отверстия называется коэффициентом сжатия отверстия.

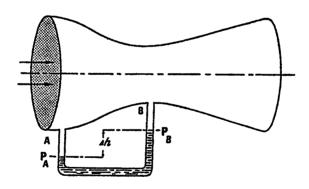
Трение в отверстии несколько снижает скорость по сравнению с идеальной скоростью свободного истечения, определяемой законом Торричелли, $v = \sqrt{2gh}$. Отношение действительной скорости к идеальной скорости есть коэффициент скорости отверстия. Поскольку истечение равно произведению скорости и площади (закон Леонардо да Винчи), коэффициент истечения есть произведение скорости и коэффициент сжатия. Для среднего отверстия с острыми краями его численное значение составляет $\sim 61\%$.

Путь, проходимый свободно истекающей (горизонтальной) струей под давлением столба жидкости высоты h имеет параболическую форму, происходящую от силы тяжести (траектория Торричелли).

Отверстие в боковой стенке бака близ его дна имеет более высокий коэффициент сжатия, чем расположенное дальше от дна. Подобным

образом, отверстие с округленными краями со стороны бака имеет более высокий коэффициент сжатия, чем отверстие с острыми краями. Для хорошо округленных краев истечение может увеличиться на 30%. Отверстия, погруженные в жидкость, отверстия с квадратными сечениями вместо круглых, и отверстия, к которым жидкость подходит с большой скоростью, не подчиняются приведенным выше уравнениям, если не сделать в них исправления для этих особых условий.

Отверстия используются, например, для измерения потоков пара и газа. С помощью манометра или пневматического водомерного поста (pressure gauge) измеряются давления до выхода струи и при ее выходе; величина истекающего потока может быть найдена по известному давлению до выхода, площади отверстия, температуре и множителю, содержащему газовые постоянные, такие как отношения удельной теплоемкости к давлениям до выхода и при выходе⁶⁵).



 $P_{\text{uc.}}$ 47. Трубка Вентури, напоминающая современную аэродинамическую трубу.

Современник Борда, итальянский физик по имени Дж. Б. Вентури (G. B. Venturi, 1746-1822), как полагают, первый скомбинировал за-

⁶⁵⁾ Van Nostrand Scientific Encyclopaedia («Научная Энциклопедия Ван Ностранда»). См. также von Bruno Eck. Technische Strömungslehre («Техническая теория течений»). Springer-Verlag, 1966; А. Н. Gibson. Hydraulics and its Applications («Гидравлика и ее приложения»). London: Constable & Co. Ltd, 1930.

коны Леонардо да Винчи и Бернулли — Лагранжа с манометром Торричелли, создав устройство под названием «трубка Вентури». Эта трубка имеет сначала суживающуюся, а затем расширяющуюся форму (рис. 47). Ее поперечное сечение в A велико, и потому согласно закону Леонардо да Винчи, скорость там мала и, следовательно, по закону Бернулли — Лагранжа, давление высоко. Таким образом, жидкость в U-образной трубке манометра находится под высоким давлением в A и под низким давлением в B; поэтому столб ее в колене A ниже, чем в колене B.

Математическая разработка этих явлений приводит к следующей формуле:

$$v_B = \sqrt{\frac{2(p_B - p_A)}{\rho(S_B^2/S_A^2 - 1)}},$$

где S_A и S_B — поперечные сечения трубки, p_A и p_B — давления в этих поперечных сечениях и ρ — плотность массы жидкости. Таким образом, трубка Вентури может служить инструментом для измерения скорости потока и применяется с этой целью.

Может быть, следует добавить, что после Вентури этот важный прибор усовершенствовал Клеменс Гершель (Clemens Herschel, 1842-1930), американский инженер-гидравлик. Подобно Торричелли, Ньютону, Борда и другим Гершель пришел к выводу, что никакое уравнение и никакой измерительный прибор, не учитывающие вязкость изучаемой жидкости, не могут быть надежны.

Шези, Дюбуа, Кулон, Гаген, Пуазейль и Жирар

Роль температуры в жидком трении, то есть вязкости, которой пренебрег Ньютон, была впоследствии изучена Дюбуа, Жираром и другими, в особенности Пуазейлем. Они показали, что сила трения убывает с возрастанием температуры.

Два выдающихся французских математика, Навье, который через 150 лет после Ньютона впервые ввел вязкость в общие уравнения движения (рассматриваемые ниже), и Пуассон, приписывали жидкое трение изменению сил отталкивания между частицами жидкости. Другую теорию выдвинули Сен-Венан, Клейц, Гельмгольц, Мейер, Кирхгоф в

др. Согласно этой теории быстрые перемещения частиц в потоке жидкости создают в ней силы, пропорциональные относительным скоростям слоев жидкости.

Согласно Жирару (Girard)⁶⁶⁾ первое математическое уравнение для стационарного потока вязкой жидкости в канале написал француз Шези (Chezy); оно имело вид $Qh = atv^2$, где Q — площадь поперечного сечения канала, h — градиент канала на единицу длины, t — погруженный в жидкость периметр поперечного сечения, v — средняя скорость потока, и a — некоторый постоянный коэффициент. Кулон (Coulon) пытался сравнить это уравнение с формулами Ньютона для сопротивления жидкости $(av^2 + bv^{3/2} + cv)$ и $(av^2 + b)$, но не смог прийти к каким-либо надежным результатам. Однако его общирные эксперименты оказались ценными для некоторых его современников и для многих будущих исследователей.

Обозначая через d диаметр, через l длину и через p давление на единицу площади поперечного сечения, Жирар математически доказал, что $(dv/4l) = av^2 + bv$. Проверяя эту формулу на опыте, он пришел к заключению, что (1) законы течения воды в длинных и коротких трубах различны; (2) в достаточно длинной трубе p и v меняются таким образом, что отношение (dp/4lv) остается постоянным, (dp/4lv) = b(этот важный результат подтвердили также Гаген (Hagen)⁶⁷⁾ и Пуазейль (Poiseuille)⁶⁸⁾, и они стали поэтому частью знаменитого закона Гагена — Пуазейля, который будет рассмотрен дальше); (3) минимальная длина l трубы, нужная, чтобы выполнялось условие (dp/4lv)=b=const, возрастает при возрастании ее диаметра и давления; (4) как показал Шевалье Дюбуа (Du Buat)⁶⁹⁾, чем холоднее вода, тем медленнее она течет; теория Жирара и эксперименты подтвердили, что из двух потоков, удовлетворяющих условию (dp/4lv) = b, быстрее тот, у которого выше температура; наконец, (5) для потоков в широких трубах (не удовлетворяющих указанному условию) влиянием температуры можно пренебречь.

⁶⁶⁾ Mémoires de l'Institut de France, p. 550, etc., 1813.

⁶⁷⁾ Akademie der Wissenschaften, S. 92. Berlin, 1854.

Le mouvement des liquides dans des tubes de petits diamètres («Движение жидкостей в трубах малых диаметров»). Paris, 1844.

⁶⁹⁾ Principes d'hydraulique («Принципы гидравлики»). Т. II, Р. 9. édit. 1816.

Эксперименты Жирара опровергли теорию Кулона, по которой сопротивление жидкости пропорционально v, и подсказали формулу (av^2+bv) , которая, впрочем, недостаточно точна для труб большого диаметра. В конечном счете исследования Жирара не привели к результатам длительного значения, потому что его анализ «недостаточной скользкости» не заходил достаточно далеко. И это понятно: в самом деле, открытие законов движения в небесной механике стоило Галилею гораздо меньше труда, чем изучение «простого» потока воды; гиганты, такие как Эйлер и Лагранж, создали великолепные теории для идеальных жидкостей, но игнорировали проблему вязкости. Между тем, Жирар, Купле (Couplet), Шези, Дюбуа, Кулон, Прони (Proni) и многие другие были, конечно, люди не того калибра.

Иной личностью был Жан Л. М. Пуазейль (Jean L. M. Poiseuille, 1799–1869). Может быть, он не сознавал, что его тщательное исследование кровообращения и его Le mouvement des liquides dans des tubes de petits diamètres поставят его в число выдающихся деятелей механики текучих сред, особенно по той причине, что по его образованию и профессии и сам он, и его современники несомненно рассматривали его как врача.

«Я начал мои исследования, — писал Пуазейль в своем введении⁷⁰), — поскольку продвижение в физиологии требовало знания законов движения крови, то есть знания законов движения жидкостей в трубках малого диаметра (~ 0,01 мм)». «Конечно, — продолжает он, — Дюбуа, Жирар, Навье и другие уже изучали эту проблему: но желательно дальнейшее изучение и экспериментальное исследование, чтобы иметь надежное сравнение с экспериментальными данными».

⁷⁰⁾ Poiseuille, Recherches expérimentales sur le mouvement des liquides («Экспериментальные исследования о движении жидкостей»), Mémoires. Т. IX. Р. 433. Inst. Acad. Royale des Sciences.

Вот	полученные и	ИM	численные	значения	(l/d):
-----	--------------	----	-----------	----------	--------

Диаметры на одном конце, перпендикулярные один другому, мм	Диаметры на другом конце, перпендикулярные один другому, мм	$\lim(l/d)$
0.0286-0.0296	0.0293-0.0300	- 70
0.0447-0.0460	0.0425-0.0445	80
0.0845-0.0845	0.0850-0.0860	120
0.1117-0.1135	0.1125-0.1145	270
0.1395-0.1415	0.1405-0.1430	180
0.6160 - 0.6932	0.6140-0.6900	310

Как показали опыты Жирара, и как теперь подтвердили опыты Пуазейля, в трубках диаметром от 0,0286 до 0,6900 мм характер течения жидкости зависит от значения (l/d), которое различно для разных диаметров и убывает с возрастанием d.

Второе заключение Пуазейля состояло в том, что количество жидкости, проходящее в трубке за единицу времени, пропорционально давлению p и может быть выражено в виде

$$Q = 2495 \cdot 224 \frac{pd^4}{l} \dots$$
 (при $t = 105$ °C, и с Q в мм³).

То же получили Γ . Гаген (H. Hagen)⁷¹⁾ и Якобсон⁷²⁾, и потому эта формула впоследствии стала известна как формула Гагена — Пуазейля, в виде

$$Q = \frac{\pi r^4}{8\mu} \frac{dp}{dx}.$$

Формула Гагена — Пуазейля дает надежные и точные результаты лишь для течений с высокой вязкостью и для трубок малого диаметра.

Мы вернемся к этим формулам немного ниже. Теперь же мы познакомимся с другим французом, роль которого в истории и философии механики текучих сред можно сравнить с ролью Эйлера и Лагранжа.

⁷¹⁾ Abhandl. der Königl. Academie der Wissenschaften zu Berlin. 2B. S.1 und 2. 1869.

⁷²⁾ Dr. Heinrich Jakobson, Reicharts und Dubois — Reymonds Archive, S. 99-100. 1860.

Клод Луи М. А. Навье (1785-1836)

Быстро развивавшаяся механика текучих сред нуждалась в более общем решении проблемы вязкости. Прежде всего надо было установить самые общие уравнения движения реальных, вязких текучих сред. Конечно, Эйлер был создателем гидродинамики; конечно, он революционизировал науку о потоках; но, метафорически выражаясь, сшитые им прекрасные брюки были без пуговиц: они не могли принять во внимание вязкость.

Эти пуговицы доставил Клод Навье (Claude Navier), великий математик, мастер в области анализа. В работе, доложенной Академии наук 18 марта 1822 года⁷³⁾, он объяснил, что предложенные им уравнения и решения неизбежно должны были быть очень сложными. «Но хотя, — сказал он, — они основаны на гипотезе Ньютона $\propto (dv/dy)$, не следует полагать, что в них нет ничего нового».

Примененная Навье математическая техника очень сложна, так что я ее полностью опускаю. Вместо этого я попытаюсь описать его основные идеи. Ньютонов «недостаток скользкости» происходил от молекулярного движения между разными частями текущей среды. А именно, давление стремится уменьшить расстояния между молекулами среды. Это создает силы отталкивания между молекулами. Если среда находится в покое, сжимающие и отталкивающие силы взаимно сокращаются, и каждая молекула остается в равновесии. Но если среда движется, то взаимодействия между молекулами меняются от точки к точке, возрастая и убывая на величину, пропорциональную скорости убывания или возрастания расстояний.

Построив таким образом физическую модель, Навье перешел к математическому изучению вязких течений и вывел знаменитые уравнения Навье (полученные в дальнейшем разными способами также другими исследователями — Пуассоном, Стоксом, Громекой и другими).

Рассмотрим сначала стационарный горизонтальный вязкий поток в прямолинейной трубке. Дюкло (Ducleaux) показал на опыте, что в таком потоке (1) все частицы жидкости движутся по прямым, (2) все частицы жидкости на равных (радиальных) расстояниях от центров поперечных сечений движутся с равной скоростью, и (3) вследствие

⁷³⁾ Mémoires de l'Académie des Sciences de l'Institut de France. T. VI. Paris, 1822.

 $_{\text{«недостаточной скользкости»}}$ частицы, примыкающие к стенам, имеют нулевую скорость, частицы же, движущиеся по центральной линии, имеют максимальную скорость 74).

Из этих представлений интересующие нас уравнения могут быть получены несколькими способами, из которых мы выберем наиболее понятный, хотя, надо признать, весьма утомительный. Другая причина для такого выбора состоит в том, что он основан на уже знакомом читателю бесконечно малом параллелепипеде Эйлера.

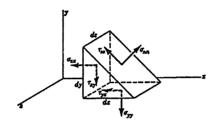


Рис. 48. Бесконечно малая частица вязкой жидкости, по Навье.

Представим себе частицу вязкой жидкости в форме призмы (рис. 48). На ее грани теперь действует не только давление, но также и вязкость, или трение; согласно закону Стевина — Паскаля давления нормальны к граням, тогда как силы трения касательны к ним. Поэтому результирующие силы, приложенные к граням, будут к ним наклонны.

Пусть p — результирующий вектор напряжения, приложенный к грани; обозначим его компоненты через p_{xx} , p_{xy} , p_{xz} и т. д., каждая из которых представляет напряжение в плоскости, перпендикулярной оси, обозначенной первым индексом, в направлении, указываемом вторым. Так, например, p_{xy} есть напряжение в плоскости, перпендикулярной оси x, в направлении оси y, т. е. касательное напряжение в этой плоскости.

В этих обозначениях напряжения p_{xx} , p_{yy} , p_{zz} нормальны соответствующим граням параллелепипеда, тогда как p_{xy} , p_{xz} , p_{yx} , p_{zy} —

Écoulement de divers liquides au travers des espaces capillaires. Annales de chimie et de physique. T. XXV. 1872, Paris.

тангенциальные напряжения. Но, как мы уже видели, $p_1=p_2=p_3$ (закон Стевина — Паскаля); в наших нынешних обозначениях это значит, что $p_{xx}=p_{yy}=p_{zz}=-p$: этот простой, но важный факт облегчил задачу Навье.

Найдя таким же образом компоненты напряжения для других граней, он затем применил к остальным силам второй закон Ньютона и после очень утомительных математических операций пришел к следующим историческим дифференциальным уравнениям реальной (вязкой) жилкости:

$$\begin{split} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right), \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right). \end{split}$$

В другой форме те же уравнения были также получены британским математиком и физиком сэром Джорджем Габриелем Стоксом (George Gabriel Stokes, 1819–1903)⁷⁵⁾, а потому они часто называются уравнениями Навье — Стокса. Тем самым основная математическая философия механики текучих сред была завершена; но не ее история, поскольку в ней недоставало еще многих звеньев.

Рождение экспериментальной механики текучих сред

В действительности надо было еще научиться решать уравнения Навье — Стокса, определять сопротивление движению тел в реальных текучих средах, учитывать эффекты сжимаемости и т. д., и т. д. Даламбер горько жаловался, что он, признанный математик, не умел применить «некоторые знаменитые уравнения» для определения сопротивления воздуха движению простого тела. Может быть, по этим или аналогичным причинам Парижская академия наук учредила в 1775 году

⁷⁵⁾ G. Stokes. On the theory of the internal friction of fluids in motion. Transactions of the Cambridge Philosophical Society. 1845. V. 8.

особый Ученый комитет, возложив на него «исследование возможности улучшить навигационные качества судов». Этот комитет состоял из Даламбера (председателя), Антуана Кондорсе (Antoine Condorcet, 1743-94), аббата Шарля Боссю (Charles Bossut, 1730-1814), Адриена Мари Лежандра (Adrien Marie Legendre, 1752-1833) и Гаспара Монжа (Gaspard Monge, 1746-1818).

Гете сказал однажды, что мудрость заключена в одной только истине; а истина никогда не стареет. Ученый комитет Даламбера проявил как раз эти два качества, а потому заслуживает почетного места в истории и философии механики текучих сред. В своем докладе⁷⁶⁾ он объясняет исследователям в этой области, что сами по себе ни теории, ни эксперименты никогда не решат сложные проблемы потоков, что единственный правильный путь — это сочетание того и другого и что для этой цели экспериментальная техника должна быть развита до уровня теоретических достижений.

«Однако, — предостерегает доклад, — все дело опытных исследований настолько утонченно, что требует весьма изощренного внимания, между тем как в действительности оно часто оказывается случайным. Информация и данные, собранные многими поверхностными исследователями, часто кажутся не связанными между собой. Во многих случаях трудно понять, почему и из каких источников получились эти данные. Некоторые забывают, какие цели преследует наука ... Надо с осторожностью относиться к информации, представленной экспериментатором без теоретической подготовки; такой экспериментатор лишен проницательности и рассудительности, а потому часто представляет один и тот же факт в разном обличье, сам этого не понимая. Или же он собирает наугад несколько фактов и предлагает их как доказательства, не умея их объяснить. Надо понять, что научное знание без рассуждения, то есть без теории, не существует».

Какая прекрасная философия! Какое введение в экспериментальную механику текучих сред! И какие советы молодым — а иногда и не столь молодым — ученым, ревностно берущимся за эксперименты, не сознавая, что они ищут!

Боссю, имя которого уже появлялось выше, был, пожалуй, одним

⁷⁶⁾ Jombert. Nouvelles expériences sur la résistance des fluides («Новые опыты над сопротивлением жидкостей»). Paris, 1777.

из первых, для кого слово «исследование» означало определенную η_{C} гическую последовательность: сначала теория, потом эксперимент, η_{C} никогда наоборот. «Потому что, — говорил он, — именно теория указывает, какой требуется эксперимент». Соответственно этому он сначала разрабатывал свои теоретические результаты, а потом начинал буксировать модели судов и другие тела в водном бассейне Парижской военной академии, размером в $100 \times 53 \times 6\frac{1}{2}$ фута.

Конечно, он знал, что модель, погруженная лишь отчасти, испытывает сопротивление как жидкости, так и воздуха. Он принял также во внимание трение буксирующих устройств. Чтобы исключить сопротивление воздуха (которое он называет «действием воздуха»), он измерял ту часть поверхности модели, которая не была погружена, и предполагал, что действия воды и воздуха находятся соответственно в «сложной пропорции» с поверхностями действия и с плотностями сред.

Боссю понимал также роль вязкости в сопротивлении текучих сред. «Трение между текучей средой и поверхностью тела происходит по всему телу, — говорил он. — Поэтому если бы мы могли избавиться от трения, то наименьшая сила приводила бы тело в движение». Впрочем, он был неправ в своем утверждении, что «липкость» воды «крайне мала»: как мы увидим дальше, дело обстоит как раз наоборот.

Современник Боссю, военный инженер Дюбуа (Du Buat, 1734–1809) опубликовал в 1779 году книгу под названием Principes d'hydraulique («Основы гидравлики»), анализирующую потоки воды в реках, каналах и трубах и весьма полно и систематично изучающую роль вязкости. Как он полагает, сопротивление жидкости в значительной степени происходит от трения между жидкостью и стенами, вызывающего «замедление потока». Это замедление передается от стен тем частям жидкости, которые не имеют с ними прямого соприкосновения; и как раз это влияет на значение средней скорости потока и определяет скорости возле стен.

Может быть, следует назвать Дюбуа еще одним из «праотцов» теории пограничного слоя. Основываясь на сравнении теории с экспериментами, он высказал теорему, по которой трение жидкости не зависит от давления в ней. И как раз эта важная теорема привела его к другой, совершенно ошибочной, утверждавшей, что сопротивление потоку стен (и поверхностей вообще) не зависит от шероховатости поверхности.

Дюбуа любил эксперименты. Он изучал потоки в малых каналах

и в стеклянных трубках различных размеров и форм. Его измерительная техника была убога, но его качественные наблюдения были эффективны. Как мы знаем, он установил, например, важный закон, по которому сопротивление стен потоку жидкости пропорционально скорости v в степени меньше двух, и предложил формулу, превзойденную по точности только формулами Дарси (Darcy, 1857) и Базена (Bazin, 1869).

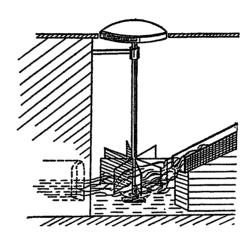


Рис. 49. Кавказско-персидская водяная мельница.

Рассматривая действие водяных мельниц Древней Месопотамии (Ассирии) или Кавказа (Армении) (рис. 49), или водяной мельницы Марка Поллиона Витрувия, впоследствии известной под именем колеса Леонардо да Винчи (рис. 14, стр. 54), или древнеперсидской водоподъемной машины (рис. 50), можно заметить их общую особенность: в них всегда есть некоторое число лопастей, лопаток или водоподъемных черпаков, все время погруженных в воду, полностью или отчасти, и движущихся в воде. Как сказал однажды Арнольд Зоммерфельд (1868–1951), этим, может быть, объясняется интерес, проявлявшийся к сопротивлению воды при движении плоских пластин. Может быть, так оно и было. Так или иначе, исторический факт состоит в том, что плоские пластины были первыми телами, изученными на опыте. Уже

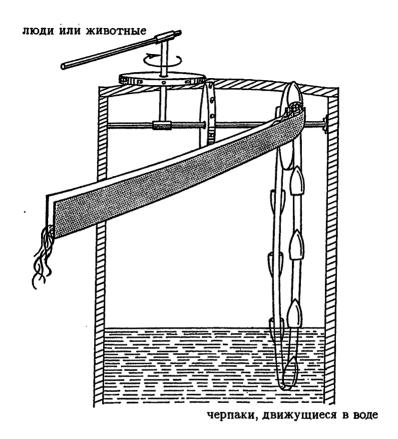
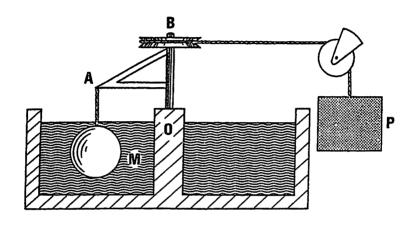


Рис. 50. Древнеперсидская водоподъемная машина.

в семнадцатом веке Эдм Мариотт (Edme Mariotte, 1620–84) измерял силу, действующую на такую пластину в потоке воды, а Борда приводил в движение плоские пластины разных размеров в неподвижной воде с помощью вращающегося рукава (рис. 51). При этом и Борда, и Боссю, по-видимому, независимо друг от друга, встретились с одним и тем же вопросом: может ли быть, чтобы одно и то же тело, помещенное в конечную или бесконечную среду, испытывало одно и то же лобовое сопротивление? Оба они дали на это отрицательный ответ. Чтобы до-

казать это, Борда провел целый ряд экспериментов с моделями равной или эквивалентной «средней площади», то есть максимальной площади в плоскости, перпендикулярной направлению движения.



Puc. 51. Гидроаэродинамические весы Борда.

На рис. 51 изображены гидроаэродинамические весы, примененные Борда. Под действием тяжести P колесо B вращается и движет рукав AB, буксирующий модель M, погруженную в круговой бассейн. Скорость одной и той же модели может меняться с помощью различных тяжестей P. Модели могут быть погружены полностью (чтобы изучать сопротивление одной воды) или частично (чтобы изучать совместное сопротивление воды и воздуха), или вовсе не погружены (чтобы изучать сопротивление одного воздуха).

Пожалуй, надо сказать, что, как читатель увидит далее, этот метод экспериментального исследования закона сопротивления воздуха применял также англичанин Робинс. Его машина, разновидность аэродинамических весов, изображена на рис. 52. Борда часто называют «отцом экспериментальной аэродинамики», но мне кажется, что не менее справедливо оказывать эту честь Робинсу. В самом деле, хотя Борда выполнил довольно широкую программу испытаний (77), и хотя

⁷⁷⁾ Mémoires de l'Académie des Sciences. Paris, 1763.

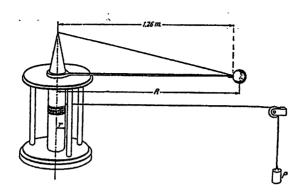


Рис. 52. Аэродинамические весы Робинса.

его пионерские результаты оказались весьма важными, надо признать, что роль Робинса в становлении экспериментальной аэродинамики была несколько более впечатляющей, более сосредоточенной и более законченной.

До экспериментов Борда полагали, что лобовое сопротивление сочетанию тел можно вычислить простым сложением лобовых сопротивлений составляющим телам. Борда первый указал, что это неверно. Он показал, что лобовое сопротивление двум сферам, расположенным близко друг к другу и движущимся в воде или в воздухе в таком положении, вообще говоря, отлично от суммы лобовых сопротивлений, которые эти тела испытывают отдельно. Теперь это явление в механике текучих сред называется интерференцией. Оно происходит от изменения спектра обтекания, сопровождающего близость тел. Такая интерференция, или эффект Борда, может быть благоприятной или неблагоприятной. Типичный пример последнего случая приведен на рис. 53: когда два хорошо обтекаемых тела движутся в жидкости отдельно, они почти не испытывают отрыва потока, и поэтому почти свободны от так называемой вихревой дорожки Кармана (см. стр. 211). Но если их сблизить, то образование вихрей за их совместной конфигурацией становится очевилным.

Рассмотрим теперь крыло самолета. При большом угле атаки ^{на} верхней стороне крыла происходит сильный отрыв потока, и вихревая дорожка отчетливо видна (см. вклейку 2). Но если присоеди-

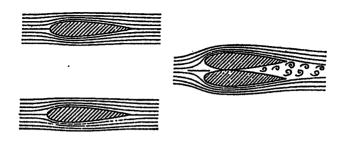


Рис. 53. Иллюстрация эффекта Борда.

нить к крылу кое-какие вспомогательные устройства, о чем будет речь дальше, то спектр обтекания над верхней поверхностью значительно улучшается, и интерференция становится благоприятной.

В аэродинамике известно, насколько сложна и важна проблема интерференции, особенно в проектировании самолетов. Крыло интерферирует со спектром обтекания стабилизатора; фюзеляж интерферирует со спектром обтекания крыльев и стабилизатора и так далее.

Другой оригинальный вклад Борда в механику текучих сред — его теорема, по которой аэродинамическое сопротивление пропорционально квадрату скорости, как в формуле Ньютона, и синусу угла атаки a, в отличие от формулы Ньютона ($R \propto v^2 \sin a$). Это так называемый закон Борда.

Бенджамин Робинс (1707-51) и Леонард Эйлер (1701-83)

В 1742 году Бенджамин Робинс опубликовал в Лондоне книгу под названием New Principles of Gunnery Containing the Determination of the Force of Gunpowder and Investigation of the Difference in the Resisting Power of the Air to Swift and Slow Motions («Новые основы пушечного дела, содержащие определение силы пушечного пороха, и исследование разницы в сопротивлении воздуха быстрым и медленным движениям»). Я думаю, это была (по крайней мере отчасти) первая печатная работа, посвященная тому, что впоследствии получило название экспериментальной аэродинамики. Чтобы поддержать это утверждение, я хотел

бы призвать в свидетели Леонарда Эйлера. Книга Робинса произвела на Эйлера столь сильное впечатление, что он не только перевел ее на немецкий язык, но обогатил ее собственными комментариями, поправками и важными дополнениями. В действительности его дополнения сделали книгу в пять раз длиннее (720 страниц), и она была опубликована под новым названием⁷⁸).

«Я теоретик, — пишет Эйлер в предисловии, — но я убежден, что теоретические результаты должны быть поддержаны экспериментальными доказательствами. Однако, к сожалению, обстоятельства препятствуют мне посвятить необходимое время экспериментальным исследованиям. Но эксперименты м-ра Робинса с применением баллистического маятника столь многочисленны, и полученные им результаты столь важны, что, как я полагаю, они будут достаточны для моих целей, особенно в изучении проблемы движения пушечных снарядов под задерживающим действием сопротивления воздуха».

В чем же были его интересы? Передо мной лежит собрание его работ, с очевидностью доказывающее, что Эйлер изучал сопротивление воздуха до появления книги Робинса, вероятно уже в 1727 году, в Санкт-Петербургской академии наук (Россия). В этой академии Даниил Бернулли пытался установить закон, или законы, вертикального движения сферических тел (вверх и вниз). Эйлер, его ближайший друг, разработал результаты Бернулли математически, применив для определения сопротивления воздуха закон v^2 . Эта его собственная специальная работа была опубликована много позже⁷⁹⁾, а потому осталась неизвестной таким исследователям, как Дюбуа, Боссю, Дарси, Базен, Навье, Пуазейль, Борда и другим. Ту же формулу v^2 он применил в

⁷⁸⁾ L. Euler. Neue Grundsätze der Artillerie enthaltend die Bestimmung der Gewald des Pulvers nebst einer Untersuchung über den Unterscheid des Widerstands der Luft in schnellen und langsamen Bewegungen, aus dem Englischen des Hrn. Benjamin Robins übersätzt und mit den nötigen Erläuterungen und mit vielen Anmerkungen versehen («Новые основы артиплерии, содержащие определение силы пороха и исследование различия в сопротивлении воздуха быстрым и медленным движениям, перевод с английского труда г-на Бенджамина Робинса, с необходимыми пояснениями и множеством примечаний»). Berlin, 1745.

⁷⁹⁾ L. Euler. Meditatio in experimenta explosione tormentorum nuper instituta («Размышление об экспериментах с выстрелами недавно введенных метательных машин»). St. Peterburg, 1862.

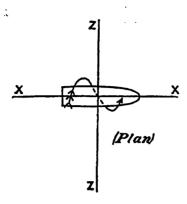
другой своей работе⁸⁰⁾, где устанавливалось, что до тех пор, пока среда (воздух) остается однородной и физически не измененной самим снарядом, закон квадрата скорости для сопротивления воздуха остается в силе.

Но вернемся к «Новым принципам пушечного дела» Робинса. Это был выдающийся труд. Вторая половина его была посвящена экспериментальной внешней баллистике. Здесь тоже использовался закон $R \propto v^2$ и, что еще более интересно, здесь появилось явление, называемое теперь эффектом Marhyca. Густав Генрих Marhyc (Gustav Heinrich Magnus, 1802-70), немецкий физик и химик, о котором будет подробнее сказано в дальнейшем в связи с вращением Флеттнера, получил задание прусского артиллерийского командования изучить причины отклонения снарядов от предназначенных для них траекторий; он пришел к заключению, что снаряд, вращающийся в полете, создает сам для себя боковую силу, вынуждающую его (снаряд) отклоняться в направлении этой силы; авторы книг и статей по механике текучих сред называют это эффектом Магнуса. Они забывают при этом, что задача философии науки — выяснить содержание научных предложений, то есть определить или раскрыть их истинное значение. Окончательное определение значения предложений не может делаться в форме изречений, не может само по себе превращаться в науку, потому что в таком случае нам пришлось бы снова и снова спрашивать о значении изречений, что привело бы к бесконечной регрессии. Каждое утвеждение о значении должно вести к доказуемым предложениям, обычно посредством научных фактов.

Но каковы же факты? Они доступны исследованию всех желающих и без сомнения доказывают, что эффект Магнуса был открыт, изучен и надлежащим образом изложен Бенджамином Робинсом примерно за 110 лет до Густава Магнуса⁸¹⁾. Как видно из рис. 54, этот эффект отклонения снаряда происходит согласно Робинсу от того факта, что, во-первых, снаряд сталкивается с аэродинамическим сопротивлением

L. Euler. Mechanik oder analytische Darstellung der Wissenschaft von der Bewegung mit Anmerkungen und Erläuterungen («Механика, или Аналитическое изложение науки о движении, с примечаниями и разъяснениями»). Berlin: 1748.

⁸¹⁾ В. Robins. Traité de mathématiques («Курс математики»). Traduit de l'anglais par M. Dupuy fils. Grenoble, 1771. (Автор ссылается на французский перевод. — Прим. перев.)



Puc. 54. Схема Ланчестера (Lanchester) полета пули. (Горизонтальная проекция).

его движению вперед, и, во-вторых, он вращается вокруг продольной оси, создавая тем самым некоторую асимметрию потока. Этот анализ появился в печати в 1742 году, и был доложен Робинсом Королевскому обществу в 1749 году.

Но каким же образом артиллерист Робинс мог прийти к этому чисто аэродинамическому выводу? Дело в том, что он развил теорию стволов с винтовой резьбой и, следовательно, вращающихся снарядов. Леонард Эйлер был противником такой теории, и между ними возник спор. Робинс был еще относительно мало известен, а Эйлер имел подавляющий авторитет. По этой причине точка зрения Эйлера одержала верх. Теория Робинса была отвергнута: трагедия, отнюдь не редкая в истории науки и техники.

Какую же позицию занимал Эйлер? Он настаивал, что все отклонения снарядов происходят от неправильностей их внешней формы. Конечно, это была другая философия. Но ее нельзя было отбросить, и по сей день нельзя отбросить, как неосновательную. «Вы можете утверждать, — говорил Эйлер, — что внутренняя поверхность ствола сделана с большой степенью точности. Но вы можете точно так же сказать, что внешняя поверхность пушечного снаряда или ружейной пули почти совершенна. На это я отвечу, что никакая сделанная человеком поверхность никогда не может быть абсолютно совершенна: поэтому снаряды и пули могут приобретать вращательное движение».

Таким образом, с исторической точки зрения было бы точнее говорить об «эффекте Робинса», или, пожалуй, об «эффекте Робинса — Эйлера», чем об «эффекте Магнуса». Но я не уверен, что эта рекомендация окажется в состоянии преодолеть инерцию сложившейся традиции.

Робинс установил ряд экспериментальных фактов. Из его данных вытекало, например, что при больших скоростях (как у ружейной пули) сопротивление воздуха возрастает быстрее, чем этого требует закон $R \propto v^2$, и его объяснение этого факта достойно современной газодинамики. Он говорил, что есть два рода текучих сред: во-первых, среды столь высокой плотности, или столь сжатые, что их частицы способны следовать за быстро движущимся твердым телом и сразу же заполнять вакуум, образующийся за его основанием; во-вторых, сильно разреженные среды, частицы которых поэтому не связаны между собой, не способны следовать за быстро движущимся телом и заполнять вакуум, возникающий за их основанием. В последнем случае согласно Робинсу сопротивление воздуха должно быть большим, чем в первом.

Это заключение может показаться несколько наивным. Не будем упускать из виду, что мы имеем здесь дело с историей, не нуждающейся ни в нашем одобрении, ни в порицании. Но мы можем и должны глубже разобраться в источнике такого заключения. Как видите, физическая модель атмосферы Робинса была радикально отлична от модели Ньютона. Согласно Робинсу воздух состоит из бесконечно малых частиц, находящихся в непрерывном движении. Он рассматривает воздух как разреженную среду с большими расстояниями между частицами, способную поэтому сжиматься под действием быстро движущегося снаряда. «А когда он сжимается, — говорит Робинс, — например, непосредственно перед головкой снаряда, то эта последняя встречается с совершенно новой силой — силой упругости воздуха...».

Леонард Эйлер, опять-таки, подходит к той же проблеме с другой точки зрения. По его представлению, твердое тело (снаряд), движущееся в воздухе, замедляется (теряет скорость), «потому что оно смещает частицы воздуха»; чем больше число смещенных частиц среды, тем больше потеря скорости, и обратно. Отсюда следует его общая философская концепция: кто хочет знать законы движения текучих сред, движения твердых тел в них и движения этих сред за твердыми те-

лами, тот должен изучать законы движения частиц текучей среды.

Первая задача, репіенная Эйлером, совпадаєт с задачей, которую рассмотрел Ньютон. В это была задача о движении тела в некоторой разреженной среде. Как и Ньютон, Эйлер рассматривал эту среду как состоящую из большого числа бесконечно малых частиц-молекул, равномерно распределенных в пространстве и находящихся в статическом равновесии. Молекулы не были при этом связаны между собой и не влияли друг на друга. Конечно, Эйлер понимал, что в природе таких сред не бывает; но ему нужна была модель, чтобы развить математический закон сопротивления воздуха. И он вывел следующие два закона:

$$R_C = CS \rho v^2$$
 ... для цилиндра, и

 $R_P = CS \rho v^2 \sin^2 \alpha$... для наклонной плоской пластины,

где C — безразмерный коэффициент пропорциональности, S — характерная площадь, ρ — плотность массы, v — скорость.

Затем подобно Робинсу Эйлер утверждает: когда скорость v возрастает, частицы среды все больше сжимаются; при некотором значении v расстояние между ними уменьшается, и сразу же впереди тела давление среды становится высоким, а сзади происходит обратное. Таким образом, сопротивление движению тела выше при высоких скоростях и ниже при низких.

Из этих очень похожих заключений (поддержанных экспериментами Робинса) Робинс и Эйлер оба вывели и другое, широко используемое в современной газодинамике. А именно, чтобы предотвратить такое резкое возрастание сопротивления воздуха, надо уменьшить количество воздуха, сжимаемого перед твердым телом; а этого можно достигнуть, уменьшая фронтальную площадь головки тела, то есть применяя тела с заостренными концами.

В действительности, как мы увидим позже, когда движущееся в воздухе тело достигает некоторой скорости, то воздух впереди него сжимается, и так называемое «ударное волновое сопротивление» вызывает резкое возрастание сопротивления воздуха. Робинс не пользовался этими терминами, и самое понятие газодинамики еще не было известно, но следствия из его теории, определений и опытных фактов дают нам

⁸²⁾ Мандрыка А. П. Баллистические исследования Леонарда Эйлера. М., 1958.

основание сказать, что современная газодинамика начинается с него и с Эйлера.

Лазар Карно (1753-1823), Пьер Симон де Лаплас (1749-1827) и др.

Как мы видели, Эйлер в России и Робинс в Англии весьма уверенно и безошибочно стучались в дверь аэродинамики сжимаемых газов. Более того, Эйлер писал⁸³⁾, что одна из основных задач теории текучих сред состоит в установлении определенного математического соотношения между плотностью ρ , упругостью ε и давлением p в каждой точке под действием «ускоряющих сил». И он сформулировал такое соотношение:

$$dp = L dx + M dy + N dz,$$

где p = p(x, y, z) — давление,

$$L = \frac{\partial p}{\partial x}, \quad M = \frac{\partial p}{\partial y}, \quad N = \frac{\partial p}{\partial z}.$$

Если p=p(x,y,z) задана как функция ρ в каждой точке, то предыдущее уравнение принимает вид

$$dp = \rho(P\,dx + Q\,dy + R\,dz),$$

где $P,\ Q,\ R$ — прямоугольные компоненты «ускоряющей силы». Он говорит в заключение, что предыдущее уравнение должно быть интегрируемо, когда ρ постоянна или зависит только от p.

Мы уже продемонстрировали один метод такого интегрирования (см. интеграл Лагранжа эйлеровых уравнений движения, стр. 102). Второй метод состоит в следующем. Если предположить, что воздух находится в адиабатическом состоянии, то соотношение между плотностью и давлением имеет вид $p = \text{const} \cdot \rho^{\gamma} = C \rho^{\gamma}$, или $\rho = \rho_0 (p/p_0)^{1/\gamma}$, где p_0 и ρ_0 — известные давление и плотность в невозмущенном возлухе, а γ — отношение удельных теплоемкостей воздуха. Подставив

Principes généraux de l'état d'équilibre des fluides («Общие принципы равновесного состояния жидкостей»). Mém. de l'Académie de Berlin, 1755.

это выражение во второй член интеграла Лагранжа и выполнив тривиальные математические преобразования, получаем следующее основное уравнение:

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_0^2}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2}\right)^{\gamma/(\gamma - 1)},$$

где ${\rm M}_0=v_0/a_0$ и ${\rm M}=v/a$ — соответствующие числа Маха, рассматриваемые дальше.

Хотя это выражение не имеет ничего общего с Даниилом Бернулли, в учебниках и журналах оно опять-таки именуется «уравнением Бернулли» для сжимаемых сред. Если уж надо как-то назвать его, я назвал бы его «уравнением Эйлера — Лагранжа». Впрочем, важнее то обстоятельство, что отношение $\rho_0/\gamma p_0$ в этом уравнении равно $1/a_0^2$, или $\gamma p_0/\rho_0=a_0^2$, где a_0 — скорость звука. Иными словами, потоки сжимаемых текучих сред, по-видимому, связаны со скоростью распространения в них звуковых волн (к этой проблеме мы вернемся позже).

Лаплас был французским математиком и астрономом. Среди многих его вкладов в науку следует отметить теорию движения Луны, динамику приливов, теорию удельных теплоемкостей, равновесие вращающихся жидких масс и т. д. Карно, при жизни прозванный также le grand Carnot («великий Карно»), был человеком совсем другого склада: государственный деятель и генерал, депутат Законодательного Собрания (1791) и Национального Конвента (1792), член Комитета общественной безопасности (1793) и главнокомандующий вооруженными силами (1793—5), военный министр (1800—1), у Наполеона — министр внутренних дел (1815) и т. д. В 1815 году он был изгнан Людовиком XVIII и жил сначала в Польше, а потом в Швейцарии*)

Мог ли столь занятый человек быть также математиком? Разумеется, мог: его труды Essai sur les machines en général, Principes généraux de l'équilibre et du mouvement («Общее рассуждение о машинах. Общие начала равновесия и движения», 1803) и Mécanique analytique («Аналитическая механика», 1788) были важными страницами истории и философии математики, механики и механики текучих сред. Любопытно

^{*)} Эти биографические данные не вполне точны: например, Карно был членом Комитета общественного спасения (а не Комитета общественной безопасности), ушел в отставку с поста военного министра уже в 1800 году, и был изгнан (как «цареубийца») в 1816 году. — Прим. перев.

упомянуть, что он был одним из немногих, кто осмеливался противоречить Эйлеру, Лагранжу, Даламберу и другим признанным авторитетам.

Он полагал, что ученый должен быть также философом, а философ — также ученым. Это вызвало у него предубеждение против многих пионеров науки. Он «признавал» Леонардо да Винчи как великого человека, может быть, даже величайшего из людей, но лишь в смысле философии, потому что «путаница, связанная с понятием «силы», могла возникнуть лишь в уме, который был только философским». Аристотель был для Карно «всего лишь мыслителем, но не ученым». А что можно сказать о самом сэре Исааке Ньютоне? Разве он не внес недоразумения в самое понятие «силы»? Разве не известно, что согласно Ньютону тела притягивают друг друга через пустое пространство?

Да, все они — Аристотель, да Винчи, Ньютон, Эйлер, Даламбер и все другие — не доросли до понимания этой великой вещи, именуемой силой. Но он, Лазар Карно, «всегда знал», что нет ничего понятнее силы. Потому что (говорит он) сила всегда связана с движением, а движение столь же естественно, как сама природа. «Но когда я говорю «движение», — продолжает он, — то я имею в виду его количество и направление. Первое из них может измеряться лишь произведением массы движущегося тела на скорость, с которой оно движется, то есть mv; второе же определяется скоростью, которую следует поэтому обозначать как \vec{v} , где стрелка указывает, что движение имеет направление. Таким образом, количество движения есть $m\vec{v}$ и должно называться импульсом (momentum)..., и всякий раз, когда и где имеется импульс, там есть и сила..., так что они связаны формулой

$$\vec{F} dt = d(m\vec{v}) \gg$$
.

Если не считать стрелок, это в действительности формула Ньютона.

Но Карно не просто приводит ее: он ее выводит и доказывает. Это не удивительно, поскольку Карно был одним из немногих людей своего времени, для которых теория, отделенная от практики, была подобна королеве, лишенной ее королевства. Мы можем проследить его умонастроение и его ход мыслей как в его сочинениях, так и в инженерно-технических идеях.

Подробный анализ этих концепций и основных соображений, из которых они выводятся, показывает, что Карно был в действительности более чем математик, физик или инженер: он был философ еще неизвестного и редкого типа — философ науки, то есть человек, способный вывести самое общее понятие, исходя из фактического знания, а затем способный довести его до практических предложений, до инженерных решений. Поэтому неправильно и исторически несправедливо изображать его как человека, «мало заботившегося о теоретической стороне проблемы», идеи которого «не имели большого влияния на развитие науки»⁸⁴).

Перейдем теперь к Лапласу и Пуассону. Симеон Дени Пуассон (Siméon Denis Poisson, 1781–1840), другой великий французский математик, занимавшийся приложениями этой науки, был автором фундаментальных работ об определенных интегралах, рядах Фурье и вариационном исчислении, без которых механика текучих сред и теория ракетных траекторий не могли бы достигнуть своего нынешнего развития, придал привлекательность и силу математической технике ряда отраслей науки. Но я ограничусь здесь его уравнением в частных производных $\nabla^2 \varphi = -u$, или

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = -u.$$

Пуассон и Лаплас жили почти в одно время. В некотором смысле и в какой-то мере они были учениками друг друга. Я имею в виду, например, знаменитое дифференциальное уравнение в частных производных Лапласа $\nabla^2 \varphi = 0$, или

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0.$$

Сравнивая эти уравнения, мы видим, что при -u=0 уравнение Пуассона превращается в уравнение Лапласа. Оба этих уравнения, и в особенности последнее, оказались фундаментально важными. Поток мимо тела обтекаемой формы, вызывающей невысокое сопротивление,

⁸⁴⁾ Sir James Jeans. The Growth of Physical Science («Развитие физической науки»). Cambridge, 1947.

состоит из двух различно устроенных частей: (1) из тонкого пограничного слоя, в котором господствует вязкость, и который переходит в спутный след, и (2) из внешнего движения, в котором эффекты вязкости едва поддаются измерению.

Во внешнем — невозмущенном — потоке жидкость обычно предполагается лишенной вязкости, так что давление в любой точке одинаково действует во всех направлениях; и если такой поток безвихревой, то он останется безвихревым и в течении, сопровождающем погруженное тело. Таким образом, полная высота напора, выражаемая интегралом Лагранжа, остается постоянной во всем потоке. Для учета формы тела надо сделать тесное приближение к его поверхности, но не столь тесное, чтобы войти в пограничный слой. Это равносильно допущению, что пограничный слой везде очень тонок, и что отсутствует спутный след. В пределе можно считать, что жидкость совершенно беспрепятственно скользит вдоль поверхности погруженного тела. Следовательно, для такой идеализированной жидкости граничное условие попросту сводится к обращению в нуль нормальной компоненты скорости, и весь поток оказывается потенциальным.

Математические теории текучих сред Клеро, Стевина, Эйлера, Лагранжа и Даламбера относились к этому частному классу течений. Изучение ламинарных течений весьма облегчается благодаря потенциалу скоростей $\varphi(x,y,z)$, задающему компоненты скорости в виде

$$v_x = \frac{\partial \varphi}{\partial v}, \quad v_y = \frac{\partial \varphi}{\partial v}, \quad v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z}.$$

Если подставить эти выражения в дифференциальное уравнение непрерывности, то возникает уравнение Лапласа. С другой стороны, линии тока суть кривые, описываемые так называемой функцией тока $\psi(x,y)$,

$$d\psi = \frac{\partial \varphi}{\partial y} dx + \frac{\partial \varphi}{\partial x} dy.$$

Как мы увидим в другом месте этой книги, уравнение Лапласа связано также со скоростью звука в текучих средах. При определенных условиях уравнению Лапласа удовлетворяют многие потенциалы— гравитационный, электростатический, магнитный, электрический и потенциал скоростей, что делает его важным, широко применяемым

средством исследования. С помощью той же формулы Лаплас исправил вычисление скорости звука, сделанное Ньютоном, показав⁸⁵), что эта скорость в $\sqrt{1,4}$ раз больше полученной Ньютоном. В самом деле, есля считать газ состоящим из независимых молекул, то оказывается, что скорость звука того же порядка величина, что скорость молекул; но согласно кинетической теории газов⁸⁶) квадрат скорости молекул равен $3p/\rho$, тогда как квадрат скорости звука есть $\gamma p/\rho$. Следовательно, отношение скорости молекул к скорости звука составляет $\sqrt{3/\gamma}=1,46$, поскольку для воздуха $C_p/C_v=1,4$.

Огюстен Луи Коши (1789-1857) и другие

Коши занимает особое место в истории механики текучих сред в нескольких отношениях. Прежде всего, он был человеком большой интеллектуальной честности в том смысле, что не согласен был жертвовать своим «Я», своими убеждениями ни для каких материальных преимуществ или формальных почестей. Подобно некоторым из его современников он полагал, что человек, не уважающий собственную совесть, никогда не будет уважаем другими. Он легко мог бы занять видное место в парижском обществе (где он исполнял три важных профессорских должности по математике), если только примирился бы с существовавшим тогда положением вещей. Но когда от Коши требовали, чтобы он, как и все другие, принял присягу, он отвечал, что знает свой долг, но не способен носить два лица под одной шляпой.

Это не могло нравиться Луи-Филиппу и его политической бюрократии, так что ему пришлось покинуть свою страну и эмигрировать — сначала в Италию, в Турин, потом в Прагу, где он преподавал математику. В 1851 году он вернулся во Францию и, по особому декрету императора, ему разрешено было занимать кафедру математической астрономии, не принося присягу верности; он создал этим блестящий пример честного поведения ученого. Перед этим и после этого

⁸⁵⁾ Theodore von Karman. Aerodynamics («Аэродинамика»). Ithaca, New York: Cornell University Press, 1954.

⁸⁶⁾ См., например, J. H. Hildebrand. An Introduction to Molecular Kinetic Theогу («Введение в молекулярно-кинетическую теорию»). New York: Reinhold Publishing Corp., 1963.

Коши опубликовал примерно 180 работ и написал около 110 кратких $_{3 \text{а} \text{меток}}$. Некоторые из них были весьма важны для механики континуума в целом и, в частности, для механики текучих сред. Вероятно, справедливо было бы утверждать, что этот предмет создали Эйлер и Лагранж. К моменту своей смерти Эйлер работал над фундаментальным курсом гидродинамики; Коши завершил его предприятие, написав некоторые из намеченных глав. Лапласу мы обязаны его могущественным уравнением (стр. 132); Коши показал, что аналогичное уравнение существует для функции тока $\psi=\psi(x,y)$. Лаплас завершил математическую теорию потенциала скоростей; Коши сделал следующий шаг, получив теорему Коши — Стокса. Лагранж проинтегрировал эйлеровы уравнения движения; Коши повторил это историческое достижение и пришел собственным путем к тому же интегралу, который поэтому часто называется интегралом Лагранжа — Коши.

В одной из своих наиболее интересных работ 87 Коши математически доказал, что движение частицы жидкости состоит из поступательного движения со скоростью $\bar{v}\left(v_x,v_y,v_z\right)$, вращательного движения с угловой скоростью $\bar{\omega}\left(\omega_x,\omega_y,\omega_z\right)$ и движения деформации, характеризуемого функцией $\Phi(x,y,z)$. Несколько сложную математическую формулировку этой теоремы можно найти во многих стандартных учебниках 88 . Ее доказал также Γ ерман фон Γ ельмгольц, о котором еще будет речь дальше.

Если одна из трех компонент скорости обращается в нуль (например, $v_z=0$), мы имеем двумерное течение. Рассмотрим, например, двумерный потенциал потока, для которого $\rho=$ const (что означает несжимаемость) и

$$v_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}.$$

Тогда уравнение непрерывности Эйлера и уравнение Лапласа принимают соответственно вид

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0.$$

⁸⁷⁾ Sur les dilatations, les condensations et les rotations produites par un changement de forme dans un système de points matériels, vol.XII. Oeuvres complètes de Cauchy.

⁸⁸⁾ См., например, Кочин, Кибель и Розе «Теоретическая гидродинамика». (Автор ссылается на английский перевод. — Прим. перев.).

Можно также показать, что две функции — $\varphi(x,y)$ и $\psi(x,y)$ связаны связаны между собой так называемыми условиями Коши — Римана

$$v_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

или, что то же,

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

Отсюда следует, что для несжимаемой жидкости с потенциалом скоростей

$$\frac{\partial \psi^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0,$$

то есть функция тока $\psi=\psi(x,y)$ также удовлетворяет уравнению Лапласа. Можно считать, что каждое решение уравнения Лапласа представляет потенциальный поток без вращения. Но чтобы решение представляло практический интерес, оно должно сверх того удовлетворять некоторым граничным условиям.

Георг Фридрих Бернгард Риман (1826–66) был немецким математиком выдающихся способностей. Он участвовал в развитии различных областей математики: неевклидовой геометрии, теории функций, теории потенциала, математической физики, теоремы об отображениях и т. д. Он не был специалистом по механике текучих сред, и его прямой вклад в этот предмет был равен нулю. Но некоторые из его математических методов были и остаются весьма ценными. Например, несколько преобразованные уравнения Коши — Римана показывают, что линии, вдоль которых потенциал скоростей сохраняет постоянное значение, $\phi = \phi(x,y) = \text{const}$ (эквипотенциальные линии), и линии, вдоль которых $\psi = \psi(x,y) = \text{const}$ (линии тока), ортогональны друг другу. Это значит, что любое двумерное течение жидкости может быть представлено некоторым распределением линий $\phi = \text{const}$ и $\psi = \text{const}$, как показано на рис. 55 (a,b).

Поскольку оба семейства линий взаимно ортогональны, с геометрической стороны безразлично, которые из них называть линиями ${\bf т}^{{\bf r}{\bf k}{\bf a}}$, или эквипотенциальными линиями. Поэтому ϕ и ψ называются ${\bf conp}^{{\bf g}{\bf r}}$ женными функциями. Таким образом, если мы нашли решение некоторой двумерной задачи механики текучих сред, то есть если нам удалось

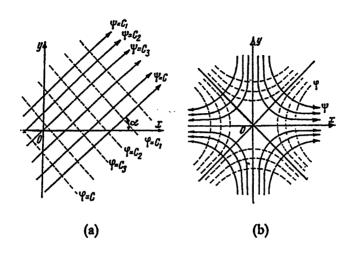


Рис. 55. Линии тока и функции тока.

найти надлежащую функцию ϕ (и, следовательно, ψ), то мы одновременно находим решение другой задачи, где ϕ и ψ меняются местами. При этом мы входим в мощную отрасль математики — теорию функций комплексного переменного — доставляющую широкий круг интересных и важных теоретических решений задач механики текучих сред, прямо или косвенно связанных с именами Эйлера, Вейерштрасса 89), Римана 90), Лапласа, Коши, Жуковского и других. В современной механике текучих сред широко используются конформные преобразования, теория крыла, источники, стоки, диполи и другие технические приемы, основанные на теории функций комплексного переменного.

Герман фон Гельмгольц (1821-94) и другие

Без сомнения, Герман фон Гельмгольц был одним из величайших Ученых эпохи после Леонардо да Винчи. Он был не только анатомом,

⁸⁹⁾ Karl Weierstrass (1815–1897). Werke, Bd. 3.

Riemann, Grundlagen für eine allgemeine Theorie der Funktionen einer veränderlichen komplexen Grösse. Werke, 2te Aufl., Leipzig: 1892.

не только физиологом, физиком и математиком; он был также философом — великий мыслителем, интересовавшимся механизмами взаимодействия между различными процессами и явлениями природы. Как и Пуазейль (Poiseuille), Якобсон (Jacobson), Буссине (Boussinesq), Стефан (Stefan), Дюкло (Ducleaux), Мейер (Meyer) и другие, он изучал течение жидкости в применении к кровообращению, но его открытия выводы — по крайней мере некоторые из них — оказались фундаментальными и для медицины, и для механики текучих сред.

Как указал Гельмгольц, жалоба Жирара, что «частицы жидкости отказываются двигаться по прямым линиям», объяснялась шероховатостью поверхности трубок вследствие корродирующего действия воды на медь⁹¹⁾. Значительно позже И. Н. Никурадзе, известный кавказский аэродинамик, работавший в Геттингене, доказал на опыте, что теоретический вывод Гельмгольца был совершенно верен, то есть шероховатость в самом деле играет очень важную роль в формировании течений в трубках⁹²⁾.

В обычном словоупотреблении вихрем называется водоворот, или круговая полость, образуемая вращающейся жидкостью. По образцу этого значения в механике текучих сред вихрем называется область в жидкости, ограниченная так называемыми линиями вихря, касательные к которым во всех точках параллельны местному направлению завихренности. Под вихревым движением жидкости называется ее движение с ненулевой завихренностью. Векторная мера локального вращения жидкости называется ротором вектора скорости \bar{v} и записывается в виде Curl \bar{v} или Rot \bar{v} . Таким образом, если Curl \bar{v} не равен нулю, то в потоке существует цепочка вращающихся элементов — вихревая линия. Как показал Гельмгольц, эти линии, служащие осями вращения, либо являются замкнутыми линиями, либо начинаются и кончаются на границах жидкости или в точках бесконечной завихренности.

Вихрь вызывает внешнее движение жидкости, так сказать, внешний поток. Образцы такого потока показаны на рис. 56, 57 и на вклейке 13. В случае идеальной (невязкой) жидкости внешний поток есть, 10

⁹¹⁾ Ueber Reibung tropfbarer Flüssigkeiten, Sitzungsberichte K. K. Akademie der Wissenschaften zu Wien. H.Helmholz und G.Piotrowski, B. XL, S. 636, v. 12. April 1860.

⁹²⁾ Nikuradse J. Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Röhren-Forsch. Gebiete Ingenieurw. 1932. Forschungsheft 356.

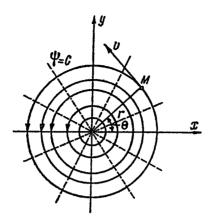


Рис. 56. Чисто круговое течение.

существу, поле скоростей, или циркуляция без вращения, т. е. частицы жидкости движутся вокруг вихря, но не вращаются вокруг своих собственных осей, и тем самым имеют лишь поступательные скорости. Поскольку эти последние вызываются вихрем, они называются индуцированными скоростями.

Представим себе теперь чисто круговое течение, в котором частицы движутся вдоль круговых линий тока, не вращаясь вокруг своих собственных осей (рис. 56). Пусть сердцевина вихря подобна твердому телу (общепринятое допущение в механике текучих сред), так что его главные кинематические характеристики регулярны, то есть свободны от искажений, следующих из теоремы Коши — Гельмгольца. Поле скоростей, индуцируемое таким вихрем вокруг себя, показано на рис. 57: каждая круговая линия тока имеет свою собственную скорость u. «Работа», выполненная полем u вдоль круговой линии тока длины $2\pi r$, называется циркуляцией u и обозначается через Γ , так что $\Gamma = 2\pi r u$. Более общим образом, циркуляция любого поля скоростей v вдоль замкнутой линии равна

$$\Gamma = \int \bar{v} \cdot d\bar{l} = \int v \cos \alpha \, dl,$$

 $^{
m r}$ де lpha — угол, образуемый v с местным направлением кривой, а dl —

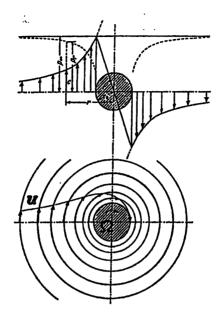


Рис. 57. Поле скоростей, индуцируемое вихрем.

элемент кривой.

Если течение потенциальное, т. е. безвихревое ($\overline{\Omega}=0$), и если потенциал скоростей $\varphi=\varphi(x,y)$ — однозначная функция координат (x,y), то $\Gamma=0$ для любой кривой внутри потока. Гельмгольц доказал в 1858 году, что сила, или импульс вихря постоянна вдоль всей его длины, то есть везде $\omega A=\mathrm{const}$ (где ω — угловая скорость, а A — площадь поперечного сечения вихря. Это — его так называемый второй закон (первый — уже рассмотренный закон Коши — Гельмгольца). Это чисто кинематический закон. Но, как можно показаты неизменность импульса вихря во времени следует также из динамических уравнений. Другие законы, или теоремы Гельмгольца состоят в следующем: импульс вихревой нити не зависит от времени; каждая вихревая линия все время состоит из одних и тех же частиц жидкости, частицы, не вращающиеся в данный момент, никогда не вращались и никогда не будут вращаться — разумеется, если выполнены наложей

ные условия.

Это и есть исторические теоремы Гельмгольца. Они выражают законы сохранения вихрей в невязкой жидкости, находящейся под действием только консервативных сил, в предположении, что плотность масс есть функция только от давления.

Пожалуй, здесь уместно прибавить, что все эти теоремы имеют некоторую связь с более общей теоремой Лагранжа, утверждающей и доказывающей, что если жидкость идеальна, причем сила, действующая на единичную массу, имеет потенциал и плотность массы жидкости есть функция только от давления, то любая часть жидкости, свободная от вихрей в начальный момент, остается свободной от вихрей. Иными словами, поток идеальной жидкости, который первоначально был потенциальным, остается потенциальным.

Лорд Кельвин, или сэр Уильям Томсон (1824–1907), британский математик и физик, показал 93), что циркуляция вдоль любой замкнутой жидкой нити, т. е. вокруг любого контура, состоящего всегда из одних и тех же частиц жидкости, не меняется со временем. Это значит, что если в данный момент времени $\Gamma=0$ для любого контура, то Γ останется навсегда равной нулю. Иначе говоря, если движение жидкости однажды было безвихревым (потенциальным), то оно навсегда останется таковым — если наложенные условия будут по-прежнему выполняться.

Сэр Джордж Габриэль Стокс (1819–1903) был выдающимся математиком и физиком ирландского происхождения. Во время, когда он был профессором в Кембридже, он сделал несколько важных вкладов в механику текучих сред. Например, он дал строгий вывод общих уравнений движения реальных жидкостей и стал тем самым соавтором уравнений Навье — Стокса (см. стр. 116).

Так называемое течение Стокса — это течение вязкой жидкости $^{\text{C}}$ очень малым числом Рейнольдса, для которого инерциальные, или ускоряющие, силы пренебрежимы и уравнения Навье — Стокса сводятся к простому виду $\mu \nabla^2 \bar{v} = \operatorname{grad} p$. Если число Рейнольдса меньше 0,1 , то сопротивление потоку текучей среды для сферы задается формулой Стокса $R=6\pi\mu rv$, где r— радиус сферы, а v— ее скорость.

Sir William Thomson On Vortex Motion. Trans. Roy. Soc. Edinburg. 1868.
V. 25.

Есть также знаменитая теорема Стокса, согласно которой поверх. ностный интеграл от ротора вектор-функции, в нашем случае от $\mathrm{Curl}_{\bar{v}_i}$ равен линейному интегралу от этой вектор-функции по замкнутой крв. вой, ограничивающей эту поверхность. Чтобы понять значение этой теоремы для механики текучих сред, вспомним из предыдущего пункта, что «работа» вектора скорости \bar{v} называется циркуляцией вдоль крв. вой l,

$$\Gamma = \int \bar{v} \cdot d\bar{l}.$$

Как мы уже видели, это выражение тесно связано с вихревым движением, а также с самыми характерными свойствами безвихревого (потенциального) движения.

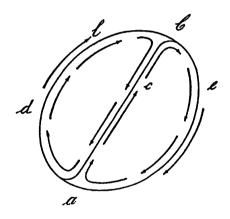


Рис. 58. Схема, иллюстрирующая теорему Стокса.

При этом важно иметь в виду, что если обратить направление интегрирования, то предыдущий интеграл лишь меняет знак, то есть

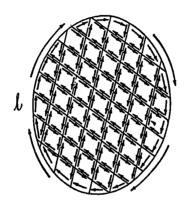
$$\int_{ab} = -\int_{ba}.$$

Чтобы убедиться в этом, присмотримся к рис. 58. Если acb — непрерывная линия, соединяющая пару точек (a,b) контура l=adbea, то

$$\Gamma_{adbca} = \Gamma_{adb} + \Gamma_{bca}, \quad \Gamma_{acbea} = \Gamma_{bea} + \Gamma_{acb}.$$

 $_{ ext{Ho поскольку}}$ $\Gamma_{bca}=-\Gamma_{acb},$ отсюда следует, что

$$\Gamma_{adb} + \Gamma_{bea} = \Gamma(l) = \Gamma_{adbca} + \Gamma_{acbea}$$
.



Puc. 59. Другая схема, иллюстрирующая теорему Стокса.

Подобным же образом любую непрерывную поверхность, ограниченную заданным контуром l, можно разделить на части, как это указано на рис. 59; тогда «работа» вектора скорости \bar{v} вдоль всей замкнутой линии l равна алгебраической сумме «работ» вдоль периметров всех частичных поверхностей, откуда и следует теорема Стокса: линейный интеграл от вектора \bar{v} вдоль контура l равен поверхностному интегралу от его ротора по любой поверхности, ограниченной l. Иначе говоря, полная сумма циркуляций по малым контурам малых поверхностей (на которые была разделена поверхность) равна циркуляции по охватывающему контуру l.

Вряд ли нужно напоминать, что эта теорема была и остается очень важной. Ее появление было подобно открытию ворот в новый замок знания или завоеванию еще одной снежной вершины — на пути к современной механике текучих сред.

Можно было бы пойти дальше, называя все больше людей, способствовавших формированию механики текучих сред как академической дисциплины. Но ограниченность места вынуждает нас свести \mathfrak{I}_{0} список к немногим именам.

Немец Густав Кирхгоф (1824–87) и британец барон Релей (1842—1919) развили теорию потока мимо наклонных пластин — потока с разрывом. Предполагалось, что таким образом будут исправлены в теория столкновения Ньютона, и парадокс Даламбера (по которому сопротивление равномерному движению тела в невязкой жидкости равно нулю, если жидкость смыкается за телом). Но, как показали эксперименты и последующие теории, эта теория Кирхгофа — Релея оказалась весьма неточной.

Как мы видели, вплоть до конца семнадцатого века и начала восемнадцатого философия научного знания Аристотеля господствовала в главных течениях мышления. Например, почти все ведущие ученые продолжали верить, что время падения тел обратно пропорционально их весу, то есть что тяжелое тело падает быстрее легкою. Первым, кто бросил вызов теориям Аристотеля, был Галилео Галилей. Впервые в истории механики текучих сред он, например, показал, что жидкая среда сопротивляется движущемуся в ней телу с силой, возрастающей при возрастании плотности массы жидкости. Мариотт также впервые — в действительности измерил это сопротивление. Сэр Исаак Ньютон, а затем Леонард Эйлер впервые установили историче скую формулу $R \propto v^2$. Даламбер, как уже было сказано, выдвинул более общую, но и более рациональную теорию сопротивления текучей среды, за которой последовал ряд экспериментальных исследований. Уильям Джон Макуорн Ранкин (William John Macquorn Rankine, 1820-72), шотландский инженер и физик, основываясь на теории аналитических функций, обогатил теорию текучих сред так называемым «метолом источников».

Осборн Рейнольдс (1842-1912)

Однако осталась нерешенной одна важная проблема. Именно, когда скорость движущегося в жидкости тела мала, то сопротивление среды пропорционально скорости, так что коэффициент сопротивления обратно пропорционален скорости. Когда v возрастает, коэффициент лобового сопротивления становится почти независимым от v; при дальнейшем возрастании v этот коэффициент снижается до меньшего значимается до меньшего до меньшего значимается до меньшего до

пения. Каковы же причины этого?

Чтобы сформулировать ответ, надо еще раз напомнить, что жидкость есть, в простых выражениях, вещество, в котором расстояния между молекулами очень малы по сравнению со всем телом жидкости, и что между частицами существует трение. Величина (или сила) последнего зависит от типа жидкости и определяется формулой Ньютона $\tau = \mu(du/dy)$, где μ — коэффициент вязкости, du — дифференциал скорости скольжения одного слоя жидкости по другому, и dy — дифференциал расстояния между слоями.

Формула Ньютона охватывает широкий диапазон текучих сред (вода, воздух и т. д.). Но в природе есть также вещества, для которых деформация сдвига τ зависит не только от градиента скорости $(\partial u/\partial y)$, но также от напряжения; это упруговязкие вещества. Другой тип текучей среды — среда с пластическим поведением, характеризуемым видимым пределом текучести, т. е. ведущая себя как твердое тело до этого предела, а затем ведущая себя наподобие вязкой жидкости. Другую крайность представляют так называемые дилатантные среды, или просто дилатанты, которые легко текут с низкой вязкостью при небольших скоростях деформации, но при возрастании скорости деформации становятся все более похожими на твердое тело (рис. 60).

Конечно, можно идеализировать воду, воздух и газы как невязкие среды ($\mu=\tau=0$), и в таком случае называть их идеальными текучими средами. Но в действительности это ньютоновы вязкие среды. И здесь мы приходим к Осборну Рейнольдсу (Osborne Reynolds): он провел самое тщательное исследование таких сред и доставил механике текучих сред массу новых знаний. Его замечательное открытие двух видов течения, ламинарного и турбулентного, сделанное в 1883 году, стало отправной точкой важных работ.

К тому времени, когда Рейнольдс стал известным ученым, машины всевозможных видов проникли во все области человеческой жизни. Но, спрашивал Рейнольдс⁹⁴⁾, много ли мы знаем о смазочных и других веществах, которые применяются, чтобы сделать поверхности машин гладкими и скользкими? Он убедительно объяснил, что для них все еще нет установленной теории, как и для вязких жидкостей

Osborne Reynolds. Papers on Mathematical and Physical Subjects («Работы по математике и физике»). Cambridge: University Press, 1899. V. 1, 2; 1902. V. 3

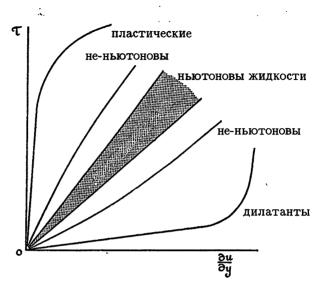


Рис. 60. Ньютоновы и не-ньютоновы жидкости.

вообще. Причину он усматривал в том, что проблемы взаимодействия между твердой поверхностью и потоком вязкой жидкости были далеко не ясны. Изучив работу по этому вопросу Бичема Тауэра (Beauchamp Tower) 95 , Рейнольдс пришел к заключению, что из уже установленных уравнений гидродинамики можно вывести по крайней мере некоторые законы смазки. Он подверг повторному рассмотрению закон Ньютона и, к своему удивлению, обнаружил, что он (даже он, Рейнольдс!) очень мало знал о градиенте скорости (dv/dy). Он не имел обыкновения удовлетворяться столь малым знанием. И вскоре он был уже в состоянии сказать, что это отношение может представлять только одну вещы деформацию в кинематической структуре смазочного вещества. Поэтому вязкость была для Рейнольдса не чем иным, как сдвигающим усилием, существующим и действующим во время процесса деформации смазочного вещества, то есть вязкого течения; таким образом, об определял коэффициент вязкости (или абсолютную вязкость), как от

⁹⁵⁾ Proceedings of the Inst. of Mechanical Engineers, 1883-84.

 $_{
m HOIII}$ ение сдвига к скорости деформации. Итак, если скорость равна (u/a), то $f=\mu(u/a)$.

Но постоянна ли величина μ во всей жидкости? — спрашивал Рейнольдс. Различна ли она для разных жидкостей? Может ли она быть одинаковой на поверхности твердого тела и на некотором расстоянии от него? На это он дал отрицательный ответ. Поскольку сопротивление среды пропорционально v^2 , значение μ может быть постоянно только в течении, свободном от вихрей Стокса и от трансверсальных токов.

Далее, Рейнольдс выразил несогласие с теми, кто думал, что если сопротивление текучей среды пропорционально v, то μ зависит от (u/a), а если (u/a) мало, то μ в основном постоянно. Ссылаясь на экспериментальные результаты, полученные Пуазейлем и другими, он утверждал, что μ зависит не только от отношения (u/a), но также от размеров трубки. «Причина этого, — говорил он, — состоит в том, что кинематическая структура потока (в трубке) меняется: прямые, параллельные оси, превращаются в зигзагообразные, а ламинарное течение в турбулентное».

Это открытие имело ряд последствий. С помощью своего метода цветных полос⁹⁶) Рейнольдс окончательно доказал, что в первом случае существует непрерывный поток частиц, в котором при не зависящей от времени скорости движение в фиксированных точках остается неизменным, тогда как во втором случае, вследствие образования маломасштабных, но интенсивных вихрей, движение в фиксированных точках не подчиняется никакому определенному закону.

Рейнольдс пришел к заключению, что устойчивости и постоянству движения способствуют следующие факторы: возрастание вязкости μ ; сближение твердых границ; свободные (для доступа воздуха) поверхности; кривизна пути, с наибольшей скоростью с внешней стороны кривой; наконец, уменьшение плотности жидкости. Противоположные условия согласно Рейнольдсу способствуют турбулентности.

Эксперименты, с помощью которых Рейнольдс продемонстрировал оба вида течения воды, были выполнены в стеклянных трубках различного диаметра до двух дюймов, длиной примерно от 4 до 6 дюймов. Эти трубки были снабжены колоколообразными входами и горизонтально

⁹⁶⁾ Phil. Trans. Royal Society, 1883.

погружены в бак прозрачной воды со стеклянными боковыми стенкаму (рис. 61). Вода в баке оставлялась в покое, пока не приходила в совершенно неподвижное состояние, а затем слегка приоткрывался вентиль B, так что вода могла медленно протекать по трубке. После этого во входное отверстие вводилось небольшое количество воды, окрашенной анилиновой краской, при помощи тонкой трубки, исходящей из сосуда A.

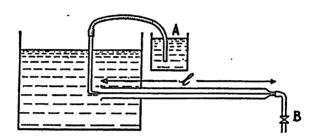


Рис. 61. Эксперимент Осборна Рейнольдса.

Сначала эта окрашенная вода втягивалась в трубку с главным потоком, распространяясь на всю ее длину, причем вода в ней казалась неподвижной, если только воду в баке не подвергали небольшим колебаниям, от чего линии тока слегка смещались из стороны в сторону, никоим образом не теряя своей определенности. При дальнейшем открытии вентиля В скорость течения в трубке возрастала, и поток все больше в нее втягивался, все еще оставаясь определенным, пока пря определенной скорости вблизи выхода из трубки не начали образовываться перемежающиеся вихри (рис. 62).

Образование этих вихрей сопровождалось почти мгновенной диффузией цветной полосы. При дальнейшем увеличении скорости точка возникновения вихрей смещалась по направлению к устью⁹⁷). Видимая меньшая тенденция к образованию вихрей вблизи входного отверстия трубы объяснялась стабилизирующим действием сужающегося входного отверстия. Наконец, весь поток становился неустойчивым и турбулентным.

⁹⁷⁾ А. H. Gibson. Hydraulics and its application («Гидравлика и ее приложения»). London: Constable & Co. Ltd, 1908.

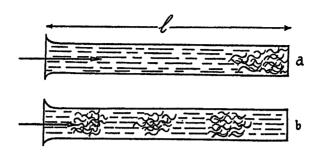


Рис. 62. Два вида течения: ламинарное и турбулентное.

Любое начальное возмущение воды способствует уменьшению скорости, при которой поток превращается из постоянного в турбулентный; эта скорость называется скоростью Рейнольдса или критической скоростью. Ниже и выше этой характерной скорости находятся нижняя критическая скорость и верхняя критическая скорость. Первая из них представляет момент, когда впервые замечается образование вихрей; вторая — момент, когда в первоначально турбулентном потоке вихри исчезают.

Определение нижней критической скорости оказалось недоступным экспериментальной технике Рейнольдса. Но он воспользовался тем фактом, что при критической скорости меняется закон напора, и определил требуемые значения, измеряя потери напора при различных скоростях течения в трубках разного диаметра. Изображая графиком зависимость между скоростью и потерей напора (рис. 63), можно обнаружить, что до некоторой скорости v_1 для любой трубки критические точки лежат на прямой, проходящей через начало координат. Между точками 1 и 2 находится промежуток скоростей, где экспериментальные точки расположены весьма неправильно, что указывает на общую неустойчивость, тогда как при больших скоростях эти точки лежат приблизительно на гладкой кривой, указывающей, что потеря напора, по-видимому, пропорциональна v^2 .

Рейнольдс пришел к выводу, что критическая скорость обратно пропорциональна диаметру трубки d и выражается формулой

$$v_{cr} = \frac{1}{b} \frac{P}{d},$$

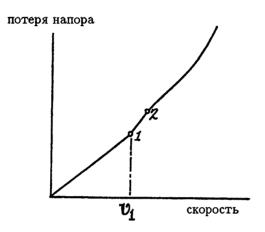


Рис. 63. Диаграмма Рейнольдса, показывающая скорости и потери напора.

где b — числовая постоянная, такая, что если длина трубки измеряется в метрах, то b=278 для нижней критической скорости и 43,8 для верхней. Если t — температура по Цельсию, то

$$P = \frac{1}{1 + 0,03368t + 0,000221t^2}.$$

Более общая формула для нижней критической скорости в прямолинейной трубке с параллельными стенками для любой жидкости и в любой системе единиц имеет вид

$$v_{cr} = \frac{2000\mu}{d\rho}.$$

Таким образом, Рейнольдс показал, что μ измеряет физическое свойство жидкости, не зависящее от ее движения. Он показал, что в потоках, протекающих в прямолинейных трубках с параллельными стенками, турбулентность не возникает, если произведение средней скорости на диаметр и на плотность массы жидкости, разделенное на абсолютный коэффициент вязкости, меньше определенного постоянного числа, т. е. если $(\rho vd/\mu) < 1400$.

Отношение в левой части этого неравенства известно как число Рейнольдса:

$$Re = \rho v d/\mu = \frac{v d}{\nu}.$$

Числа Рейнольдса сравнимы лишь в тех случаях, когда они относятся к геометрически подобным потокам; в этих случаях, предполагая, что все другие условия могут быть описаны шкалой скоростей и шкалой длин, потоки с равными числами Рейнольдса динамически подобны. Числа Рейнольдса весьма важны в различных областях механики текучих сред, так как результаты испытания моделей прямо сравнимы с результатами для полномасштабных тел той же геометрической формы, если значение Re для модели равно Re для полномасштабного прототипа.

Можно сказать, что Осборн Рейнольдс революционизировал все представление о течениях вязких жидкостей, ввел новые идеи и инженерные подходы в теорию смазки и, что важнее всего, проложил путь к современной теории пограничного слоя. Именно он выдвинул категорическое утверждение, что слой вязкой жидкости, непосредственно примыкающий к поверхности твердого тела, вследствие вязкого прилипания увлекается со скоростью тела; а это и было исходным пунктом теории пограничного слоя, созданной Прандтлем (Prandtl).

Михаил Ломоносов (1711-65) и другие

По тем или иным причинам многие выходящие на Западе книги по истории и философии науки и техники либо полностью игнорируют, либо преуменьшают роль, сыгранную русскими (здесь и везде в этой книге под «русскими» понимаются все народы Советского Союза). В виде примеров, хотя и необязательно самых поразительных, приведу следующие книги: Peне Дюга, «История механики» (René Dugas, A history of Mechanics, Édition du Griffon, Switzerland, 1955); Г. А. Ризон, «Путь к современной науке» (Н. А. Reason, The Road to Modern Science, G. Bell & Sons, London, 1947); сэр Джеймс Джинс, «Развитие физической науки» (Sir James Jeans, The Growth of Physical Science, Cambridge University, 1947); У. Рауз Болл, «Краткий очерк истории математики» (W. W. Rouse Ball, A Short Account of the History of Mathematics, Dover Publications, Inc., New York, 1960); Иоахим Лейтгезер, «Изобретатели

нашего мира» (Joachim Leithäser, Inventers of Our World, Weidenfeld and Nicolson, London, 1958)*). Неопытный читатель сможет заключить из этих книг, что русские мало что изобрели, мало что прибавили к знанию. Но поскольку Россия слишком уж большой предмет для всякого умаления, то надо признать, что пропуски — возможно, без дурных намерений — стали уже политическим вопросом, разделяющим Восток и Запад.

Ученый должен быть человеком, самостоятельно вырабатывающим свои суждения, на основании одних только фактов; он не должен руководствоваться видимостями, не должен иметь предпочтительных гипотез, принадлежать к какой-нибудь школе или доктрине какогонибудь учителя. Как сказал Майкл Фарадей, «его первой целью должна быть истина». И если посмотреть на русских с этой высокой точки зрения, то мы увидим их в ином свете, в значительно большем масштабе.

Прежде всего, не следует забывать, что гиганты механики сплошных сред, Даниил Бернулли и Леонард Эйлер, хотя и швейцарцы по рождению и образованию, жили и работали в России в качестве выдающихся членов Ст.-Петербургской академии наук. Поразительно, как мало людей на Западе отдает себе отчет, сколько пионерских теорий было развито в этой академии.

Обратимся теперь к Михаилу Васильевичу Ломоносову (1711–65), стопроцентно русскому, и притом одному из крупнейших мыслителей своего времени. Поэт и историк, физик и лингвист, химик и географ, изобретатель и прикладной ученый, он поистине может быть назван отцом научного просвещения в России. О его выдающемся вкладе в науку всегда были достаточные свидетельства⁹⁸⁾. В 1748 году он устроил химическую лабораторию, где, среди других проблем, изучал физическую природу вещества. Один из его фундаментальных выводов состоял в том, что деление вещества на все меньшие частицы возможно лишь до определенного предела, называемого «атомом». Конечно, это не было новым высказыванием: оно было известно с древности. Но Ломоносов

^{*)} Автор приводит данные об этих книгах популярного характера только в английских переводах. Русские переводы их отсутствуют. — Прим. перев.

⁹⁸⁾ Английскому читателю можно указать книгу Б. Н. Меншуткина «Ломоносов, сын России». (Автор ссылается на английский перевод 1952 года. — Примперев.)

провел весьма глубокое исследование физических и химических свойств этих «мельчайших частиц». Сущность этого исследования составляла гипотеза, что все вещества построены из элементарных частиц. В соответствии с этим взглядом все физические тела, в том числе текучие среды, состоят из чрезвычайно малых частиц вещества, которые нельзя физически разделить на меньшие части и которые способны примыкать друг к другу. В его терминологии они являются «нечувствительными частицами» в том смысле, что их нельзя непосредственно наблюдать в микроскоп или с помощью другого прибора.

Но Ломоносов подчеркивал, что «нечувствительная частица» остается материальным телом со всеми такими свойствами, как масса, вес, объем, цвет, вкус и т. д. Я не буду обсуждать здесь общее научнофилософское значение этой концепции, поскольку об этом была уже речь в главах, посвященных Аристотелю, Архимеду, Эйлеру, Леонардо да Винчи и другим, но я хотел бы отметить, что на ней основывается вся теория непрерывности в механике текучих сред. В дальнейшем мы увидим, что также и всеобщая непрерывность вещества-энергии была бы невозможна без такого основания.

Ломоносов провел фундаментальное исследование в области, впоследствии ставшей главой кинетической теории газов⁹⁹⁾. Сейчас мы знаем из учебников физики и термодинамики, что при сжатии и расширении текучих сред (газов) производится работа: именно это и писал Ломоносов. Мы знаем, что сжимаемость — одна из основных особенностей газов: но как раз это и доказал Ломоносов — теоретически и экспериментально. Конечно, я не хочу сказать, что в этой области не работали другие.

Почему газы нагреваются при сжатии и охлаждаются при расширении? — спрашивал Ломоносов, и дал ответ: потому что в первом случае расстояния между нечувствительными частицами становятся меньше, отчего возрастает число соударений, увеличивающее температуру газа; во втором же случае происходит обратное физическое явление. Что же касается движений частиц, — говорит он, — то они бывают трех типов: поступательные («прогрессивные»), вращательные и колебательные. Чем горячее газ, тем больше должно быть вращательное движение, тем сильнее частицы должны отталкивать друг

⁹⁹⁾ Собрание сочинений Ломоносова. М., 1934.

друга, и потому чем больше сжимаемость воздуха, тем больше давление. Обратно, — заключает он, — если бы газ был вовсе лишен тепловой энергии («огня»), то он был бы совершенно неподвижен — что повторяет аргументацию Вольтера.

Одна из работ Ломоносова особенно интересна и важна для целей этой книги. Он экспериментировал с бумажными змеями и анализировал причины ветров. В 1751 году он сконструировал и изготовил анемометр для определения силы ветра, а в 1754 году сконструировал и построил небольшую метеорологическую обсерваторию. Проблема была в том, как применить это оборудование на разных высотах. И тут Ломоносов проявил блестящую изобретательность. Вот что об этом сказано в протоколах Ст-Петербургской академии наук¹⁰⁰).

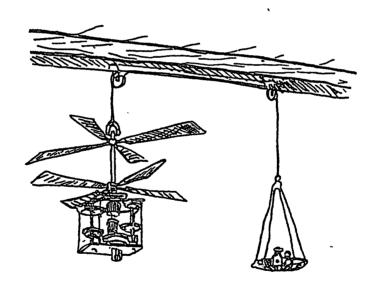


Рис. 64. Аэродинамическая машина Ломоносова.

«Почетный советник Ломоносов демонстрировал изобретенную им машину, названную им «аэродинамической машиной» (рис. 64), це-

¹⁰⁰⁾ Лев Гумилевский. Крылья родины. М., 1954.

лью которой является поднимать метеорологические приборы в верхние слои атмосферы, чтобы исследовать их условия и свойства. Как сообщил изобретатель, крылья машины должны вращаться горизонтально в противоположных направлениях пружиной наподобие часовой. Машина была подвешена к одному из концов бечевки, пропущенной через два блока, к другому же концу был подвешен уравновешивающий груз. Когда пружина заводилась, машина поднималась в высоту, выполняя тем самым желательное действие. По словам изобретателя это действие будет еще большим при более сильной пружине и большем расстоянии между вращающимися крыльями...».

А затем, вероятно, Ломоносов продолжал: «То, что Ваши превосходительства только что видели своими глазами, доказывает по крайней мере три вещи: (1) что воздух, которого мы не видим, достаточно реален, чтобы поддерживать крылья; (2) что проект и выполнение аэродинамической машины делают ее практически возможной; и (3) что прямое исследование верхних слоев атмосферы не является больше академической мечтой».

Историки авиации могут решить, был ли Ломоносов создателем первого вертолета и изобретателем пропеллеров противоположного вращения. Тем временем я познакомлю вас с русским профессором метеорологии Михаилом Александровичем Рыкачевым (1840–1919), кстати, работавшим некоторое время в Гринвичской обсерватории. В 1870 году он организовал первые в России полеты людей на воздушном шаре. В 1871 году он провел ряд экспериментов по определению аэродинамических характеристик подъемных пропеллеров. Более того, он спроектировал, построил и испытал машину, подобную вертолету, четыре крыла которой вращались (в горизонтальной плоскости) пружиной весом в 5,5 килограмм. И хотя этому нет документальных свидетельств, полагают также, что он знаком был с идеей автожира. Он говорил при этом своим современникам, что как бы ни были ценны эксперименты, сами по себе они никогда не сделают механику текучих сред такой наукой, какой она может и должна быть.

Еще одним великим деятелем мировой науки и техники был Дмитрий Иванович Менделеев (1834–1907), русский химик, создатель знаменитой периодической системы химических элементов.

Он был поклонником Жозефа Луи Гей-Люссака (Joseph Louis Gay-Lussac, 1778–1850), показавшего, как известно (в 1802 году), что раз-

личные газы расширяются с повышением температуры на равные величины. Двумя годами позже он поднялся на воздушном шаре вместе с другим французским физиком, Жаном Батистом Био (Jean Baptiste Biot), а впоследствии совершил еще ряд полетов в одиночку, в одном из которых он достиг высоты более трех километров. Без сомнения, это произвело на Менделеева не меньшее впечатление, чем закон Гей-Люссака.

Вертолет Ломоносова, опыты Рыкачева, попытки Гей-Люссака и других проникнуть в тайны атмосферы настолько пленили воображение Менделеева, что он вскоре стал прямым участником русской школы механики текучих сред. «Перспектива познать законы, управляющие состоянием атмосферы, и гордая идея аэродинамики овладели мною до такой степени, — писал он, — что я оставил на время все другие виды деятельности и начал изучать аэростатику». В 1887 году он лично поднялся на воздушном шаре на высоту более трех километров. «Это было захватывающее переживание, — писал он, — и я убежден теперь, что найден метод исследования атмосферы». Но чтобы сделать этот метод эффективным и безопасным, необходимо было изучить законы сопротивления воздуха.

Его личные достижения в этой области были многочисленны и значительны. Он изучал состояние газов в широком диапазоне давлений, теоретически и экспериментально изучал свойства верхних слоев атмосферы, гидростатику, сопротивление текучих сред и т. д. Его книга под названием О сопротивлении жидкостей и об аэронавтике (1880) сделала его одним из создателей механики текучих сред.

Русская школа научной мысли

Русские цари и их правительства, за исключением Петра Великого, измеряли величие своей обширной империи тысячами верст, а вовсе не научным и техническим развитием. Недостаточно развитые промышленность и торговля, очень низкий уровень грамотности, плохие средства связи и многое другое изолировали тысячи и тысячи талантливых людей от живой цивилизации. Было слишком мало школ и университетов.

И все же в России рождались гениальные люди. Не было лабораторий для экспериментальных исследований, но ничто не могло по

мешать выдающимся людям развивать превосходные теории. Один из крупнейших деятелей в истории механики текучих сред в России и в СССР — покойный профессор Владимир Петрович Ветчинкин (1888–1950), автор знаменитой книги о механике полета и большого числа оригинальных работ, сказал однажды нам, его студентам: «Англичанин может позволить себе строить; русские могут позволить себе только иметь теории. Француз может позволить себе проверять свои теории на опыте; русские не могут выйти за пределы своих теорий и самодельных моделей. Поэтому Россия и стала преимущественно страной теорий, а не теории и практики...».

И в самом деле, какую бы сторону жизни ни взять, русские имеют для нее теорию, и как правило хорошую теорию. Иногда мне кажется даже, что в развитии самых фундаментальных теорий прикладной математики, механики и механики текучих сред Россия приближается к Франции, и во всяком случае к Германии. Верно, конечно, что они слишком долго оставались неизвестными внешнему миру, вероятно, изза замкнутого характера русского общества, или из-за русского языка, или, может быть, из-за распространенного на Западе представления, будто русские и вообще всегда были в один метр ростом.

Когда в 1826 году молодой, еще никому не известный русский математик Михаил Васильевич Остроградский (1801-62) явился перед ученой аудиторией Парижской академии наук, чтобы доложить работу о теплопроводности, то (как рассказывал Д. П. Рябушинский) кто-то написал или высказался: «Русский? О теплопроводности? Что же он может знать о таком нерусском предмете?». Но в конце доклада кто-то другой произнес горячую речь, сказав, что Фурье начал эту теорию, Коши и Навье продолжили работу над ней, а Остроградский ее завершил. Когда работа Остроградского стала известна мыслящим людям мира, многие из них признали, что «даже в России» могут быть люди, сравнимые с Коши, Фурье и Навье. Вот некоторые из публикачий Остроградского: О моментах сил (1838), О мгновенных смещениях систем в непостоянных условиях (1838), О принципе возможных скоростей и моментов инерции (1842), Об общей теории столкновений (1857), Об интегралах общих уравнений динамики (1850), Дифференчиальные уравнения, связанные с изопериметрической задачей (1850), О движении сферического слоя в воздухе (1841), Курс лекций по небесной механике (1836)¹⁰¹⁾. Из современного дифференциального и ивтегрального исчисления мы знаем, что есть метод Остроградского интегрирования рациональных функций; и, конечно, мы знаем знаменитую, если не революционную, теорему Грина — Остроградского (или Остроградского — Грина), прекрасную в математическом отношения и фундаментально важную для механики текучих сред, согласно которой линейный интеграл по простой замкнутой кривой равен двойному интегралу по внутренней плоской области, ограниченной этой кривой. Эта теорема может быть обобщена в соотношение между двойным в тройным интегралом, показывающее, что если в некотором объеме пространства заданы дивергенция и ротор векторного поля, то этим поле определяется однозначно. Иначе говоря, если в некотором объеме заданы вместе дивергенция и ротор скорости потока текучей среды, а также заданы значения нормальной к границе компоненты скорости, то поле скоростей однозначно определено.

Далее, выдающимся русским деятелем в механике текучих сред был Николай Дмитриевич Брашман (1796–1866), профессор Московского университета. Он занимался молекулярной структурой жидкостей, устойчивостью плавающих тел, гидростатикой и связанными с этим проблемами.

Затем был Август Николаевич Давыдов (1823–85), также профессор Московского университета. В 1851 году он защитил диссертацию, посвященную теории капиллярных явлений, присоединившись тем самым к исследователям текучих сред. Он подробно описал условия равновесия тел, погруженных в жидкость, дал геометрическую иллюстрацию этих условий, изучил их математически и предложил практические рекомендации. Общее направление исследований Брашмана и Давыдова продолжили русские профессора А. С. Ершов (1818–67) («Водакак движущая сила»), И. И. Рахманинов (1826–97) («Теория вертикальных водяных колес»), И. В. Симов (1815–76) («Аналитическая теория волнового движения эфира») и многие другие.

Далее, был Дмитрий Константинович Бобылев (1842-1917), веро ятно, первый в России преподаватель механики текучих сред, человек, которому приписывается высказывание, что «никто не должен предпринимать экспериментальных исследований до тех пор, пока они ме

¹⁰¹⁾ А. Т. Григорян. Развитие механики в России. М., 1967.

темпребуются "основательной теорией"». Для специалистов по механике текучих сред может быть интересно, что он впервые в мире занимался теорией течения жидкости в спутной струе. Он не принимал на веру никаких утверждений. По словам профессора Б. Н. Юрьева, он говорил, что подлинный ученый знает только то, что он сам, лично подтвердил или опроверг.

Во второй половине девятнадцатого века Россия стала одной из ведущих стран в области теоретической механики. Имена Ф. А. Слудского, П. Л. Чебышева, А. М. Ляпунова, И. А. Вышнеградского, С. В. Ковалевской, Н. Е. Жуковского, В. А. Стеклова, Н. Ф. Петрова, Д. С. Тегижова*, В. Я. Цингера, Н. И. Лобачевского (1792–1856), И. С. Громеки (1851–89) и многих других, представляли теперь русскую школу мышления во всем ее теоретическом блеске, с ее выраженной склонностью к аналитическим методам и технике — то есть к теории¹⁰²⁾.

Типичным представителем этой школы был Александр Михайлович Ляпунов (1857–1918). Он был профессором механики в Ст.-Петербургском, Харьковском и Одесском университетах. В 1880 году он предпринял математическое исследование проблемы равновесия тяжелых тел в потоках тяжелых жидкостей и годом спустя опубликовал свою первую работу под этим именем 103. За ней последовала вторая публикация, под названием «О потенциале гидростатических давлений» (1881). В 1882 году он завершил свою магистерскую диссертацию под названием «Устойчивость эллипсоидальной формы равновесия вращающейся жидкости».

Хотя эти работы были всего лишь первыми шагами долгого пути, они произвели впечатление на современников в России и за рубежом оригинальностью и глубиной методов. Целый ряд дальнейших опубликованных им работ («Общая задача об устойчивости движения», 1892; «Устойчивость спиральных движений твердого тела в жидкости», 1888; «Устойчивость движения трех тел в жидкости», 1889) и

Эту фамилию переводчик не смог восстановить по латинской транскрипции Tehizhov. — Прим. перев.

¹⁰²⁾ Заинтересованные в этом предмете могут обратиться, например, к сборнику «Люди русской науки». М.: Наука, 1965.

¹⁰³⁾ А. М. Ляпунов. Избранные труды. М., 1948.

специальные лекции в Одесском университете сделали его имя ши роко известным во всем мире, потому что столь успешно изученная им область была весьма важна не только для механики текучих средно и для общей механики, баллистики, астрономии, теории механизмов и математики.

Теперь я хочу познакомить вас еще с одним ученым, о котором, как я уверен, вы никогда не слышали, кто все еще неизвестен даже большинству людей в СССР, но кто вскоре получит полное признание и благодарность в мире космической науки и техники: это Иван Всеволодович Мещерский (1859–1935). Я считаю для себя большой честью, что мне довелось встретиться со многими гигантами науки; среди них были Макс Планк, Людвиг Прандтль, Теодор фон Карман, Дмитрий Рябушинский, Сергей Чаплыгин, Константин Циолковский, Альберт Эйнштейн, Александр Котельников и Иван Мещерский.

Я утверждаю — не опасаясь возражений — что Мещерский, окончивший Ст.-Петербургский университет и аспирантуру у профессора Бобылева, бывший затем доцентом университета и после этого более тридцати лет профессором механики и прикладной механики Ст. Петербургского политехнического института, станет известен грядущим поколениям как отец аналитической динамики ракет. В самом деле, это он развил теоретическую механику тел переменной массы 104) — ту отрасль механики, без которой не было бы теоретической динамики ракет. Чтобы понять общее значение его результатов, вспомним, что автомобили, самолеты, ракеты, суда и другие машины, приводимые в движение всевозможными устройствами, потребляющими горючее, суть в действительности тела переменной массы, между $^{\text{тем}}$ как закон движения был выведен сэром Исааком Ньютоном для случая $m = \text{const}^*$). К этому надо прибавить, что труды Мещерского отличаются значительными математическими достоинствами.

 $^{^{104)}}$ И. В. Мещерский. Труды по механике тел переменной массы. М., 1952.

э) Здесь можно заметить, что первоначальная формулировка второго закона у самого Ньютона (производная от импульса тела равна действующей на него силе) остается справедливой и в случае переменной массы, если определить импульс как произведение массы на скорость. Возможно, у Ньютона были причины не выносить в своей формулировке массу за знак производной. Прим. перев.

Константин Циолковский (1857-1935)

Теперь мы обратимся к Константину Эдуардовичу Циолковскому, одному из самых поразительных деятелей в истории и философии науки и техники, признанному «отцу ракетной техники», великому русскому ученому, знаменитому и в СССР, и за границей. В ходе своих оригинальных исследований он не только предсказал развитие реактивной авиации и ракет дальнего действия, но также теоретически подтвердил их осуществимость. Кроме того, он был весьма озабочен проблемами сооружения металлических дирижаблей и был пионером в области экспериментальной аэродинамики. В 1897 году этот провинциальный учитель-самоучка построил в Калуге одну из первых в мире аэродинамическую трубу (рис. 65) и в течение пяти лет систематически использовал ее для изучения моделей аэродинамических профилей, дирижаблей, различных геометрических форм 105) и т. д. Искусство анализа и теоретических рассуждений позволили Циолковскому вывести ряд важных законов аэродинамики.

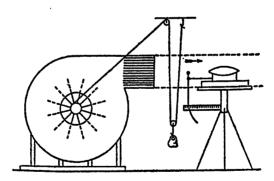


Рис. 65. Аэродинамическая труба Циолковского.

В своей книге «Аэроплан, или Птицеподобная летательная машина», опубликованной в 1894 году, Циолковский предложил первую аэродинамическую конфигурацию аэроплана (рис. 66); это моноплан с

¹⁰⁵⁾ Собрание трудов К. Э. Циолковского. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1951. (Автор ссылается также на английский перевод, NASA TTF-236. — Прим. перев.).

прямолинейными крыльями без креплений, с колесным шасси для приземления и с коаксиальным вращением пропеллера. Вообще, проблемы аэродинамики сильно интересовали его в течение всей его многосторонней жизни. Его первая работа, связанная с аэродинамикой, была опубликована в 1885 году («Теоретические и практические аспекты аэростата, продольного в горизонтальном направлении»), а последняя в 1934 году («Давление на плоскость в нормальном потоке»).

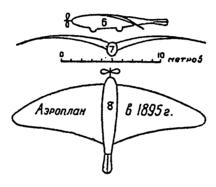


Рис. 66. Аэроплан Циолковского.

Для Циолковского аэродинамика представляла не только теоретический интерес. Он отчетливо понимал, что без надежных знаний о сопротивлении среды невозможен никакой прогресс в аэронавтике. В своей собственной работе он всегда подвергал теоретические результаты экспериментальной проверке. Каждый раз, когда он выдвигал некоторое предположение, он всегда делал оговорку, что это предположение и все выводы из него справедливы лишь в той мере, в какой они могут быть оправданы экспериментами, — и сам он был неутомимый экспериментатор. Он никогда не оставлял свои экспериментальные результаты в виде случайного скопления фактов; он всегда искал и с поразительной интуицией неизменно находил общие теоретические соотношения между наблюдаемыми величинами.

В 1890/91 годах Циолковский написал работу «О проблеме поле^{та} с помощью крыльев», где применил совершенно оригинальные методы

изучения давления воздуха на плоскую пластину. Интересно заметить, что в кинематическом и динамическом отношениях эта работа была подобна уже рассмотренной теории соударения Ньютона — Эйлера. Но Циолковский не имел обыкновения слепо повторять чьи-нибудь идеи. Более того, эта работа свидетельствует о том, что он пришел к своим идеям совершенно независимо, типичным для него путем. Подобно Ньютону и Эйлеру, он пришел к выводу, что сопротивление текучей среды плоской пластине пропорционально квадрату синуса угла атаки и, при равных прочих условиях, квадратному корню из относительного удлинения пластины. Этот замечательный закон примерно на сорок лет опередил развитие теории аэродинамических профилей.

Для экспериментальной проверки своих теоретических концепций Циолковский изобрел простое устройство — пару крыльев, смонтированную на валу, способном в течение некоторого времени вращаться с помощью пружины, разматывающейся под действием груза. Измеряя этот груз и количество движения крыльев вверх, в направлении их оси вращения, Циолковский приближенно определял подъемную силу и лобовое сопротивление крыльев. Как писал великий ученый Н. Е. Жуковский, «с экономным использованием анализа и простой аппаратурой, Циолковский приходит большей частью к правильным результатам. Его оригинальный метод исследования, рассуждения и остроумные эксперименты не лишены интереса и, во всяком случае, характеризуют его как талантливого исследователя».

Циолковский изучал механику и аэромеханику птичьего полета. Но, как он писал, человек никогда не сможет летать «одной только силой своих мускулов», потому что «подражать птицам технически очень трудно из-за сложности движений крыльев и хвоста и столь же сложной координации их движений». «Поэтому, — писал он, — я предлагаю летательную машину в виде жесткой, парящей птицы, с двумя пропеллерами впереди, вращающимися в противоположных направлениях развивающими тягу... В такой машине роль мускулов будет играть двигатель внутреннего сгорания... Вместо птичьего хвоста будет двоякая поверхность, одна для вертикального, другая для горизонтального управления...». Затем он анализирует характеристики взлета и посадки машины и предлагает, вероятно, впервые в истории авиации, метод анализа эксплуатации: требуемой скорости, мощности двига-

теля и т. д.

В 1894 году Циолковский спроектировал еще одно экспериментальное аэродинамическое устройство для изучения сравнительных харак. теристик лобового сопротивления тел различной конфигурации. Это был вращающийся рукав с прикрепленной на конце испытываемой моделью. Но вскоре он обнаружил, что такое устройство и ему подобные его не удовлетворяют, и пришел к выводу, что вместо движения моделей в неподвижном воздухе надо заставлять воздух двигаться мимо неподвижных моделей. Отсюда возникла его идея аэродинамической трубы (см. рис. 65). Вот что он об этом писал: «В последнее время, производя некоторые опыты, я пришел к мысли применить совершенно новый метод, использующий искусственный ветер (создаваемый вентилятором)... До сих пор я экспериментировал лишь с моделью длиной в 42 см. Опыты подтвердили наши формулы, и коэффициенты лобового сопротивления, которые я получил для этой модели, постепенно убывали при возрастании скорости искусственного воздушного потока. Новый метод позволяет проводить исследования в любое время со значительной точностью; он также очень удобен для целей демонстрации».

В 1898 году Циолковский опубликовал статью под названием «Давление воздуха на поверхности в искусственном воздушном потоке» 106), которую можно считать подлинным началом экспериментальной аэродинамики в смысле определения, приведенного в начале этой книги. В конце статьи он пишет, что правильная формулировка законов аэродинамического сопротивления очень важна, но не может быть достигнута без экспериментов. «Эксперименты внесли огромный вклад в теорию аэростата и аэроплана; вряд ли есть такая отрасль науки и техники, где не играли бы роль законы сопротивления среды. И это подчеркивает, — заключает он, — важность экспериментов в механике текучих сред».

В 1899 году М. А. Рыкачев, который и сам был выдающимся аэродинамиком, сообщил Академии, что эксперименты Циолковского были «больше, чем просто эксперименты», поскольку они опирались на «прочные теоретические основания». «Несмотря на примитивность его самодельной аэродинамической трубы, — говорит Рыкачев, — Циол-

¹⁰⁶⁾ Собрание сочинений. М.: 1951. Т. 1. См. также его Избранные труды. М.: Мир, 1968. (Есть английский перевод).

ковский развил экспериментальную аэродинамику до уровня серьезной отрасли знания. Поэтому желательно дать ему возможность продолжить его эксперименты в более широком масштабе, с лучшими измерительными инструментами». И хотя Академия весьма гордилась своей традицией, ставившей на первое место теорию, и многие ее влиятельные члены полагали, что экспериментальное накопление знаний граничит с интеллектуальной пошлостью, рекомендации Рыкачева были приняты, и Циолковскому предоставили возможность продолжить его пионерские исследования. В 1900 году он сконструировал и построил новую аэродинамическую трубу и связанные с ней измерительные устройства. Он еще раз продемонстрировал на деле, что был выдающимся создателем экспериментальной аэродинамики в России.

Но еще более важны были его работы в области ракет.

Я имел честь познакомиться с ним в 1932-35 годах, знать его и учиться у него; я горжусь тем, что был одним из его последователей в ракетном деле; кажется, я прочел каждое слово, изучил каждую формулу и чертеж, опубликованные им. Поэтому я позволю себе описать Циолковского как одного из величайших эмпириков-изобретателей в истории аэронавтики и астронавтики, причем с самым скромным формальным образованием.

Николай Егорович Жуковский (1847-1921)

Профессор Жуковский, официальный «отец русской авиации», был виднейшим деятелем, совсем иного академического положения и с иным уровнем образования. Циолковский был простым учителем провинциальной школы; Жуковский был выдающимся профессором механики в выдающемся высшем учебном заведении. Первому из них недоставало теоретических знаний, второй был одним из блестящих создателей этих знаний.

В 1868 году Жуковский окончил физико-математический факультет Московского университета*).

в подлиннике «факультет математики и механики», что не соответствует названию этого факультета в то время. Отдельный физический факультет был создан значительно позже, уже после революции. — Прим. перев.

В течение следующих двух лет он продолжил свое образование в Ст.-Петербургском институте путей сообщения. В 1870-72 годах он преподавал физику в гимназии. В 1872 году он начал преподавать математику в Московском высшем техническом училище (МВТУ), в 1874 году стал доцентом аналитической механики Московского университета. Начиная с этого времени он постоянно и успешно, год за годом повышал свое академическое положение, приобретая все большую известность на родине и за рубежом.

Вряд ли можно указать отрасль механики, оставшуюся вне его поля интересов. Поэтому я ограничусь описанием его роли в механике текучих сред. Его первой работой в этой области была магистерская диссертация «Кинематика жидкого тела» (Московский университет, 1876). Он дал в ней прекрасную разработку геометрических и физических характеристик идеального течения жидкости, придавшую более полный смысл представлению о «движении частицы жидкости». Затем последовал ряд статей по теоретической механике твердого тела¹⁰⁷⁾ в различных случаях, таких как столкновение двух тел (1885), теория гироскопа (1895), теория маятника (1895), теория вращения твердого тела (1892), устойчивость движения (1882), движение тела, содержащего жидкость (1885), и т. д.

24 апреля 1881 года Жуковский прочел публичную лекцию о проблеме аэростата (воздушного шара); 12 февраля 1882 года он сделал в Физико-математическом обществе доклад о «Машине для решения уравнений», а 30 апреля того же года — доклад о «Реакции жидкостей». 4 февраля 1883 года он прочел перед другой аудиторией лекцию об определении орбит планет и комет, а с 18 по 28 апреля — еще три лекции в Одессе: «Колебания плавающих тел», «Столкновение двух сфер, одна их которых плавает на поверхности воды» и «Метод решения главного уравнения движения планет». 27 декабря 1884 года Жуковский выступает перед Математическим обществом с новым сюжетом: «О роли поверхности тела, движущегося в жидкости, в формировании сопротивления жидкой среды». 10 января 1886 года Жуковский выступает в Математическом обществе при Московском университете с докладом «О скорости звука» — в текучих средах и особенно в воздухе. В июне того же года его избирают профессором механики

¹⁰⁷⁾ Собрание сочинений. Н. Е. Жуковский, тт. I-VII, М., 1948-50.

университета.

Жуковский становится в подлинном смысле Лагранжем России. Его научная репутация поднимается очень высоко. Но, как показало дальнейшее, это было лишь начало его славы. Работы по механике подземных потоков; по кинематике и динамике вихревых колец; об основах теории полета (1890); о теории течений Гельмгольца; о модификации метода Кирхгофа определения двумерных течений жидкости; об исследованиях Отто Лилиенталя 108) о парящем полете птиц; о сопротивлении жидкости движению кораблей; о новом методе изучения движения тел в воде; и так далее, и тому подобное. Все это сделало Н. Е. Жуковского около 1900-го года не только одним из самых продуктивных исследователей в истории механики текучих сред, но и одним из самых оригинальных и эффективных ее строителей — во всяком случае, в России.

Однако в книге, предлагаемой читателю, надо выделить основной вклад автора, определяющий его место в истории. Торричелли известен главным образом по закону Торричелли, Бернулли по закону Бернулли, Эйлер по эйлеровым уравнениям движения, Ньютон по его законам движения, Лагранж по его интегралу Лагранжа, Даламбер по его парадоксу Даламбера, Рейнольдс по его числу Рейнольдса и т. д. Каковы же главные вклады Жуковского, ставящие его в передний ряд отцов механики текучих сред?

Есть несколько таких вкладов: конформное преобразование Жуковского, аэродинамические профили Жуковского, гипотеза Жуковского и т. д. Поток вокруг любого заданного профиля может быть описан надлежащим комплексным потенциалом $\xi(z)$; простейший аэродинамический профиль — это профиль Жуковского, получаемый из кругового потока с помощью единственного конформного преобразования; главным средством была формула преобразования Жуковского $\xi = z + a^2/z$. А именно, подставляя эту формулу в выражение потока по кругу радиуса несколько большего a, расположенного таким образом, что окружность проходит через точку $\xi = a$ (рис. 67), мы получаем конфигурацию аэродинамического профиля. Если, кроме того, поме-

¹⁰⁸⁾ Отто Лилиенталь (Otto Lilienthal, 1848-1896), немецкий инженер-аэронавт, изучал полет птиц и строил планеры, на которых доказывал преимущества крыльев с криволинейными поверхностями над плоскими крыльями. Друг Жуковского. Погиб во время полета.

стить центр большего круга на оси $O\xi$, то возникающий в результате преобразования профиль будет симметричен. Затем, меняя параметр цилиндров, можно получить профили разной конфигурации.

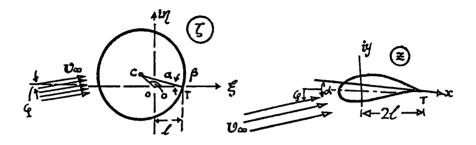


Рис. 67. Конформное преобразование круга в аэродинамический профиль.

При всех этих преобразованиях задняя кромка аэродинамического профиля оказывается точкой резкой аналитической особенности. Это математическое осложнение было разрешено так называемым условием Кутта — Жуковского, или гипотезой Жуковского, утверждающей, что критические точки преобразования должны соответствовать точкам застоя потока в плоскости круга.

Однако эти результаты, как и другие, вытекают из более фундаментальной теоремы Кутта — Жуковского. Немецкий математик Вильгельм Кутта (Wilhelm Kutta, 1867–1944) заинтересовался механикой текучих сред в связи с идеей Отто Лилиенталя, что крылья с искривленными поверхностями лучше плоских. Кутта стремился разработать математическое обоснование этого утверждения и пришел к упомянутой теореме¹⁰⁹).

Жуковский пришел к тому же результату другим путем. А именно, уже в 1890 году он предпринял теоретическое исследование полета, а в 1898 году попытался распространить свои выводы на «крылатые пропеллеры», что означало в его терминологии маховые крылья. Построение формы течения вокруг стационарных крыльев было намного

¹⁰⁹⁾ Auftriebskräfte in strömenden Flüssigkeiten. Kutta, M.W., Illustrierte Aeronautische Mitteilungen, N1.6, 1902. Aerodynamik, von R.Fuchs, L.Hopf, Fr.Seewald, Vols. I and II, Berlin: 1935.

проще, чем вокруг маховых крыльев. Но великий ученый не убоялся трудностей. Он сделал множество набросков на бумаге, приготовил свои математические средства и — что особенно интересно — играл с полосками бумаги (например, размером в 8×1 см). Если попросту уронить такую полоску немного выше вашего лица, то вы увидите, как она парит в воздухе, отказываясь падать по вертикали. Многие современники Жуковского полагали, что этот простой опыт сыграл едва ли не решающую роль в открытии самого основного закона авиации, теоремы Жуковского, или теоремы Кутта — Жуковского,

$$L = \rho v_{\infty} \Gamma$$

которая формулируется следующим образом: когда вихрь (или эквивалентное ему вращающееся тело) с циркуляцией Γ движется в однородной текучей среде плотности ρ со скоростью v_{∞} , то оно производит силу $\rho v_{\infty}\Gamma$ на единицу длины, перпендикулярную направлению v_{∞} и оси вихря.

Фредерик Ланчестер (Frederick Lanchester, 1878–1946) и другие

Как показал Гельмгольц, если в потоке нет начального завихрения, то оно может быть создано трением или острым краем тела. В последнем случае между двумя течениями, встречающимися позади тела, может образоваться разрыв потока. Этот разрыв можно рассматривать как непрерывный слой малых вихрей за задней кромкой крыла.

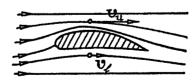


Рис. 68. Течение за аэродинамическим профилем.

Между тем, Кутта и Жуковский изучали идеальные жидкости, предполагая, что течения встречаются на задней кромке с одной и той же скоростью, вследствие чего нахождение циркуляции Γ сводится к

простым математическим операциям. Однако из их анализа следует, и эксперименты это подтверждают, что $v_l < v_u$ (рис. 68). Предположим, например, что $v_u = 3v_l$. Если вычесть из обеих величин $2v_l$, то получим: $v_u - 2v_l = 3v_l - 2v_l = +v_l$ на верхней стороне, и $v_l - 2v_l = -v_l$ на нижней стороне. Если выполнить подобные операции для некоторого числа других пар точек, а затем отложить на рисунке полученные результаты с их знаками, то получится картина, изображенная стрелками на рис. 69.

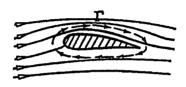


Рис. 69. Кинематический механизм образования циркуляции вокруг аэродинамического профиля.

Как показывает теория конформного преобразования Жуковского, когда течение с циркуляцией вокруг кругового вихря преобразуется в течение за аэродинамическим профилем, циркуляция остается неизменной. Поэтому для удобства анализа Жуковский допустил, что профильможно заменить кругом, а крыло круговым цилиндром (длинным вихрем). Последний известен под именем ограниченного вихря Жуковского — ограниченного в том смысле, что это воображаемый вихрынаходящийся внутри крыла и не выходящий за его пределы (рис. 70). Но крыло самолета никак не может быть бесконечно длинным, а потому и ограниченный вихры должен иметь ограниченную длину, или размах; а это противоречит теореме Гельмгольца, согласно которой вихры не может начинаться или кончаться в текучей среде, а имеет концы на стенах или образует замкнутую петлю, или простирается в бесконечность.

Как же преодолеть эту трудность? Я не сомневаюсь в том, $^{\rm 4TO}$ Н. Е. Жуковский первый заметил, что его ограниченный вихрь искривляется на концах крыльев и превращается таким образом в $^{\rm II}$ - образную (или подковообразную) систему вихрей (рис. 71). Ведь $^{\rm 3TO}$ он дал нам семейство профилей Жуковского; это он разработал мате-



Рис. 70. Ограниченный вихрь.

матические методы нахождения подъемной силы крыла; это он первый (в России) читал лекции о проектировании самолетов и о механике полета; и это он первый выработал знаменитую вихревую теорию пропеллеров.



Puc. 71. П-образный вихрь.

Теперь я должен рассказать об английском инженере Фредерике В. Ланчестере (1878–1946), который независимо от других вывел из теоремы Гельмгольца, что ограниченный вихрь действительно продолжается за концами крыла конечного размаха в виде свободных вихрей — свободных в том смысле, что они не расположены внутри крыла, как это изображено на рис. 72. Это был выдающийся вклад в аэродинамическую теорию крыла. Он не только выяснил очень трудный вопрос,

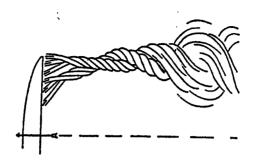


Рис. 72. «Свободный вихрь» Ланчестера.

но и открыл путь к целому ряду дальнейших задач и решений.

Здесь, может быть, следует упомянуть, что в связи с работой под названием «Аэродинамические характеристики крыла с подвижной поверхностью» (опубликованной Военно-воздушной академией имени Жуковского в 1942 году) я также выполнил в 1937-41 годах общирный ряд экспериментов о механизме образования свободных вихрей Ланчестера, что привело к следующему объяснению (1938): поскольку давление под крылом (или цилиндром) выше, чем над ним, массы воздуха стремятся пройти вверх через все края крыла. Но они не могут пройти через переднюю и заднюю кромки, потому что встречный поток относит их назад по течению. То же происходит с массами воздуха, пытающимися пройти вверх через концы крыльев; но в этом случае происходит нечто иное, а именно, массы воздуха не только вынуждаются изменить направление своего движения, не только отбрасываются назад по течению, но вдобавок переплетаются между собой наподобие прядей мотка шерсти. Это вполне понятно, поскольку эти усы на концах — не что иное, как части одного и того же ограниченного вихря; последний расположен внутри крыла и с теоретической точки зрения заменяет крыло, между тем как вихри на концах суть продолжения ограниченного вихря за пределы крыла и простираются до бесконечности, удовлетворяя, таким образом, условию Гельмгольца. Кинематический механизм образования вихрей на концах крыла изображен на рис. 73 и 74.

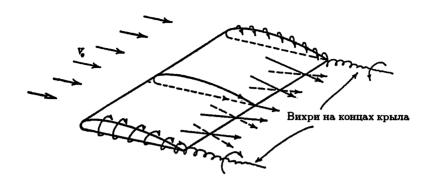


Рис. 73. Механизм образования П-образного вихря.

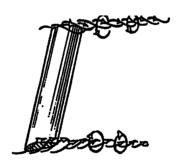


Рис. 74. Вихревые «усы» на концах крыльев.

Можно усомниться, подходит ли в этом случае слово «свободные», поскольку в действительности вихри не свободны, а вызываются и формируются условиями потока на концах и в этом смысле не отделены от них. Но как бы их ни называть, факт их существования стал известен уже давно и может быть продемонстрирован и визуально, и количественно. На вклейке 3 показаны вихри на концах крыла и вихревой слой за крылом летящего самолета, воспроизведенные из «Аэродинамики» Теодора фон Кармана. Это фотография самолета, летящего над

лесом и выпускающего из своих задних кромок инсектицид. Свободные вихри видны вполье отчетливо, и сразу же за всем крылом между вихрями на концах есть целая полоса более слабых вихрей — непрерывный вихревой слой.

Теория несущей линии Прандтля— Ланчестера

Я показал, каким образом была, наконец, установлена основная схема ограниченного вихря и вихрей на концах; следующий вопрос был, как перейти от этой схемы и от теоремы Кутта — Жуковского к развитию практических методов аэродинамической оценки самолетного крыла конечного размаха. Эта проблема рассматривалась рядом теоретиков¹¹⁰, но все они в конечном счете пришли к одному в тому же методу: крыло заменяется вихревой прямой; циркуляция вокруг крыла, связанная с подъемной силой, заменяется вихревой нитью вдоль вихревой прямой; в каждом месте вдоль крыла сила вихря полагается пропорциональной местной интенсивности подъемной силы; изменение силы вихрей на протяжении размаха крыла предполагается равной происходящим от суперпозиции некоторого числа П-образных (или подковообразных) вихрей (рис. 75).

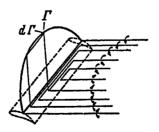


Рис. 75. Основная схема теории крыла конечного размаха.

¹¹⁰⁾ L. Prandtl. Applications of modern hydrodynamics to aeronautics. («Применения современной аэродинамики к воздухоплаванию»). NACA Rep.116, 1921. С. А. Чаплыгин. Собрание сочинений. М., 1933 (и другие).

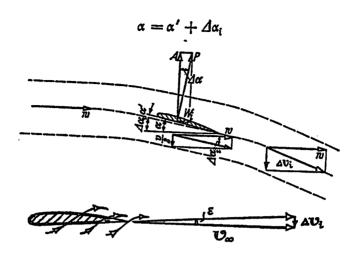


Рис. 76. Угол скоса потока и скорость.

Очевидно, интенсивность каждого вихря за задней кромкой данного крыла зависит от расстояния от конца крыла или, что то же, от вихря на конце. Это значит, что ε и Λv_i (рис. 76) также зависят от того же расстояния (единственная форма крыла, производящая постоянное вдоль размаха крыла значение Δv_i , это крыло с эллиптической плоской проекцией). Очень важно знать значения E и Δv_i в каждом поперечном сечении крыла. Решение этой чрезвычайно сложной задачи было получено задолго до того, как стало что-нибудь известно о скосе потока, и притом людьми, не имевшими отношения к механике текучих сред. Один из них был Феликс Савар (Felix Savart, 1791-1841), бывший учителем в Париже, а потом возглавивший физический кабинет в Коллеж де Φ ранс, тот самый, кто доказал, что волны распространяются в воде ^{Тем} же способом, как и в твердых телах. Другой был Жан Батист Био (Jean Baptiste Biot, 1774-1862), выдающийся французский математик, физик и астроном. Одно из их многих математических уравнений было приспособлено к обсуждаемой здесь проблеме и получило название за-^{кон}а Био — Савара,

$$dv_i = \frac{\Gamma}{4\pi r^2} \sin\theta \, dl.$$

Так вот, поскольку скос потока означает попросту, что массы воз. духа выталкиваются вниз, то есть им сообщается некоторый момент направленный вниз, то должна быть сила, действующая в противо положном направлении — то есть вверх; иначе говоря, скос потока от крыла создает подъемную силу. Это заключение было важно в несколь ких отношениях. Во-первых, для создания и поддержания скоса потока требуется определенное количество кинетической энергии (а следова. тельно, работы). Во-вторых, как видно из формулы Био — Савара это количество энергии меняется вдоль крыла: чем дальше от концов. тем оно меньше; а это значит, как указал Ланчестер, что чем больше размах крыла (или, в аэродинамической терминологии, — относительное удлинение крыла), тем меньше скос потока и, следовательно, тем меньше энергии требуется для «выталкивания вниз» воздушных масс, откуда вытекает знаменитое заключение, что крыло с бесконечно большим относительным удлинением не имеет вообще никакого скоса потока.

Немец Людвиг Прандтль (Ludwig Prandtl, 1875—1953) работал в том же направлении, что Кутта, Жуковский, Ланчестер и другие. Но он убедился, что простая схема подковообразного вихря не всегда дает результаты, вполне удовлетворительные для практических целей. Поэтому он ввел некоторые добавочные идеи¹¹¹, оказавшиеся весьма ценными. Вихревой слой, о котором я упомянул ранее, есть и в самом деле нормальное, естественное следствие ограниченного вихря Жуковского и свободных вихрей Ланчестера. Но его кинематические детали были разработаны рядом исследователей, например, С. А. Чаплыгиным¹¹², Финстервальдером¹¹³), Ланчестером, Глауэртом (Glauert) и другими. Работа Прандтля считается, однако, удовлетворительным конечным итогом всех этих результатов, главным образом вследствие ее математической простоты и ясности, и впоследствии стала известна полименем теории несущей линии Прандтля — Ланчестера.

Сущность этой теории можно описать следующим образом. Ско-

¹¹¹⁾ Ergebnisse und Ziele der Göttinger Modellversuchanstalt. L.Prandtl, Z.F.M., No. 1913. Cm. также Tragflügeltheorie I, II, Göttinger Nachrichten: 1918.

¹¹²⁾ Результаты теоретических исследований движения аэропланов (1910), Собрание сочинений. М., 1948. Т. II. С. 230-245,

¹¹³⁾ Z.F.M., 1910. N 1, 2.

рость в любой точке пространства между вихрями на концах получается из векторной суммы составляющих скоростей, происходящих от каждой из трех нитей подковообразного вихря. Распределение подъемной силы вдоль крыла представляется некоторым числом идущих вдоль крыла полос постоянной подъемной силы на единицу размаха крыла, каждая с соответствующим подковообразным вихрем. По мере увеличения числа полос подлинное распределение подъемной силы представляется все более точно, а число подковообразных вихрей возрастает. В пределе система становится слоем из сбегающих вихрей. Влияние каждого ограниченного и сбегающего вихря этой системы вносит свой вклад в результирующий вектор скорости в каждой точке пространства, согласно формуле Био — Савара. Определение поля скоростей дает возможность найти также так называемые индуктивный угол, индуктивное сопротивление и другие связанные с ним величины.

Одна из лучших книг, когда-либо опубликованных по аэродинамической теории крыла конечного относительного удлинения, охватывающая все эти методы и приемы, носит название «Индуктивное сопротивление крыла», Москва, 1926; ее автор — Б. Н. Юрьев.

Важный вклад в эту теорию сделал Г. Глауэрт (G. Glauert) из Кембриджа. В книге под названием The Elements of Aerofoil and Airscrew theory («Элементы теории аэродинамических профилей и воздушных винтов») (1926) он применил ряды Фурье к решению задачи о линейности кривых подъема и развил методы решения для крыльев любой плоской проекции и кривизны. Эти методы были использованы в дальнейшем Реймондом Андерсоном (Raymond Anderson), Робертом Джонсом (Robert Jones), В. В. Голубевым (см. его «Теорию крыла аэроплана конечного размаха», ЦАГИ, отчет N 108. 1931), Барбарой Фукс (Вагbara Fuchs), В. Рихтером (W. Richter), Бетцом (Вetz), Максом Мунком (Мах Мunk) и другими, так что проблема крыла конечного размаха была разрешена удовлетворительно и окончательно.

Рули Флеттнера

История механики текучих сред страдала бы досадной неполнотой, если бы она не включала биографию и историю Антона Флеттнера (Anton Flettner). С ранней юности он занимался всевозможными изобретениями. Неудивительно, что вскоре он стал сотрудничать с другим

великим немецким изобретателем, графом Цеппелином. Флеттнер c_{7a_1} известен в своей стране и за границей летом 1915 года, когда в $E_{p_{\Pi NR}}$ появился странный, неуклюжий механизм: танк, способный двигаться без экипажа в любом направлении. Вся программа маневров танка ва правлялась ему из неизвестного места на расстоянии. Началась a_{3p_4} телеуправления.

Этот успех произвел такое впечатление, что вскоре Флеттнер был принят в штат научного отдела Люфтваффе*). С этого времени он стал непосредственно участвовать во многих разработках по аэродинамик и гидродинамике. Прежде всего, он предложил управлять большой поверхностью корабельного руля при помощи вспомогательного руля Введению и пониманию физических оснований работы вспомогательного руля препятствовало то обстоятельство, что в технических кру. гах у большинства морских инженеров существовало ошибочное представление о силах, действующих на руль. Они полагали, что руль положенный влево или вправо, испытывает давление потока, так сказать, со стороны, обращенной к потоку: это обычная ньютонова теория столкновения. Флеттнеру пришлось доказывать, что вдобавок к давж нию от столкновения с лицевой стороны с противоположной сторожы существует область относительно низкого давления, так что эффективность руля почти полностью определяется разностью давлений в обекх областях.

Иначе реагировала все еще молодая авиационная промышленность. Стремясь к быстрому развитию, она нуждалась в новых идеях и смелых решениях. Конструкторы самолетов понимали, что воздушные потоки вращали ветряные мельницы еще в Египте, что обыкновенный ветер способен вырывать с корнем могучие деревья и разрушать строения; но они отдавали себе отчет в том, что люди далеко еще не научились их использовать. Они знали, что ничто не ново под луной, но знали по, что тайны природы скрыты в ее тайниках, где человеку приходится их искать. Короче говоря, аэродинамики приняли идею Флеттнера оруле столь серьезно, что морским специалистам пришлось последовать их примеру.

Таким образом, идеи и изобретения Флеттнера заняли свое ${\sf мес^{TO}}$ в механике текучих сред. Как он писал, мы имеем дело почти иск ${\sf п}^{D^*}$

^{*)} Воздушные силы (нем.) — Прим. перев.

чительно с поверхностями, находящимися под давлением потока¹¹⁴). На вклейке 4 изображено, каким образом поток огибает пластину, перпендикулярную его направлению. Можно заметить, как разделяются
пиния тока и за пластиной возникают вихревые области. Непосредственно перед пластиной возникает определенное давление (Standdruck)*). Впереди образуется высокое давление, сзади — низкое давление (всасывание): таким образом, сопротивление, испытываемое пластиной, на
пве трети связано с давлением и на одну треть со всасыванием.

На вклейке 5 та же пластина наклонена к потоку. Теперь условия не симметричны. Разделение происходит на переднем крае пластины. Все происходит иначе. Центр давления теперь близок к перепнему краю. Изменение угла атаки привело к изменению спектра обтекания и к смещению центра давления. Флеттнер задался вопросом, как использовать эти факты и явления. Он никак не мог остаться к этому равнодушным. Беспокойный ум изобретателя, стремившийся исследовать, экспериментировать, проектировать и испытывать, опирался на превосходное знание основных законов механики текучих сред. В ряде случаев он искал ответы в истории науки и техники. Его работы доказывают, что он весьма серьезно изучал историю механики текучих сред. Как он писал, с доисторических времен человек пытался использовать силу потоков. Но даже ветряная мельница до нашего времени не вышла за пределы старых ветряных мельниц Голландии, между тем как водяное колесо превратилось в современную турбину. С другой стороны, судостроение развивалось очень медленно, тогда как развитие аэроплана шло очень быстро. И так далее, и тому подобное. Откуда происходят такие контрасты? Флеттнер объясняет их тем, что в некоторых областях люди прилагали больше усилий, чем в других. «А следовательно, — продолжает он, — есть все основания для оптимизма: в мире потоков достаточно сокровищ для упорного искателя».

Поток, огибающий тело, теряет часть своей энергии, поскольку конфигурация тела вынуждает его частицы отклоняться от их свободных траекторий, причем они теряют энергию своего движения. Со-

Anton Flettner. Mein Weg zum Rotor (The Story of the Rotor) («Мой путь к ротору (история ротора)»). Англыйский перевод и издание F. O. Willhoff. New York, 1926.

^{•)} Стапионарное давление (нем.). — Прим. перев.

гласно Флеттнеру эта потерянная энергия «действует на тело как сопротивление среды, и чтобы уравновесить это сопротивление, то есть
сопротивление воздуха, необходима энергия двигателя». Отсюда он 3aключает, что любой проект, связанный с текучей средой, может быть
экономным лишь в том случае, если он предусматривает конфигурацию, как можно меньше нарушающую движение частиц этой среды.

Далее, Флеттнер замечает в виде примера, что сопротивление воздуха движению тела зависит не только от размеров тела, но и от его конфигурации. «Вполне возможно, — говорит он, — что два воздушных корабля, имеющие в точности одно и то же вытеснение воздуха, могут иметь различное сопротивление при одной и той же скорости потока, откуда видно, что проектирование воздушных кораблей требует специальных исследований для создания обтекаемых форм минимального сопротивления, то есть форм, наименее возмущающих поток».

Но, как отмечает Флеттнер, это еще не все. В формировании сопротивления воздуха важную роль играет также состояние поверхности: тела с грубой оболочкой или с гофрированной внешней поверхностью представляют большее сопротивление, чем тела с гладкой поверхностью. «Отсюда вытекает, что очень важно изучить природу взаимодействия между потоками и твердыми поверхностями».

В наше время может показаться, что в этих и других подобных утверждениях нет ничего нового, но следует иметь в виду, что Флеттнер высказал их до первой мировой войны и во время ее, то есть еще до опытов Никурадзе и даже до появления законченных теорий тел наименьшего лобового сопротивления. Для того времени он был, несомненно, выдающимся пионером. Но он повторял уже известное, утверждая, что сопротивление текучей среды движению тела возрастает приблизительно пропорционально квадрату скорости потока, и что это верно для средних скоростей: это было уже общепринятым законом. Он ошибался также, полагая, что закон Rv^2 «правилен» только до скоростей примерно в 30 миль в час: он остается «правильным» и прл гораздо больших скоростях.

Читатель вспомнит здесь о числе Рейнольдса. Флеттнер рассматривал его как важный параметр. Как он писал, — и вполне справедливо, — вдобавок к форме тела и к скорости потока это отношение Рейнольдса влияет на сопротивление движению тела; так что в некоторых случаях, несмотря на возрастание скорости потока, сопротивление

среды внезапно падает.

Как мы уже указывали, тела, движущиеся в текучей среде, создают волны. Главное различие между «водным кораблем» и «воздушным кораблем», как мы читаем в книге Флеттнера, связано с тем обстоятельством, что в первом случае вдобавок к уже рассмотренному лобовому сопротивлению надо принять во внимание образование волн. Образование волн меняет закономерности потока едва ли не решающим образом. Например, возрастание сопротивления в зависимости от скорости становится совершенно отличным от обычного закона $R \propto v^2$.

Таким образом, Флеттнера надо считать более чем изобретателем: он был зрелым аэродинамиком и гидродинамиком. Им нельзя пренебречь, рассматривая его как слепого эмпирика или простого изобретателя.

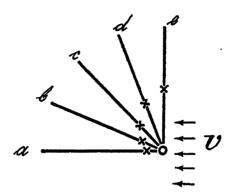
Напомним, что для вращения или для остановки вращения аэроплана вокруг одной из трех осей, для поддержания заданного уровня полета и для выполнения различных маневров необходимы поверхности управления, подвижные по отношению к крыльям и к фиксированным хвостовым плоскостям. Поверхностью управления, производящей или регулирующей рыскание, является подвижная вертикальная поверхность — руль, прикрепленный к (вертикальному) килю. Руль приводится в движение ногой пилота: нажимая правой ногой на рулевой стержень, он передвигает руль вправо, что вызывает поворот направо. Точно так же, нажатие левой ногой вызывает поворот влево.

Поверхности управления, производящие тангаж или регулирующие угол тангажа — это горизонтальные хвостовые поверхности. Подвижной частью является руль высоты или «флиппер», а неподвижной частью — стабилизатор. Руль высоты приводится в движение с помощью управляющей рукоятки; когда эту рукоятку толкают вперед, нос аэроплана опускается; когда ее тянут назад, нос поднимается.

Поверхности управления, производящие или регулирующие крен, — это элероны, прикрепленные к крыльям. Они тоже приводятся в движение рукояткой (на малом самолете) или управляемым колесом (на большом самолете); движение рукоятки (или поворот колеса) вправо опускает левый элерон и поднимает правый элерон, что вызывает крен направо, и обратно.

Все эти действия требуют мускульной силы пилота, и это привело Aнтона Флеттнера к вопросу: каким образом можно уменьшить силы

(точнее, моменты сил), необходимые для нажатия рулевого стержня и управляющей рукоятки?



Puc. 77. Диаграмма Флеттнера, изображающая эффект Афанцини.

Найденные им ответы были очень важны и остроумны. Так называемая диаграмма Флеттнера (рис. 77) показывает, что центр давления обычной плоской пластины в потоке перемещается от переднего края (при нулевом угле атаки) к геометрической середине пластины (пря $\alpha=90^{\circ}$). Возможно, этот сдвиг центра давления следовало бы назвать эффектом Афанцини (Afanzini), по имени итальянского гидродинамика Афанцини, установившего этот эффект в своих опытах с плоскими пластинами в воле.

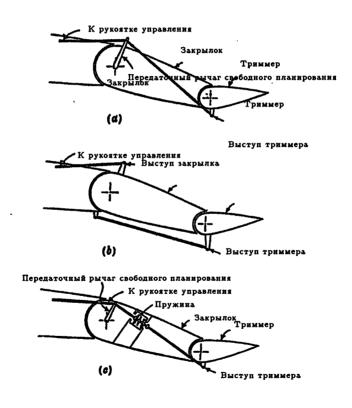
Сопротивление среды движению пластины наибольшее в положении (e), меньше в случае (d), еще меньше в случае (c) и так далее.

Вот что писал Флеттнер¹¹⁵): «Согласно теории смещения центра давления балансирующий руль будет всегда стремиться принять положение, в котором ось вращения совпадает с центром давления (если пренебречь образованием вихрей). Для всех практических потребностей проектирования кораблей руль может быть сбалансирован для угла атаки в 20°, поскольку при этом угле почти не требуется силы для его удержания. Если теперь желательно повернуть руль с 20° до 30°, то центр давления будет двигаться в направлении потока, а это в

¹¹⁵⁾ Mein Weg zum Rotor, S. 25.

случае большого корабля создало бы весьма значительную управляющую силу...

Вот в чем состояла идея Флеттнера. Представим себе поверхность управления из двух частей: одна из них может вращаться вокруг шарнира O, другая вокруг шарнира O'. Пусть первая из них развивает силу R_1 , а вторая силу $R_2 \ll R_1$, так что ее момент мал по сравнению с моментом R_1 .



Puc. 78. Компенсация с помощью триммера Флеттнера.

Результирующий момент относительно шарнира O равен R_1a-R_2b , т. е. момент рукоятки (или ножного стержня) уменьшается на ве-

личину второго члена. Таким образом, прибавление *триммера* Флетт. нера к рулю, к рулю высоты или к элеронам, или ко всем этим устройствам сделало возможным триммировать аэроплан или использовать малую вспомогательную поверхность как сервомеханизм, позволяющий пилоту применять меньшую силу для движения рукоятки или ножного стержня (рис. 78).

Это устройство и некоторые другие, включая так называемую аз. родинамическую компенсацию Флеттнера, начиная с 1920-25 годов применялись в аэропланах и во всевозможных кораблях (рис. 79), и они всегда будут напоминать о выдающейся роли Антона Флеттнера среди великих деятелей механики текучих сред.

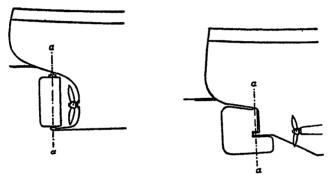


Рис. 79. Гидродинамические компенсации Флеттнера для кораблей.

Перед тем как перейти к сенсационному изобретению Флеттнера, сделаем еще одно замечание. Как всем известно, парусные суда страдают серьезными недостатками. Полотняные паруса малоэффективны, управление ими весьма хлопотное дело. Неудивительно, что это привлекло внимание Флеттнера.

С 1920 до 1922 года он жил в Голландии, в Гааге. Как он пишет, «из-за близости океана и низкого уровня суши здесь почти непрерывно дует ветер умеренной силы» (Поэтому многочисленные ветряные мельницы, большие и малые, действуют практически все время... Таким образом, я все время наблюдал энергию ветра... Я путешествовал

¹¹⁶⁾ В. А. Chait. Mein Weg zum Rotor, с. 60. Le rotor, instrument à progrès е^п marge du "Flettner-Rotor". («Ротор, орудие прогресса, сопутствующее "ротору Флеттнера"»). Antwerp: Impr. Anvers-Bourse, 1925.

также при штормовом ветре. Я принимал участие в непрерывной, напряженной борьбе моряков против вечно угрожающих сил природы... Поэтому естественно, что во время моего пребывания в Голландии я разрабатывал идею, которая революционизирует парусное судно... Таким образом я пришел к мысли заменить полотияный парус металлическим парусом».

Можно спросить, почему эта идея была забыта? С моей точки зрения, она заслуживает повторного изучения, поскольку ее возможностями не следует пренебрегать, в особенности при нынешних достижениях в производстве листового металла.

Роторное судно Флеттнера

Теорема Кутта — Жуковского была и останется краеугольным камнем авиации и многих проблем гидродинамики, а циркуляция, о которой уже шла речь, была и остается сердцевиной этой теоремы. Поэтому примерно с 1922 года Флеттнер занимался вопросом, который должен беспокоить каждого изучающего аэронавтику: что такое «эффект Магнуса»?

«Однажды утром, — пишет Флеттнер, — лежа на песке, я попытался объяснить моей жене смысл эффекта Магнуса. Чтобы объяснить особенность его действия, я скатывал песчинки с песчаного холмика, заставляя их в то же время огибать мой кулак, который я вращал в движущемся песке. Было отчетливо видно, что с той стороны, где направление его вращения совпадало с направлением движения песка, песчинки двигались гораздо быстрее; между тем как с противоположной стороны они останавливались... Всю следующую ночь я не мог уснуть. В эти часы я боролся с самим собой, как потом должен был целые месяцы бороться со всеми экспертами... Я спрашивал себя, могу ли я решиться ввести наряду с моей рулевой системой также вращающийся парус, что казалось совсем революционным новшеством. Решение это было тем более трудным, что уже было заключено соглащение с верфью «Германиаверфт» о реализации идеи металлического паруса...».

Таково было, как мы видим, начало истории роторного судна. Но, по-видимому, здесь надо напомнить читателю, что в действительности эффект Магнуса был установлен Бенджамином Робинсом и Леонардом Эйлером. Конечно, я не хочу этим сказать, что нет оснований назы-

вать его эффектом Магнуса; я хочу сказать, что есть основания _{не} игнорировать Эйлера, и особенно Робинса.

Факты состоят в следующем. В 1794 году Берлинская академия наук предложила приз за решение задачи об отклонении артиллерий, ских снарядов (шарообразной формы) от их теоретических траекторий Но лишь через 58 лет Густав Магнус, профессор физики в Берлин. ском университете и один из учителей Гельмгольца, сумел найти на нее ответ 117). Он сконструировал медный цилиндр, вращавшийся на двух конических подшипниках. На вращающийся цилиндр направлялся поток воздуха, создаваемый нагнетательным вентилятором. Как только цилиндр начал вращаться, он заметил отклонение в ту сторону, гле поток воздуха и вращающаяся поверхность двигались в одном направлении: причины этого мы уже рассмотрели. Игроки в теннис знают также, что если ракетка ударяет мяч под углом или «срезает» его, то он летит вперед и в то же время вращается; поэтому с одной стороны мяча направление вращения совпадает с направлением поступательного движения, а с другой стороны они противоположны; таким образом поток становится асимметричным (рис. 80), и возникает подъемная сила Кутта — Жуковского, вынуждающая мяч лететь по кривой.

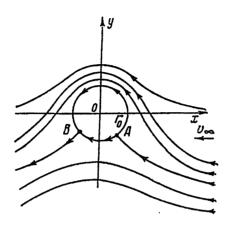
Лорд Релей назвал это «нерегулярным полетом» и пытался объяснить его причины¹¹⁸⁾. Много позже — в 1912 году — французский профессор Лафе (Lafay) опубликовал статью под названием Contribution expérimentale à l'aérodynamique du cilindre et à l'étude du phénomène de Magnus («Экспериментальное исследование об аэродинамике цилиндра и о явлении Магнуса»), не содержащую ссылок ни на Бенджамина Робинса, ни на Леонарда Эйлера, но излагающую его собственные эксперименты в École d'Aviation Militaire de Vincennes в 1911-1912 годах (рис. 81)¹¹⁹⁾. С нынешней точки зрения его экспериментальная техника была примитивной. И все же он показал, что подъемная сила вращаю-

¹¹⁷⁾ G. Magnus. Über die Abweichung der Geschosse und eine auffalende Erscheinung bei rotierenden Körpern. Berlin, 1853.

¹¹⁸⁾ On the Irregular Flight of a Tennis Ball. («О нерегулярном полете теннисного мяча»). Messenger of Mathematics, July 14, 1877: London.

¹¹⁹⁾ A. Lafay. Prévision de l'action d'un vent dont la direction varie rapidement, арг plication à l'effet Katzmayr et à l'autorotation. («Предсказание действия ветра быстро меняющегося направления, с приложением к эффекту Катцмайра и к авторотации)».

_{шегося} цилиндра в несколько раз больше, чем у эквивалентного крыла обычного типа.



Puc. 80. Асимметричный поток вокруг вращающегося цилиндра или шара.

Примерно в то же время начали уделять внимание эффекту Магнуса Людвиг Прандтль в Геттингене и Дмитрий Рябушинский в России. Но в 1918–20 годах были уже твердо установившиеся теоретические и экспериментальные точки зрения на этот предмет¹²⁰⁾, так что Антон Флеттнер мог предпринять свою смелую попытку, опираясь на прочное основание.

Флеттнер был теперь главным чемпионом и защитником практического применения эффекта Магнуса (который он никогда не называл эффектом Робинса — Эйлера). К концу 1922 года идея роторного судна, то есть судна, движимого эффектом Магнуса, занимала его больше всего. В 1923 году он узнал, что геттингенский Институт аэродинамики изучает аэродинамические свойства вращающихся цилиндров, и вот как он описал свои впечатления 1211: «Особенно хорошо я помню мой визит в Геттинген в августе 1923 года. Приехав в конце дня, я встретился в кабинете господина Аккерета (Аскетеt) сначала с господином Аккеретом и господином Бетцом (Betz), а

¹²⁰⁾ См., например, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Berlin: 1918.

¹²¹⁾ Mein Weg Rotor. S. 76-68.

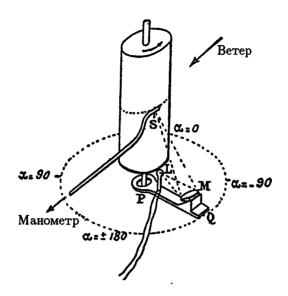


Рис. 81. Эксперимент Лафе.

затем также с профессором Прандтлем. Даже сейчас я вижу в своем воображении выражение удивления на их лицах: они были крайне удивлены, когда я объяснил им мои планы и сказал, что я подал заявку на патент изобретения, цель которого составляло применение к движению судов эффекта Магнуса от вращающихся цилиндров. Удивление этих господ еще более возросло, когда я рассказал им о моем намерения провести испытания такого судна на верфи "Германия"».

Вряд ли стоит объяснять, что Якоб Аккерет, Альберт Бетц и Людвиг Прандтль, три самых выдающихся аэродинамика Германии, знали о роторе по крайней мере столько же, как Флеттнер¹²²⁾. Но его практическая ценность вызывала у них гораздо меньше энтузиазма; и дальнейшая история показала, что они были правы. Ввиду этого они пытались убедить Флеттнера сосредоточиться на его металлических парусах, а не на роторном судне. «И в самом деле, — пишет он не без горечи, — д-р Бетц и господин Аккерет убедили меня расстаться на

¹²²⁾ Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschifffahrt. 1925. Bd 3.

ближайшее время с идеей роторного судна и рассмотреть возможность моего участия в другом изобретении, на которое они сами, Бетц и Аккерет, сделали патентную заявку». Конечно, это была идея отсасывания пограничного слоя.

16-го сентября 1922 года Флеттнер подал заявку на германский патент роторного судна. В конце 1922 года профессор Феттингер (Foettinger) опубликовал статью под названием "Neue Grundlage für die theoretische und experimentelle Behandlung des Propeller-Problems" («Новые основания для теоретического и экспериментального рассмотрения проблемы винта»), убедившую изобретателя, что он идет правильным путем. Первоначальная идея Флеттнера была в том, чтобы создать необходимую движущую силу с помощью пояса, движущегося вокруг двух цилиндров (рис. 82): он полагал (ошибочно), что таким образом будет поддерживаться намного большая циркуляция. Но после нескольких месяцев дальнейшего размышления идея пояса была отброшена, и концепция ротора появилась в виде, показанном на рис. 83.

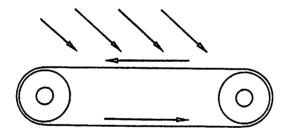


Рис. 82. Пояс Флеттнера, приводимый в движения двумя цилиндрами.

Между тем, эксперименты Бетца и Аккерета с отсасыванием пограничного слоя оказались не особенно удачными, а изобретение Флеттнера начало привлекать больший интерес. В конечном счете его модели были испытаны в геттингенских аэродинамических трубах (вклейка 7). Эксперимент доказал самым несомненным образом то, что было уже известно: что вращающийся цилиндр, обдуваемый ветром, создает с одной стороны область низкого давления, а с противоположной стороны область высокого давления. Сила, происходящая от разности этих давлений, и составляет «эффект Магнуса», аэродинамическую тягу,

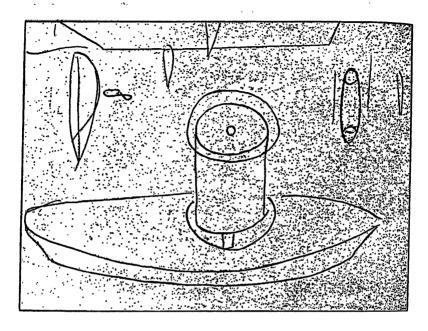


Рис. 83. Оригинальная схема роторного судна по Флеттнеру.

нужную для движения корабля.

Теперь Антон Флеттнер был готов к следующему шагу. В начале 1924 года он пригласил представителей верфи «Германия» в Геттинген, где прочел им лекцию о роторном судне. Он встретился с рядом технических возражений, но (обратите внимание!) Бетц, Аккерет и в особенности Прандтль были теперь на его стороне; с их поддержкой он добился принципиального одобрения его идеи. Сначала он построил экспериментальное роторное судно (вклейка 8), а затем, в октябре 1924 года, верфь завершила сооружение большого двухроторного судна пол названием «Буккау» (вклейка 6). И оба они работали! «Буккау» двигался не только вперед, но даже назад! Впервые в истории судостроения здесь, на Балтийском море, было судно без парусов и больших дымовых труб.

Цилиндры приводились в движение двумя реверсивными электро-

двигателями параллельного возбуждения с 750 оборотами в минуту, мощностью в 11 квт, для постоянного тока в 220 вольт. Сами роторы были изготовлены из тонкой листовой стали толщиной в 3/64 дюйма. Как только начались официальные испытания, сенсационная новость о роторном судне распространилась по свету. «Интересно было наблюдать, — писал Флеттнер двумя годами позже, — как люди всех классов населения, не только ученые и инженеры, но представители самых различных профессий увлекались моим изобретением. Я видел, и вижу до сих пор, что во всех классах нации, несмотря на нынешние условия (т. е. в Германии в 1926 году), существует невероятный энтузиазм и восприимчивость к новым идеям».

После успешного завершения испытаний в феврале 1926 года «Буккау» начала свое первое плавание из Данцига через Северное море в Шотландию. Груз состоял из пиломатериалов. Плавание было вполне успешным. В штормовую погоду роторы ни разу не вызывали ни малейших трудностей. Напротив, в бурную погоду роторное судно вело себя лучше других судов! Английская печать, следившая за этим плаванием с пристальным вниманием, единодушно признала, что в тех же условиях никакое парусное судно не могло бы сравниться с достижениями роторного судна. Столь же успешным был и обратный путь из Шотландии в Куксгавен с тяжелым грузом. Эти два плавания окончательно показали, что роторное судно может плыть против ветра под углом от 20° до 30°. 31 марта 1926 года роторное судно, теперь под именем «Баден-Баден», отплыло в Нью-Йорк, через Южную Америку. Было много других маршрутов.

Но ... всякая палка о двух концах. Сколь бы блестящей ни была основная идея, никакое техническое новшество не бывает без недостатков, и у каждого нововведения есть противники. Великое изобретение в аэродинамике стало жертвой своих недостатков. То обстоятельство, что в спокойную, безветренную погоду роторы не могут произвести эффект Магнуса, было использовано как антироторный яд...

Изобретение Флеттнера остается раненым, но не мертвым. Оно сообщило механике текучих сред столь сильный импульс, что роторы триумфально вошли во все аэродинамические и гидродинамические лаборатории мира, и заняли свое место в уме каждого аэродинамика и гидродинамика.

Роторная ветряная мельница Флеттнера

История применения силы ветра восходит к самому отдаленному прошлому. По-видимому, в Китае и Японии ветряные мельницы — в отличие от водяных — были тысячи лет назад. Уже Хаммураби сообщает о ветряных двигателях, предназначенных для снабжения энергией ирригационных систем. В Египте все еще существуют старые мельницы, сооруженные, как полагают, две тысячи лет назад. Арабский исследователь Истахри (Istachri, 134 год н. э.) сообщает о применении ветряных мельниц в персидской провинции Сегистан. Арабский ученый Дисмашги (Dismaschgi, 1271 год н. э.) дает нам, как сообщает А. Флеттнер, детальное описание этих старых персидских ветряных мельниц с их изображениями.

Эта персидская мельница имела ветряное колесо, нечто вроде турбины, встроенной в нижнюю часть строения, в стенах которого были проделаны отверстия для впуска и выпуска ветра. Колесо вращалось на валу, поддерживаемом опорой снизу. Ветер входил в камеру двигателя через отверстия по бокам и надувал паруса. Жернова монтировались на среднем этаже, а на верхнем была загрузочная воронка.

Немцы начали применять ветряные мельницы в 833 году н. э., французы в 1105 году, англичане в двенадцатом столетии. С этого времени человек пытался разными способами использовать силу ветра, но не всегда успешно. Первая ветряная мельница в Нидерландах, предназначенная для размола зерна, по имеющемуся сообщению, была сооружена в провинции Голландия*) в 1439 году. В следующем столетии или вскоре после него подобные мельницы появились в ряде стран, так что воздушные потоки стали служить человеку этим путем.

Но путь этот был и остается узким и коротким. Надо признать, что это одна из областей, в которых человеческие достижения все еще бесконечно малы по сравнению с еще нетронутыми возможностями. Солнце, посылая на Землю свои лучи, без конца приводит в движение огромные массы атмосферы, миллиарды лошадиных сил существуют в воздухе в виде ветров, но все, что человек сумел создать для их использования — это примитивная ветряная мельница...

^{•)} В средние века название «Голландия» применялось лишь к одной из провий ций, составляющих нынешнее королевство Нидерландов. — Прим. перев.

Да, одна из старейших машин, сделанных человеческими руками, — ветряная мельница — все еще очень примитивна. Вот как на это жалуется Антон Флеттнер: «Первая проблема, связанная с ветряными мельницами любого размера, это трудность их регулирования. Крайне трудно вычислить силу ветра, действующую на ветряной двигатель. Энергия, на которую надо рассчитывать ветряную мельницу, часто изменяется в тысячи раз, поскольку сам ветер изменяется от легкого бриза до ураганов, вырывающих огромные деревья. Это большое расхождение между силами, подлежащими учету при проектировании ветряных мельниц, приводит к такой неопределенности, что ни один современный инженер, привыкший к точным расчетам, не занимался проблемой ветряных двигателей».

Как можно преодолеть этот недостаток? В прошлом было много — можно даже сказать, очень много — новых идей. Но ни одна из них не была столь революционной, как предложение Флеттнера: заменить обычные крылья (лопасти) ветряной мельницы вращающимися цилиндрами. В 1923 году был образован синдикат из фирм Deutsche Machinenfabrik A. G., Duisburg (DEMAG), Mannesmann и Bergische Stahlindustrie Remscheid, под эгидой Немецкого банка, с целью провести совместно с изобретателем эксперименты над роторным ветряным двигателем и разработать последующие промышленно-коммерческие аспекты. В 1925 году этот синдикат организовал Компанию ветряных турбин Флеттнера. На вклейке 9 показана фотография первой роторной ветряной мельницы, построенной и действительно испытанной фирмой DEMAG.

Пиаметр ветряного колеса был 66 футов, роторы имели длину около 16,5 футов, с сужающимися концами, диаметром в 35,5 футов с внешней стороны и 28,5 футов с внутренней стороны. Испытания показали, что ротор превосходно подходит для замены традиционных крыльев и парусов ветряной мельницы. Одно из преимуществ новой машины состояло в том, что даже сильные шквальные порывы ветра ударяли не в крыло и не в парус, а в относительно небольшие члиндрические барабаны, аэродинамическое сопротивление которых составляло всего лишь одну десятую аэродинамического сопротивления паруса той же энергетической производительности. При этом не было опасности «разгонки» до опасных скоростей, поскольку враще

ние цилиндров легко контролировать. Но, как и в случае роторного судна, эта машина имеет свои ограничения. Хуже того, аэродинамические ограничения роторной ветряной мельницы были значительнее, чем у роторного судна. Прежде всего эффект Магнуса ротора зависит от отношения вращательной скорости и к скорости ветра v, которое не может поддерживаться при штормовых ветрах. Во-вторых, когда главное ветряное колесо вращается, внешние части его цилиндров движутся относительно воздуха с намного большими скоростями, чем их внутренние части, что в весьма значительной степени осложняет аэродинамические характеристики. Для преодоления этих трудностей требовалось радикальное изменение проекта; но это оказалось коммерчески неосуществимым.

Во всяком случае, роторная ветряная мельница Флеттнера, подобно его роторному судну, никогда не вышла за пределы кратковременной вспышки интереса во всем мире, и человек снова потерпел неудачу в своей попытке овладеть энергией ветра.

Авторотирующие тела

Эта книга преследует три цели: дать очерк истории механики текучих сред; содействовать пересмотру и переоценке некоторых великих, но заброшенных изобретений и идей, подобных роторному судну и роторной ветряной мельнице; и показать на конкретных примерах, что история науки и техники далеко не свободна от ложных представлений и от тиранического воздействия определенных догм, нередко повторяющихся из десятилетия в десятилетие. Заглянув в ваши учебники, вы найдете там разительные примеры: уравнение Бернулли (без упоминания Лагранжа), «эффект Магнуса» (без упоминания Робинса) и так далее.

То же можно сказать об истории авторотирующих тел, составляющих одну из интереснейших отраслей аэродинамики. Мы все еще не знаем, кто первым их открыл. Но разные люди в разное время прямо или косвенно на это претендовали. Флеттнер писал: «Как только мон изобретения показали, что «эффект Магнуса» должен со временем сыграть значительную роль в инженерном деле, после того, как я смог привлечь внимание удивленного мира к значению моих открытий, в этой новой области практически повсюду началась интенсивная дея-

тельность, и были заявлены многочисленные патенты; но я уже предусмотрел эти возможности в моей первой патентной заявке...».

Внимательное рассмотрение этого несколько помпезного заявления показывает, что оно относится также к авторотирующим телам. Но истина лучше всего выглядит в голом виде, и она никогда не стареет. Не знаю, был ли знаком Антон Флеттнер с вкладом в науку Джеймса Кларка Максвелла (1831–79), но мне кажется, что Максвелл сильно разошелся бы с ним во мнениях. Все знают этого выдающегося шотландца, который перевел на математический язык теории Майкла Фарадея (1791–1867), как автора теории, по которой энергия электромагнитного поля заключена не только в проводниках, но и в диэлектриках, создателя теорий и теорем об электромагнитных явлениях и автора эпохальной книги Treaties on Electricity and Magnetism («Трактат об электричестве и магнетизме») (1873). Но он был также аэродинамиком, хотя и в меньших масштабах. Он и заложил основы теории авторотирующих тел задолго до Флеттнера и даже до Жуковского.

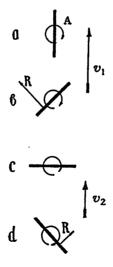


Рис. 84. Схема авторотации Максвелла.

Предположим, что авторотирующий (самовращающийся) слой A (рис. 84) вертикально падает. Если он занимает положение a, лобовое

сопротивление гораздо меньше, чем если он занимает положение c. $\Pi_{\text{о}}$ этому если слой приходит в положение b, то относительная скорость ветра v^1 и, следовательно, результирующая сила R больше, чем относительная скорость ветра v^2 (и, следовательно, результирующая сила R) в положении d. Изучив все положения, занимаемые слоем, легко видеть, что тело способно продолжать свое падение с авторотацией, и в самом деле движется таким образом, причем результирующая сила R тянет слой влево.



Рис. 85. Объяснение причин авторотации по Рябушинскому.

Здесь очень отчетливо заметны следующие утверждения: авторотирующее тело производит эффект Магнуса; оно не может падать вертикально, а должно двигаться по кривой траектории. Как мы видим, не только Робинс, Эйлер, Жуковский и Магнус, но, вероятно, также и Максвелл мог бы претендовать на авторство эффекта Магнуса; как же можно заявлять, что аэродинамическая авторотация была открыта лишь в связи с роторным судном?

Д. П. Рябушинский сделал дальнейший шаг в анализе теоремы Максвелла. Когда полоса A (рис. 85) переходит из положения a в по-

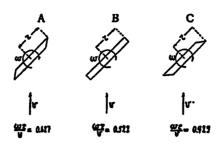


Рис. 86. Теорема Рябушинского об авторотации.

ложение b, то кривизна линий тока относительного движения и, следовательно, эффект всасывания в окрестности переднего края, находящегося под давлением ветра, сильнее, чем если слой A, пройдя положение c, занимает положение d. Из этого объяснения следует, что для увеличения скорости авторотации необходимо усилить эффект всасывания за краем, находящимся под давлением ветра, например, срезав этот край на некоторый угол.

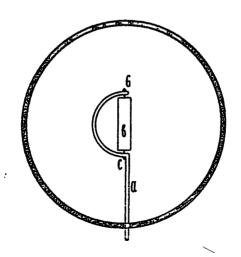


Рис. 87. Устройство Рябущинского для изучения авторотации в аэродинамической трубе.

В соответствии с этими соображениями три пластины A, B, C, для которых на рис. 86 указаны сечения и направление вращения n_0 отношению к скорости потока, должны вращаться с разной скоростью. Пластина A должна вращаться с большей скоростью, чем пластина B, а пластина B быстрее, чем пластина C (теорема Рябушинского) 123).

На рис. 87 показано устройство, примененное Рябушинским при исследовании этих пластин в аэродинамической трубе. Коэффициенты авторотации, то есть отношения скорости края $u=\omega R$ к скорости потока V, для пластин A, B, C он нашел равными соответственно 0,627, 0,522, 0,729. При авторотации этого типа, то есть вокруг оси, ортогональной скорости относительного потока, всегда $\omega R/V < 1$. На вклейке 10 показаны фотографии волоконных линий дыма в окрестности пластины, приведенной в авторотацию в воздушном потоке. Примененное при этом устройство показано на рис. 88. Эти фотографии (заснятые в 1930 году) соответствуют объяснению аэродинамических причин авторотации плоских пластин, данному Рябушинским.

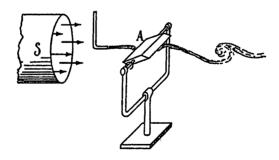
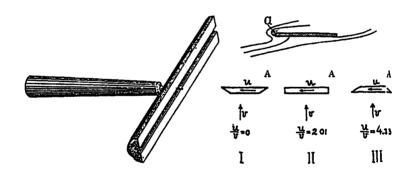


Рис. 88. Метод Рябушинского для демонстрации потоков, огибающих авторотирующие тела.

¹²³⁾ Dimitri P.Riabouchinsky. Thirty Years of Theoretical and Experimental Research in Fluid Mechanics. («Тридпать лет теоретических и экспериментальных всседований по механике текучих сред»). London: Royal Aeronautical Society. 1935; а также: Dimitri Riabouchinsky. Étude sur l'hypersustentation et la diminution de la résistance à l'avancement. Paris: SDIT, 1957.

Как обнаружил Отто Лилиенталь, для некоторых углов падения потока результирующая аэродинамическая сила, приложенная к искривленному профилю, может быть не только перпендикулярна к хорде, но даже отклоняется к переднему краю профиля. Интересное приложение этого факта сделал датский ученый Поль Лакур (Paul la Cour)¹²⁴), построивший ветряную мельницу, способную вращаться в обоих направлениях: если бы крылья мельницы были плоскими, такое отклонение аэродинамической силы и, следовательно, такое безразличие к направлению вращения было бы невозможно¹²⁵).

В 1905 году, на Международном конгрессе аэростатики в Ст.-Петербурге, некий Патрик Александер (Patrick Alexander) демонстрировал небольшой ротор, способный вращаться равным образом в обоих направлениях. Через несколько недель Рябушинский также провел серию экспериментов, со специальным вниманием к распределению давления в окрестности переднего края, и выработал объяснение свойства авторотации плоских пластин (рис. 89).



 $P_{uc.}$ 89. Метод Рябушинского для исследования открытия Патрика Александера.

Таким образом были установлены основные понятия об авторотации. Но каковы аэродинамические свойства таких тел, и можно ли использовать их для человека?

¹²⁴⁾ Forsog med smok Modenmodellen, p.62. Ingenioren: 1899.

¹²⁵⁾ Die Windkraft («Сила ветра»). Leipzig: 1905.

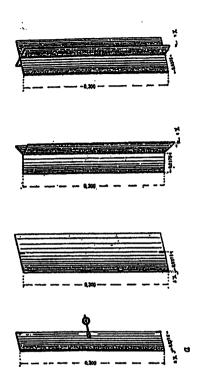


Рис. 90. Роторы Рябушинского с одной, двумя, тремя и четырьмя лопастями.

В Аэродинамическом институте в Кучино, близ Москвы, Д. П. Рябушинский провел испытания в свободном потоке и в аэродинамической трубе роторов с одной, двумя, тремя и четырьмя лопастями-(рис. 90); результаты показаны на рис. 91^{126}). Значение букв следующее: $M = 10^{126}$ плотность, $N = 10^{126}$ число оборотов в единицу времени, $R = 10^{126}$ радиус ротора, $R = 10^{126}$ в кривые коэффициента подъемной силы; $R = 10^{126}$ кривые коэффициента лобового сопротивления, причем индексы означают номер лопасти.

Много позже, вероятно, в 1922-3 годах, финский инженер-коммай-

¹²⁶⁾ Bulletin de l'Institut Aérodynamique de Koutchino, No. 3, p. 34. December ¹⁹⁰⁹

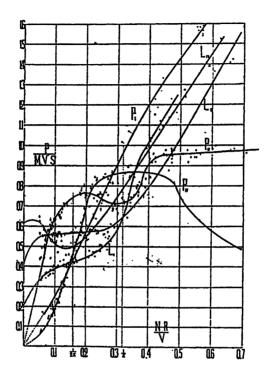


Рис. 91. Экспериментальные кривые авторотации по опытам Рябушинского.

дер*) Сигурд Й. Савониус (Sigurd J. Savonius) предложил новый тип авторотирующего тела¹²⁷⁾, который, как я полагаю, он вначале собирался назвать "TSPM" (The Savonius Perpetuum Mobile — «Вечный двигатель Савониуса»); но в дальнейшем это устройство получило название "TSWR" (The Savonius Wing-Rotor — «Крылатый ротор Савониуса»), или просто «крылатый ротор»: это два полуцилиндра, сдвинутые по отношению друг к другу (рис. 92). Это устройство было испытано в ряде аэродинамических труб во всем мире, включая СССР,

^{•)} Во флотах Великобритании и США — капитан первого ранга. — Прим. перев.

¹²⁷⁾ El Flugerrotor. Iberica, Anno 14, Num.708, 31.12.1927.

и был предложен ряд проектов его использования, например, предлагалось использовать *крыматый ротор* в качестве ветряного двигателя для небольших ветряных мельниц.

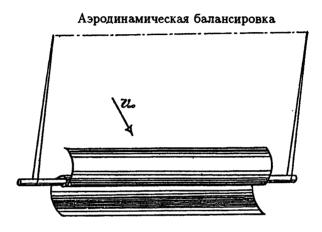


Рис. 92. Основной крылатый ротор.

Главными преимуществами крылатого ротора перед всеми другими авторотирующими телами состояли в устойчивости его авторотации и в его относительной нечувствительности к (небольшим) изменениям скорости ветра. Эти свойства сделали изобретение Савониуса почти идеальным двигателем для вентиляторов в железнодорожных вагонах, авторесторанах и обыкновенных автофургонах. С другой стороны, во всем мире распространились спекуляции о возможном использовании крылатого ротора в качестве двигателя для водяного насоса, или даже в качестве эффективного самолетного крыла.

Поэтому понятно, что мы в СССР не остались равнодушны к этому perpetuum mobile. Он изучался в Центральном аэрогидродинамическом институте примерно начиная с 1927-8 годов. Десятью годами позже я сам получил указание провести в большой аэродинамической трубе Академии имени Жуковского широкие испытания роторов, авторотирующих тел и — что особенно интересно — комбинированных роторов (рис. 93). Главные аэродинамические характеристики крыла-

того ротора получились в виде, показанном на рис. 94 (диски на концах заметно увеличивают значение $C_{L\,\mathrm{max}}$); но характеристики комбинированных роторов оказались примерно теми же, что у обычных роторов.

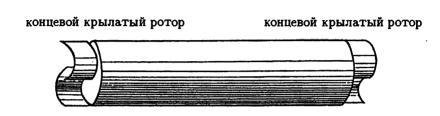


Рис. 93. Комбинированные роторы Токати.

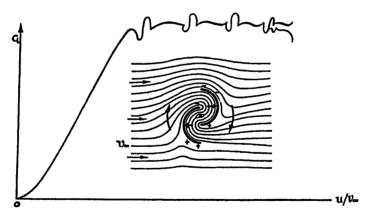


Рис. 94. Аэродинамические характеристики крылатого ротора.

Как я полагаю, любой читатель знаком с игрушечным самолетом, у которого вместо крыльев сделаны вращающиеся пластинки — почти крылатые роторы: эту модель предложил в 1901 году немец по фамилии Кеппен (Кöppen). Это старая идея, но мы были всерьез заинтересованы ею. В 1939 году я провел испытания модели с крылатыми роторами Савониуса вместо обычных крыльев в аэродинамической трубе

и в свободном потоке воздуха. Затем я перешел к аналогичным экспериментам с той же моделью, но с комбинированными роторами вместо крыльев. Обе модели работали хорошо, идея, казалось, оправдывалась, но созданная ими подъемная сила была далеко не достаточна, так что им в дальнейшем не уделялось внимание.

Покойный Теодор фон Карман заметил однажды, что в истории и философии науки и техники были «писаные истины и устные истины». Так вот, согласно «писаным истинам» экспериментальные характеристики вращающихся цилиндров были впервые получены Якобом Аккеретом около 1924 года. Это можно доказать многочисленными публикациями 128).

Но следует иметь в виду, что прогресс науки часто тормозится тираническим действием некоторых печатных «истин», которые в конечном счете оказываются всего лишь догмами или результатами слепой инерции. Можно ли, например, упустить из виду тот факт, что Институт аэродинамики Рябушинского в Кучино, под Москвой, существовал с 1904 года? Среди других пионерских работ там изучалась теория и аэродинамическая практика авторотирующих тел и вращающихся цилиндров с дисками на концах или без них. Это утверждение неопровержимо доказывается собственными работами Рябушинского 129) и официальными публикациями института. На основании этих доказательств я хотел бы внести дополнительные фактические поправки к истории и философии цилиндрических роторов и авторотирующих тел. В Кучинском институте рассматривались три классических потока (рис. 95): (а) плоско-параллельный потенциальный поток вокруг цилиндра, без циркуляции, (б) чисто циркулярный потенциальный поток вокруг того же цилиндра и (в) комбинированный потенциальный поток вокруг того же цилиндра (суперпозиция двух предыдущих потоков). Под руковод-

¹²⁸⁾ См., например, L. Prandtl. Application of the Magnus Effect to the Wind Propulsion of Ships («Применения эффекта Магнуса к движению судов силой ветра»). NACA ТМ 367, 1926. А. Ветг. Der Magnus-Effekt, die Grundlage der Fletinerwalze («Эффект Магнуса, основа ротора Флеттнера»). Z. d. Deutsch. Ing. Bd 69, Nr. 3. January 3, 1925.

¹²⁹⁾ См., например, Dmitrii Riabouchinsky. Étude sur l'hypersustentation et la dimin⁸-tion de la résistance à l'avancement. Publications Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Aire. SDIT. Paris, 1957. D. P. Riabouchinsky. Also Thirty Years of Theoretical and Experimental Research in Fluid Mechanics. London: The Royal Aeronautical Society, 1935.

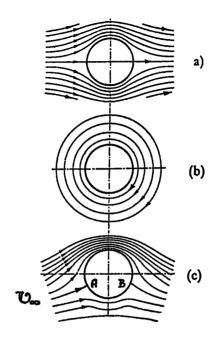


Рис. 95. Три классических потока вокруг круга.

ством Н. Е. Жуковского Рябушинский и его коллеги выполнили теоретические расчеты аэродинамических характеристик комбинированного потока, а затем перешли к экспериментальному изучению цилиндра. Те, кто присутствовал на незабываемом чествовании Рябушинского в Большом зале Норсгемптонского колледжа высшей технологии (теперь Лондонский городской университет) 9-го января 1961 года, может быть, вспомнят утверждение в моей вступительной речи: «...Если мы обратимся к истории так называемого эффекта Магнуса, который следовало бы в действительности называть эффектом Бенджамина Робинса, то мы наталкиваемся и на другую неожиданность: при всей моей любви уважении к профессору Якобу Аккерету, который, кстати, является одним из самых близких друзей Рябушинского, я считаю своим долгом сказать, что первым, кто изучил аэродинамические характеристики вращающихся цилиндров, был не Аккерет, а именно Дмитрий Рябу-

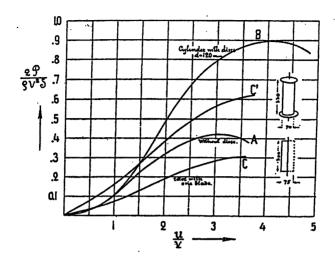


Рис. 96. Экспериментальные графики Рябушинского и Аккерета.
(В) пилиндр с дисками; (А) пилиндр без дисков;
(С) ротор с одной лопастью.

шинский, сделавший это пятнадцатью годами раньше...».

Конечно, Рябушинский заранее сообщил об этом утверждении профессору Аккерету. Более того, будучи старым другом Рябушинского, он одним из первых получал его (Рябушинского) публикации, где содержались отчетливые места вроде следующего (30): «На рис. 96 представлены экспериментальные результаты автора (т. е. Рябушинского) для однокрылого ротора (1909) и экспериментальные результаты Аккерета (1924) для круговых цилиндров, с защитными дисками или без них...».

Можно, конечно, возразить, что кривые Рябушинского представляют авторотирующие тела, тогда как кривые Аккерета относятся к вращающимся цилиндрам. Но, во-первых, основная теория в обонх случаях, по существу, одна и та же; во-вторых, Рябушинский изучал также вращающиеся цилиндры, а Аккерет изучал авторотирующие тела; в третьих, сам Аккерет, принимаясь за свои эксперименты, вовсе

¹³⁰⁾ Ibid.

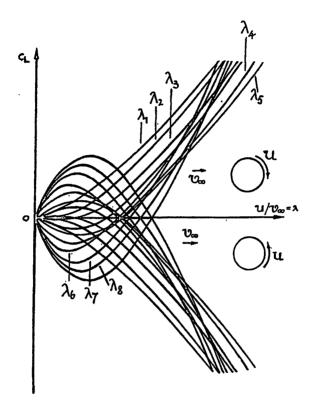


Рис. 97. Аэродинамические характеристики вращающегося цилиндра, согласно Токати.

не думал, что он полностью знаком с колчинскими экспериментами и теоретическими исследованиями.

Что же побудило Рябушинского предпринять такие исследования еще в 1908-9 годах? Причины были очевидны. Во-первых, эффект Магнуса был в начале века очень моден. Во-вторых, теорема Жуковского, или Кутта — Жуковского, была еще столь новой и сенсационной, что комбинация потоков вокруг цилиндра (рис. 95, с) привлекала внимание исследователей. В-третьих, Жуковский и Рябушинский были близкими друзьями и работали вместе, так что было вполне естественно, что

первый из них попросил второго выполнить исследование на вращающихся цилиндрах, чтобы проверить на опыте теорему Жуковского. В-четвертых, Русский артиллерийский департамент просил Колчинский институт изучить поведение в полете артиллерийских снарядов.

Рябушинский сказал мне в 1963 году: «На меня произвели сильнейшее впечатление теории, выдвинутые Фредериком В. Ланчестером, и я должен признаться, что весьма полно воспользовался его основной схемой полета пули (рис. 54). Этот человек восхищал меня простотой и ясностью его теорий...».

Позволю себе еще раз напомнить, что автор этой книги выполнил в 1938—41 годах обширную программу теоретических и экспериментальных исследований вращающихся цилиндров, крылатых роторов и комбинированных роторов. Главные результаты для обыкновенных вращающихся цилиндров получены были в виде, изображенном на рис. 97. Следует заметить, что при определенном (малом) относительном удлинении крыла и некоторых (низких) числах Рейнольдса «эффект Магнуса» меняет знак с плюса на минус: это новый эффект, представляющий интерес для основ аэродинамики. Дальнейшие обширные эксперименты (в Отделении аэрокосмической техники Канзасского университета, Лоуренс, Канзас, США, выполненные Д. Лоуренсом (D. Lawrence) в 1960 году, и в Отделении аэронавтики Лондонского городского университета в 1966—8 годах) полностью подтвердили этот новый «эффект».

Рябушинский, Маллок, Бенар, фон Карман

Необычайная черта механики текучих сред состоит в том, что какую бы вы ни придумали конфигурацию машины, невозможно избежать сопротивления среды ее движению. Компонента результирующей силы этого сопротивления, перпендикулярная направлению движения, называется подъемной силой и обозначается через L (Lifting force), а компонента в направлении, противоположном движению, называется лобовым сопротивлением и обозначается через D (Drag). Это последнее состоит, вообще говоря, из четырех частей: (1) сопротивления формы, или давления, (2) сопротивления трения, (3) индуцированного сопротивления и (4) волнового сопротивления.

Начнем с сопротивления давления. Как показали Даламбер и Эйлер, сфера, находящаяся в стационарном параллельном потоке идеальной жидкости, не испытывает никакого результирующего сопротивления давления; лорд Релей показал, что этот парадокс Даламбера — Эйлера применим также к круговому цилиндру. Однако ситуация совершенно меняется, если эти тела — или любые другие — движутся в реальной жидкости.

Принципиальная разница между характеристиками лобового сопротивления одного и того же тела, движущегося в идеальной и реальной жидкости, связана (при относительно низких скоростях) с отсутствием или соответственно наличием вязкости. Как мы увидим дальше, вязкость является причиной образования тонкого слоя запаздывающего потока, примыкающего к поверхности тела и называемого пограничным слоем. В этом слое жидкости действуют силы сдвига, происходящие от трения о поверхность тела. В то же время, пограничный слой производит спектр обтекания, нарушающий статическое равновесие давления, предсказанное Эйлером, Даламбером, Стевином, Паскалем и Релеем — например, силы давления перестают быть нормальными к поверхности, а потому возникает сила, именуемая лобовым сопротивлением формы.

Очевидно, чем больше поверхность, покрытая пограничным слоем, тем больше результирующее лобовое сопротивление от трения о поверхность, и по этой причине обтекаемые тела имеют высокое сопротивление трения. Не обтекаемые (или прямолинейные) тела вызывают, однако, большее сопротивление формы. Для иллюстрации обоих случаев особенно удобна обыкновенная плоская пластина. Если она перпендикулярна потоку (вклейка 4), то нечто вроде условий пограничного слоя существует лишь на краях, поверхность трения мала, а потому сопротивление трения очень мало. Но пластина препятствует набегающему потоку всей своей фронтальной площадью, создавая большую спутную струю, а потому сопротивление формы велико.

Откуда же мы знаем эти факты? Ответ состоит в том, что почти все лаборатории аэродинамики располагают качественными и количественными методами и средствами исследования. Например, профессор Рябушинский применял лист железа с черным покрытием, обрызганным порошком ликоподия, что позволяло получить наглядное предста-

вление о спектре обтекания (вклейки 11 и 12). Порошок сдувался в местах с максимальной скоростью или турбулентностью, и тогда появлялась черная бумага. Спектры обтекания из ликоподия, полученные этим методом, настолько популяризировали Рябушинского, что уже в 1908—10 годах он начал получать письма и запросы даже из отдаленных стран. Как сказал мне в 1962 году покойный сэр Фредерик Хендли Пейдж (Handley Page), первым, что он узнал об аэродинамике, были аэродинамические спектры (или паттерны) Рябушинского.

«Когда я показал мои спектры Н. Е. Жуковскому, — вспоминал Рябушинский, — он пришел в возбуждение и спросил, не мог ли бы я показать ему также его ограниченный вихрь; я ответил, что и это можно сделать...». «Наглядное изображение потоков, — продолжает он¹³¹), — привело меня к еще одному интересному явлению, а именно, если в момент, когда ветер начинает сдувать тонкий порошок, ударить единственный раз небольшим молотком по краю горизонтальной пластины, то линии тока и другие детали потока сразу же воспроизводятся порошком». (Это можно видеть на вклейках 11, 12).

На этих спектрах, а также на многих других, можно вполне отчетливо видеть, как за телами увлекается бесконечная масса потока. Рябушинский называл ее «связанной массой». Он показывал мне свои старые наброски, где он пытался выяснить кинематическую структуру этой «связанной массы». Должен сказать, однако, что ни один из них не напоминал мне так называемую вихревую дорожку Кармана: это единственный научный вопрос, в котором я открыто расходился с моим другом.

Посмотрите теперь на вклейку 13, представляющую снимок неподвижной камерой кругового цилиндра, движущегося влево через первоначально неподвижную воду. Вы видите двойной ряд перемежающихся вихрей, следующих за цилиндром. Вихри верхнего ряда вращаются по часовой стрелке, а вихри нижнего ряда вращаются против часовой стрелки. Система вихрей заменяет бесконечную массу среды,

¹³¹⁾ Эту информацию можно найти во многих публикациях: Le rôle de la méthode autorotationnelle et de celle des spectres aérodynamiques dans la mise en évidance du principe de l'aile à fente («Роль метода авторотации и метода аэродинамических спектров в демонстрации принципа щелевого крыла»). Institut de France, Des Coptes: 1957. Publications Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Aire. N 167, 1970, and N 337, 1957, etc.

которая должна была бы следовать за телом по теории Кирхгофа, Релея и Рябушинского. Поверхность разрыва можно рассматривать как вихревой слой, и оказывается, что такие вихревые слои, вообще говоря, неустойчивы и имеют тенденцию свертываться, так что завихренность сосредоточивается вокруг определенных точек.

Во всех учебниках механики текучих сред это называется вихревой дорожкой Кармана, или вихревым следом Кармана. Но подобно уравнению Бернулли или эффекту Магнуса это явление называется неточно. Прочтите, что пишет по поводу такого названия сам Теодор фон Карман¹³²⁾: «Я не утверждаю, что открыл эти вихри; они были известны задолго до моего рождения. Самая ранняя картина, где я их видел, находится в одной церкви в Болонье, в Италии, изображающая св. Христофора, несущего младенца Иисуса через поток. За голой ногой святого художник наметил чередующиеся вихри. Чередующиеся вихри за препятствиями были замечены и сфотографированы одним английским ученым, Генри Реджинальдом Арнольдом Маллоком (Henry Reginald Arnold Mallock, 1851-1933) а затем французским профессором Анри Бенаром (Henri Benard, 1874-1939)¹³⁴⁾. Бенар много поработал над этой проблемой до меня, но он, главным образом, наблюдал вихри в очень вязких жидкостях или в коллоидных растворах и рассматривал их более с точки зрения экспериментальной физики, чем аэродинамики. Тем не менее, он проявил некоторую ревность в связи с тем, что система вихрей была связана с моим именем, и несколько раз, например, на Международном конгрессе по прикладной механике в Цюрихе (1926) и в Стокгольме (1930), он претендовал на приоритет ввиду более раннего наблюдения этого явления. В ответ я однажды сказал: «Я согласен, что если в Берлине и Лондоне будет «Карман стрит»*), то в Париже пусть будет «Авеню Анри Бенар»". После такого трюка он успокоился, и мы стали добрыми друзьями».

В чем же состоял вклад фон Кармана в теорию вихревой дорожки?

¹³²⁾ Theodore von Karman. Aerodynamics. Ithaca: Cornell University Press, 1957.

¹³³⁾ A. Mallock. On the Resistence of Air, series A, 79, 1907, pp.262-72. London.

¹³⁴⁾ H. Benard. Formation des centres de giration à l'arrière d'un obstacle en mouvement. Comptes rendues de l'Academie des Sciences. Paris. 1908. P. 839-42, 970-2.

Вихревая дорожка Кармана называется по-английски Karman's vortex street, где последнее слово означает также «улицу». — Прим. перев.



Puc. 98. Симметричные и асимметричные ряды вихрей.

Он первым показал, что симметричное расположение вихрей (рис. 98) существенно неустойчиво и что только асимметричное расположение устойчиво, но лишь при определенных отношениях расстояния между рядами и расстояниями между двумя последовательными вихрями каждого ряда; далее, что импульс, уносимый такой системой вихрей, связан с лобовым сопротивлением — в действительности он показал, что эта система вихрей может представлять механизм образования лобового сопротивления, связанного со спутным следом тела, причем величина этого сопротивления равна

$$D = \rho l v^2 \left[0,314 \left(\frac{u}{v} \right)^2 - 0,794 \left(\frac{u}{v} \right) \right],$$

где $u = \gamma/l\sqrt{8}$, γ — циркуляция отдельного вихря, l — расстояние между соседними вихрями ряда.

Вильям Фруд (1810-79) и другие

Законы сопротивления текучих сред в той форме, как мы их теперь знаем, были установлены и введены в употребление шаг за шагом, в той логической последовательности, в которой их открыли Леонард Эйлер, Даниил Бернулли, Паскаль, Мариотт, Ньютон, Борда, Дюбуа, Даламбер, Рябушинский, Робинс, Жуковский и другие.

Но по мере того, как судостроение вступало в эру науки и изощренной техники, при быстром развитии экспериментальной техники становилось все более очевидно, что ролью трения в образовании лобового сопротивления больше нельзя пренебрегать. Сен-Венан (Saint-Venant),

Клейтц (Kleitz), Гельмгольц, Мейер (Meyer)¹³⁵⁾, Кулон (Coulon)¹³⁶⁾, Купле (Couplet) и их современники пытались показать, каждый своим способом, теоретически и экспериментально, что важнейшим фактором сопротивления текучей среды является вязкость. К концу прошлого столетия в общепринятую философию вошло представление, что законы, управляющие жидким трением, отличны от законов простого (ньютонова) вязкого сопротивления вследствие того факта, что за исключением самых малых скоростей движение жидкости становится неустойчивым, образуются вихри и энергия, поглощаемая при жидком трении, затрачивается главным образом на образование этих вихрей.

В 1872 году английский инженер и проектировщик кораблей Вильям Фруд (William Froude, 1810–79) провел по поручению Адмиралтейства серию экспериментов в Торки (Torquay). Пластины и доски с различной обработкой поверхностей буксировались за концы в большом бассейне с неподвижной водой. Буксир был снабжен динамометром, и автоматически отмечались скорость и лобовое сопротивление (137).

Основные результаты Фруда состояли в следующем: (1) сопротивление текучей среды в значительной степени меняется в зависимости от состояния поверхности; (2) оно пропорционально v^n , где n зависит от характера поверхности (n убывает до некоторого предела с возрастанием длины, но не зависит от скорости); (3) общее сопротивление среды возрастает вместе с длиной, хотя сопротивление на один квадратный фут убывает при возрастании длины.

Вследствие вязкого сопротивления части поверхности, близкие к носовой части буксируемого тела, сообщают движение воде, причем в кормовой части поверхности сопротивление на единицу площади меньше. Скорость сопровождающего потока возрастает до тех пор, пока на поверхности достигается равновесие между количеством энергии, передаваемой в секунду сопровождающему потоку, и энергией, рассеиваемой в окружающей воде на образование вихрей и на приведение в движение большего объема этой воды, против вязкого сопротивления.

¹³⁵⁾ O. E. Meyer. Über die Reibung der Flüssigkeiten. Berlin. Poggend. Ann. Bd 113. S. 400.

¹³⁶⁾ Mémoires de l'Institut de France, t.III, 1813, p.282, Paris.

¹³⁷⁾ См. Inst. Naval Architects, March, 1898. См. также А. Н. Gibson. Hydraulics and its Applications. London: Constable & Co. Ltd, 1908.

После этого, — заключает Фруд, — скорость потока и сопротивление на квадратный фут поверхности остаются приблизительно постоянными.

В действительности исследования Фруда были шире, чем буксировка пластин. Например, он участвовал в проектировании, изготовлении и калибровке знаменитого гидравлического динамометра Хинана (Heenan) и Фруда, который сделал возможными его собственные эксперименты и эксперименты других. Он провел также теоретические исследования, одним из наиболее известных результатов которых было так называемое число Фруда ${\rm Fr}=v^2/lg$, где l характеризует длину тела, а g — ускорение силы тяжести. Это безразмерное число, вообще говоря, не представляет интереса для аэродинамики, но весьма важно в проектировании судов, где гравитационные силы, действующие на волны, главным образом и определяют полную силу.

Мы еще встретимся с именем Фруда в разделе, посвященном воздушным пропеллерам. Фигурально выражаясь, то, что он сделал в воде, немецкий инженер Цам (Zahm) сделал в воздухе¹³⁸⁾. Цам был, по-видимому, первым человеком в истории аэродинамики, предпринявшим программу исследований о природе и количественных законах воздушного трения на стенах аэродинамической трубы. Полученные им результаты были аналогичны результатам Фруда, но, конечно, абсолютные величины были пропорциональны соответственно плотностям массы воды и воздуха. Если, — говорил он, — отношение кинематических вязкостей воды и воздуха составляет 13:1, то скорости в воде доски в 4 фута, равной 10 футам в секунду, должна соответствовать скорость в воздухе доски в 16 футов, равная 32,5 футов в секунду. Таким образом, принимая сопротивление воздуха пропорциональным $v^{1,85}$, мы видим, что при этой скорости сопротивление на квадратный фут для доски в 16 футов должно быть $0,000457 \times (3,25)^{1,85} \le 0,00402$ фунтов, и так как закон $R \propto v^2$ дает 0,00325 для 4-футовой доски в воде, то отношение обеих величин составляет 855, что примерно на 4 процента больше отношения плотностей воды и воздуха при 60° F.

Однако быстро растущие практические нужды требовали еще большей точности, которая и была достигнута Людвигом Прандтлем, создателем теории пограничного слоя 139). То, что Фруд и другие пыта-

¹³⁸⁾ Phil. Mag., 1904. V. 8.

¹³⁹⁾ L. Prandtl. Ueber Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. Verhandl. d.III.

пись решить экспериментально, он решил теоретически и экспериментально. Он предположил, что частицы текучей среды, непосредственно примыкающие к твердой поверхности (досок Фруда или других тел), остаются в состоянии без скольжения, то есть неподвижны по отношению к поверхности. Но по мере возрастания расстояния от поверхности частицы движутся все быстрее. На определенном расстоянии δ , называемом «толщиной пограничного слоя», они движутся с той же скоростью, что и поток вне слоя этой толщины. Характер изменения ν внутри пограничного слоя показан на рис. 99.

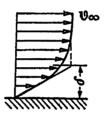


Рис. 99. Профиль скоростей в пограничном слое.

Полагаю, следует прибавить, что в действительности Прандтль был не первый, кто пытался решить интегродифференциальные уравнения вязкого течения — уравнения Навье — Стокса. Уже в 1851 году Стокс сумел решить их для частного случая движения сферы и получил свою знаменитую формулу для лобового сопротивления, испытываемого сферой радиуса $r_0: D=6\pi\mu v_\infty r_0$. Он был также не первый, открывший существование профиля скоростей. Например, как писал Гаген (Hagen) когда наблюдают течение окрашенной воды в стеклянной трубке, то становится очевидно, что при низких давлениях температурах жидкость течет чрезвычайно тонкими коаксиальными концентрическими цилиндрами, параллельными и вложенными друг в друга. Следует упомянуть также Пуазейля, теоретически доказавщего, что эти цилиндры (Гагена) движутся с различными скоростями, причем профиль их скоростей поперек течения является параболой с максимальной скоростью на оси трубки.

Internat. Mathem. Kongr., Heidelberg, 1904.

¹⁴⁰ Abhandl. der Kgl. Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1869, 2B, S.1, 2.



Рис. 100. Образцы турбулентных слоев.

Но подход Прандтля к этой проблеме был иным и оригинальных. В его теории пограничного слоя поток (в пограничном слое) над передней частью твердой поверхности является ламинарным; но на некоторой стадии (именуемой точкой перехода) происходит заметное, более или менее резкое изменение — толщина турбулентного граничного слоя растет быстрее, чем толщина ламинарного граничного слоя (рис. 100), и поскольку вихри или турбулентные флуктуации доставляют эффективный смешивающий механизм, распределение скоростей там более равномерно, чем в ламинарном пограничном слое.

Кроме Прандтля экспериментальные и теоретические исследования пограничных слоев производились много лет во многих странах. Вероятно, одной из самых полных и лучших публикаций на эту тему была книга Л. Г. Лойцянского «Аэродинамика пограничного слоя», Москва, 1941¹⁴¹). Но, как согласятся все исследователи в этой области, при всей красоте полученных ими математических результатов некоторые аспекты проблемы нуждаются в дальнейшем изучении. Все же есть значительные достижения, и некоторые из рабочих формул имеют достаточно простой вид.

Решение дифференциальных уравнений движения вязкой жидко

¹⁴¹⁾ Главшые результаты этой ценной работы были включены в книгу Лойцянского «Механика жидкости и газа», М., 1959.

сти оказалось чрезвычайно трудным. Поэтому Блазиус (Blasius) рассмотрел бескопечно тонкую пластину длины L в однородном потоке несжимаемой жидкости скорости v_0 с плотностью ρ и вязкостью μ и попытался получить приближенное решение не для конечной длины L, а для бесконечно длинного расстояния Ox, частью которого является L. Затем он использовал решение на отрезке $0 \le x \le L$. Предполагалось, что скорость потока v_0 , а тем самым и давление ρ постоянны вдоль границы; на переднем крае пластины толщина слоя предполагалась равной нулю. В этих условиях он получил для ламинарного граничного слоя при плоской пластине следующие результаты:

толщина
$$\delta_L=rac{4\cdot 64x}{\sqrt{\mathrm{Re}\,x}},$$
 напряжение сдвига $au_L=0,332\sqrt{rac{\mu\rho v_0^3}{x}},$ коэффициент лобового сопротивления трения $C_{fL}=rac{0,664}{\sqrt{\mathrm{Re}\,x}},$

где Re x — локальное число Рейнольдса, а x — расстояние от переднего края.

Таким образом, определение части лобового сопротивления, связанной с (вязким) трением, стало реальностью. В самом деле, зная C_{fL} , можно вычислить полное давление трения по формуле, теперь уже ставшей классической:

$$D_{fL} = 2 \int_{0}^{L} \tau_{L} dx = 2 \cdot \frac{C_{fL} \rho v_{0}^{3}}{2} = 1,328 \sqrt{\mu \rho L v_{0}^{3}}.$$

Впрочем, надо иметь в виду, что в приближении Блазиуса были введены некоторые упрощения; например, невозможно создать бесконечно тонкую плоскую пластину. И все же предыдущие результаты удовлетворяют важные потребности инженерной практики.

Турбулентный пограничный слой и срыв потока

Что касается турбулентного пограничного слоя, то это гораздо более сложное явление, требующее специального изучения и экспериментального исследования. Ряд основных данных по этому вопросу

получил Осборн Рейнольдс¹⁴²⁾, но требовалась дальнейшая информация. Теодор фон Карман предложил единую теорию пограничного слоя, охватывающую пограничный слой в целом и не требующую решения дифференциальных уравнений в частных производных¹⁴³⁾, а Карл Польгаузен (Karl Polhausen) продемонстрировал преимущества такой теории¹⁴⁴⁾.

Эти и другие исследования привели к следующим рабочим формулам для турбулентного пограничного слоя:

$$\delta_T = rac{0,371x}{\sqrt[5]{{
m Re}\,x}},$$

$$au_T = 0,0225
ho v_0^2 \left(rac{
u}{v_0 \delta_T}
ight)^{1/4},$$

$$C_{fT} = rac{0,072}{{
m Re}\,x^{0,2}}.$$

Имеются также формулы для смешанного граничного слоя и различные видоизменения этих формул. Почти все они содержат число Рейнольдса, что подчеркивает историческое значение исследований Осборна Рейнольдса. Но проблема турбулентности выходит далеко за пределы пограничного слоя. Не свободны от турбулентности потоки воды и воздуха, проходящие мимо естественных препятствий, лодок, кораблей, пловцов, домов, сухопутных экипажей, мостов и т. д., а также потоки в трубах, тоннелях, печных трубах и т. д. Можно даже утверждать, что ни одна реальная жидкость не течет без турбулентности.

Рассмотрим поэтому более общим образом поведение частиц жилкости. Они поступают на передний край тела с кинетической энергией $mv^2/2$ или $\rho v^2/2$. Но как только они входят в пограничный слой, они сталкиваются с сопротивлением вязкого трения. Преодоление его поглощает часть кинетической энергии. Таким образом, $mv^2/2$ или $\rho v^2/2$ становится все меньше, движение становится все медленнее, и частицы все больше «устают». Наконец, в определенном месте величина $mv^2/2$

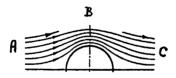
¹⁴²⁾ Phil. Trans. A, 174, 1883 и 1895.

¹⁴³⁾ Über laminare und turbulente Reibung, ZAMM, S. 233-52: 1921.

¹⁴⁴⁾ Zur n\u00e4herungsweisen Integration der Differentialgleichungen der laminaren Grenzschicht, ZAMM, S. 252-68: 1921.

или $\rho v^2/2$ становится столь малой, что частица не может больше продолжать свое упорядоченное движение — сначала она останавливается или почти останавливается, а затем отделяется от поверхности, то есть от пограничного слоя.

Но это еще не все. Если взять, например, полуцилиндр (рис. 101), то мы видим, что поперечное сечение потока в области A велико, а потому вследствие закона Леонардо vA = const скорость v относительно мала; а это значит, что вследствие интеграла Лагранжа давление р относительно высоко. Кода же частицы попадают в область B, то площадь сечения убывает, а потому v возрастает и p убывает. Присмотримся теперь к их дальнейшему движению: в области C поперечное сечение снова велико, а потому v относительно мало и p относительно высоко, т. е. $p_B < p_C$, а это значит, что от B до C частицы движутся против более высокого давления. Если нет вязкости, то кинетическая энергия, приобретенная между А и В, в точности достаточна, чтобы преодолеть возрастающее сопротивление между B и C. Но в реальных потоках частицы приобретают (между A и B) не так много кинетической энергии, как в случае идеального потока (вследствие вязкого трения), а на пути от B до C эти частицы не свободны от вязкого сопротивления.



Puc. 101. Потенциальный поток мимо полуцилиндра.

Поэтому в некотором месте частицы останавливаются и срываются. За точкой срыва текучая среда движется в обратном направлении (вклейка 14).

К сожалению, мы не можем входить здесь в детали этих чрезвычайно интересных явлений. Но нельзя не упомянуть, что почти сразу же после установления первых фактов перехода в новое состояние и срыва люди стали с ними «бороться». Бетц, Аккерет, Флеттнер, Александр Фавр, Д. Ф. Рябушинский и другие пытались выработать методы, задерживающие или предотвращающие срыв потока.

Методы, задерживающие срыв потока

Профессор Рябушинский сказал однажды — и это можно заметить в его публикациях¹⁴⁵⁾, — что как только он прочел теорию пограничного слоя Прандтля, его немедленная реакция была «изобрести метод, предотвращающий образование такого слоя», и тем самым «исключающий все его неприятные последствия для потоков». В 1912 году он начал разрабатывать свое приспособление — подвижную поверхность. В работе, опубликованной в 1914 году, эта идея была уже развита им до уровня, изображенного на рис. 102. Это дает основное представление (Рябушинский опубликовал также соответствующую математическую теорию аэродинамического явления), тогда как вклейка 16 показывает действительно построенную и использованную подвижную поверхность, которую он называл «бесконечным поясом».

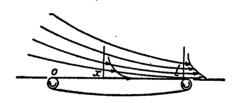


Рис. 102. Схема подвижной основы Рябушинского.

Как уже было сказано, Антон Флеттнер намеревался использовать это приспособление вместо единичного ротора, надеясь добиться таким образом резкого возрастания аэродинамической циркуляции и тем самым самой роторной силы.

Геттингенский центр экспериментальной аэродинамики пытался решить проблему предотвращения раннего срыва потока путем удаления низкоэнергетических частей пограничного слоя или путем прибавления кинетической энергии пограничному слою. Это можно было бы сделать — и в самом деле это делается — с помощью вдувания высокоэнергетического воздуха через направленные назад щели (рис. 103).

¹⁴⁵⁾ D. Riabouchinsky Étude sur l'hypersustentation et la diminution de la résistence à l'avancement. SDIT. Paris, 1957.

Наиболее широкие исследования в этом направлении были выполнены Шренком (Schrenk)¹⁴⁶⁾. С помощью единственной всасывающей щели он сумел предотвратить срыв потока с толстого крыла и таким образом увеличить его максимальный коэффициент подъемной силы почти до 5, то есть примерно втрое.

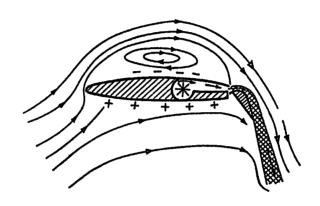


Рис. 103. Метод вдувания высокоэнергетического воздуха через направленные назад щели.

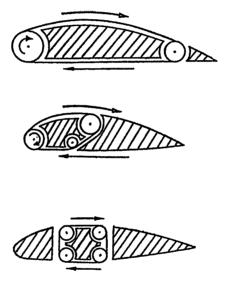


Рис. 104. Крыло Юрьева с подвижной поверхностью.

Около 1925–27 годов Б. Н. Юрьев (СССР) предложил крыло с полвостью подвижными поверхностями. "Десятью годами спустя по его

Experiments with a wing from which the boundary layer is removed by suction, NACA TM No. 634, 1931, No. 773, 1935, a TAKKE TM No.534. Oskar Schrenk: 1929.

настоянию я предпринял теоретическое и экспериментальное изучение подобного крыла: оно имело 1 метр в длину и 22 см в поперечнике (рис. 104). Оно было испытано в аэродинамической трубе Т-1 Военновоздушной академии имени Жуковского в Москве, но оказалось технически неудовлетворительным. Тогда мы построили более простые крылья с полностью или частично подвижными поверхностями; некоторые из них работали очень хорошо и задерживали срыв потока до примерно 25° угла атаки (рис. 105). На вклейке 17 изображено крыло Александра Фавра (Марсель), задерживавшее отделение до 105° угла атаки¹⁴⁷⁾.



Puc. 105. Крылья Токати с подвижными поверхностями.

Наконец, несколько слов о так называемых высокоподъемных приспособлениях. Чтобы понять эти работы, нам надо познакомиться с новым именем: это Сергей Алексеевич Чаплыгин (1869–1942), близкий друг и коллега Жуковского, один из самых выдающихся математиков и аэродинамиков в России и в СССР. Его вклады в теоретическую механику текучих сред были фундаментальны и остаются до сих пор в числе

¹⁴⁷⁾ Г. А. Токаев. Крыло с движущейся поверхностью. М.: «Самолет», 1940.

 $_{ct}$ высших достижений. Он показал, в своем математически строгом $_{ct}$ ито при любой скорости полета v_{∞} , высоте $\rho=$ const и нулевом угле атаки подъемная сила аэродинамического профиля зависит $_{to}$ то т кривизны профиля. Если средняя линия кривизны есть дуга (рис. 106), то формула для подъемной силы имеет вид $L=2\pi\rho\hbar v_{\infty}^2$. Эта $_{to}$ теорема объясняет полезность различных высотоподъемных устройств, применяемых в современных самолетах, как это показано на рис. 107.



Рис. 106. Теорема Чаплыгина.

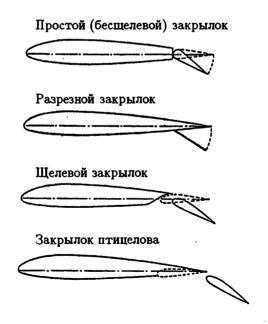


Рис. 107. Типичные высокоподъемные устройства.

Простой закрылок образуется вращением задней части профиля вокруг точки, находящейся внутри контура. Отклонение закрылка книзу меняют кривизну профиля, улучшая тем самым его подъемную силу (можно было бы сказать, что срыв потока задерживается).

Разрезной закрымок образуется отклонением кормовой части нижней поверхности посредством вращения вокруг точки поверхности, находящейся на переднем крае отклоняемой части, что производит сильное увеличение кривизны, и тем самым улучшает максимальную подъемную силу крыла.

Щелевой закрылок образует одну или несколько щелей между главной частью секции крыла и отклоняемым закрылком; они эффективны вследствие увеличения кривизны. Щель (или щели) проводят высокоэнергетический воздух с нижней поверхности на верхнюю и направляют этот воздух таким образом, чтобы задержать срыв потока над закрылком, доставляя управление пограничным слоем. Имеются многочисленные типы щелевых закрылков.

Предкрылки переднего края — это небольшие аэродинамические профили, монтированные впереди переднего края крыла в такой позиции, чтобы они помогали направлять воздух вокруг переднего края под высоким углом атаки, задерживая таким образом срыв потока с этого края. Они могут быть закрепленными или втягиваемыми.

Полную информацию об этих и других высокоподъемных устройствах можно найти почти в каждом учебнике аэродинамики, а также в специальных монографиях¹⁴⁸).

Воздушные винты

Как мы видели, каждое реальное тело, движущееся в любой реальной текучей среде, испытывает определенное сопротивление этой среды — того или иного рода. Как можно преодолеть это лобовое сопротивление? Как можно создавать и поддерживать движение?

Я уже рассказал о реактивной машине Герона, о предложенной Леонардо да Винчи версии водоподъемного винта Архимеда, о геликоптере Ломоносова с противоположно вращающимися лопастями, о пропеллере Рыкачева, приводимом в движение пружиной, и т. д. Все

¹⁴⁸⁾ См., например, Ira H. Abbott and Albert E. von Doenhoff Theory of Wing Sections («Теория сечений крыла»). New York: McGrow-Hill Book Co, Inc., 1949.

это были предшественники современных двигательных систем, которые можно разбить на три категории: воздушные винты, реактивные двигатели и ракетные моторы. Во всех этих системах применяются принципы механики текучих сред.

Воздушный винт или пропеллер — это устройство для продвижения тела через атмосферу. У него есть лопасти, действующие, грубо говоря, как крылья самолета и производящие силу, необходимую для преодоления сопротивления воздуха и вместе с тем инерции воздушного корабля. Классический пропеллер состоит из втулки и двух или более лопастей. Втулка конструируется таким образом, что может монтироваться на вращающем ее двигателе самолета, сообщая тем самым лопастям вращательное движение в плоскости, примерно перпендикулярной направлению его движения (рис. 108).

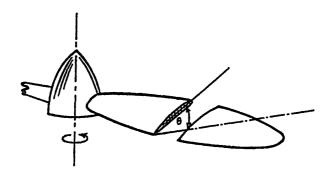


Рис. 108. Основная схема воздушного винта.

Теория движения под действием пропеллера была начата в Англии В. Дж. М. Ранкином (W. J. M. Rankine) и другими¹⁴⁹⁾. Теория Жу-ковского была основана на так называемых «вихревых дорожках»; она известна под именем вихревой теории. Теория Ранкина была основана

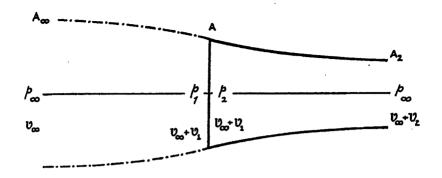
^{149) (}Transactions of the Institute of Naval Apchitects, Vol.6, 1865), H. E. Жуковский в России (Собр. Соч., т.VI), О. Фламм (О. Flamm) в Германии (Die Schiffschraube und ihre Wirkung auf das Wasser (Судовой винт и его действие на воду), 1910), Р. Е. Фруд (R. E. Froude) в Англии (Transactions of the Institute of Naval Architects, Vol. 30, 1889).

на законе сохранения импульса среды; поскольку она доминировала в течение долгого времени, она заслуживает подробного описания.

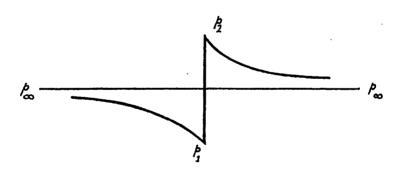
Хотя число лопастей пропеллера ограничено, для простоты допускают, что число лопастей бесконечно, так что действующая сила винта имеет осевую симметрию и равномерно распределена по всему диску. заметаемому лопастями. Тогда пропеллер можно рассматривать как устройство, создающее скачок давления, скажем, от p_1 до p_2 , при пересечении диска спереди назад. Давление впереди пропеллера пред. полагается равным давлению окружающей среды, значение которого обозначим p_{∞} , и оно должно вернуться к этому значению где-то за диском, в продолжении спутной струи (рис. 109). В. П. Ветчинкин (1888-1950), один из ближайших коллег Жуковского и несомненно один из самых выдающихся аэродинамиков первой половины двадцатого столетия (см., например, Собрание сочинений В. П. Ветчинкина, изданное Академией наук СССР, М., 1956), заметил однажды, что крупнейший из недостатков рассматриваемой теории — это «отсутствие надежного знания, что в точности происходит при пересечении диска частицей воздуха». В самом деле, как показали бесчисленные попытки ответить на этот вопрос, кинематические и динамические процессы, происходящие при пересечении плоскости вращения, столь сложны, что не допускают точного математического описания.

Главным образом по этой причине приходится ввести понятие «идеального пропеллера». Это воздушный поток кругового сечения, содержащий пропеллерный диск, внутри которого встречные частицы воздуха приобретают ускорение. Это понятие часто называется концепцией Фруда или движущим диском Фруда, причем предполагается скачок давления, показанный на рис. 110. Как мы увидим, при этом всюду имеется положительный градиент давления, направленный по течению, вследствие чего скорость среды непрерывно возрастает от некоторого значения далеко впереди пропеллера до предельного значения далеко за ним. Поэтому спутный след должен сжиматься, и хотя он существует лишь позади пропеллера, удобно представлять себе, что он распространяется и впереди него, как показано пунктирными линиями на рис. 109.

Поскольку далеко впереди и позади пропеллера давление то x^{e} , что и в окружающем воздухе, и поскольку можно допустить, что такое



Puc. 109. Идеализированная спутная струя Фруда, применяемая в импульсной теории пропеллерной тяги.



Puc. 110. Скачок давления через движущийся диск Фруда

же давление имеется на границе спутного следа, то единственная сила, действующая на воздух во всем спутном следе, это сила осевого давления диска, равная $(p_2-p_1)A$. Масса воздуха, проходящая за единицу времени через спутную струю, удобно оценивается в самой плоскости пропеллера, где она равна $\rho A(v_{\infty}+v_1)$. Полное приращение скорости этой массы воздуха равно v_2 , так что изменение импульса спутного следа равно $\rho A(v_{\infty}+v_1)v_2$, вследствие чего $p_2-p_1=\rho(v_{\infty}+v_1)v_2$.

С другой стороны, применяя к потоку впереди и позади диска заков Бернулли — Лагранжа, получаем $p_2-p_1=\rho(v_\infty+v_1)v_2$. Сравнивая оба выражения, находим, что $v_2:=2v_1$; это так называемая теорема Фруда — Финстервальдера (Finsterwalder). Таким образом, импульсная сила принимает вид $T=(p_2-p_1)A=2\rho A(v_\infty+v_1)v_1$.

Насколько эффективен идеальный пропеллер — движущий диск, производящий это осевое давление? Ответ можно дать следующим образом. Полезная сила равна нажиму, умноженному на скорость v, с которой пропеллер движется вперед, $E_0 = Tv_{\infty}$, тогда как затраченная сила равна осевому давлению, умноженному на скорость воздушного потока через диск, то есть $E_i = T(v_{\infty} + v_1)$. Сравнивая две этих силы, получаем так называемую идеальную эффективность пропеллера:

$$\eta = \frac{Tv_{\infty}}{T(v_{\infty} + v_1)} = \frac{v_{\infty}}{v_{\infty} + v_1}.$$

Следует заметить, впрочем, что в этой теории нигде не учитываются столь важные факты, как образование вихрей, трение в пограничном слое, действие сжимаемости и т. д. — вообще, сопротивление воздуха, вызванное движущимися лопастями. Поэтому эффективность идеального пропеллера значительно выше эффективности реального пропеллера. Другой недостаток теории состоит в том, что она ничего не говорит об аэродинамическом конструировании лопастей, создающих осевое давление.

Д. П. Рябушинский одним из первых подчеркнул эти недостатки, предложив способы их преодоления. Результаты его теоретических и экспериментальных исследований характеристик водяных и воздушных винтов были опубликованы в «Кучинском бюллетене» в январе 1909 года. Примерно в то же время, в 1908 году, Р. Е. Фруд изложил результаты своих экспериментов с моделями винтовых судов. Как писал Рябушинский (150): «Теоретические формулы, полученные мною и Фрудом, расходятся, так же как и наши определенные из опыта коэффициенты; но есть и более серьезные возражения против применения

¹⁵⁰⁾ Заинтересованные в этом вопросе могут обратиться к следующим первоисточникам: Bulletin de l'Institut Aérodynqamique de Koutchino, December, 1909. Bulletin de l'Institut Aérodynamique de Koutchino, January, 1909. Étude sur l'hypersustentation et la diminution de la résistance à l'avancement, par Dimitri Riabouchinsky, Paris: 1940.

формулы Фруда во всех случаях. А именно, при изучении распределения скоростей в спутном следе за стационарным воздушным винтом шага h автор (т. е. Рябушинский) никогда не наблюдал осевых скоростей порядка 2nh, где n— число оборотов. Скорости, в самом деле наблюдавшиеся, приближались к nh и никогда не превосходили этого предела».

При другом подходе к теории пропеллера, называемом «теорией элемента лопасти», лопасти рассматриваются как вращающиеся крыпья. Зная или предполагая известными аэродинамические характеристики профильного сечения элемента лопасти и принимая во внимание тот факт, что скорость воздуха по отношению к элементу зависит от радиального расстояния и от поступательной скорости пропеллера, можно вычислить его подъемную силу и лобовое сопротивление. Интегрируя по всем элементам лопасти и по всем лопастям, можно оценить силу осевого давления и вращающий момент пропеллера.

Джевецкий (Drzewiecki) пришел к выводу, что было бы неправильно использовать характеристики аэродинамических профилей, полученные из двумерных испытаний в аэродинамической трубе, но следует учесть тот факт, что характеристика формы лопастей (отношение размаха к хорде) конечно. Возникает вопрос, какую характеристику формы надо брать, поскольку лопасти работают в условиях, отличных от работы крыла, так что испытания крыльев с той же характеристикой формы могут дать неподходящие данные. Джевецкий предложил ряд испытаний на специальных пропеллерах, которые могли доставить множество данных для проектирования. Одно из следствий теории элемента лопасти состоит в том, что когда лобовое сопротивление приближается к нулю, то эффективность пропеллера приближается к единице — в то время как импульсная теория, описанная выше, предсказывает эффективность меньше единицы. Видимое расхождение разрешается тем, что теория элемента лопасти и импульсная теория не противоречат друг другу и должны использоваться совместно, по-^{СК}ОЛЬКУ КАЖДАЯ ИЗ НИХ ДОСТАВЛЯЕТ ИНФОРМАЦИЮ ТАМ, ГДЕ ЕЕ НЕДОСТАЕТ другой.

Примирение теории элемента лопасти и импульсной теории было целью исследований во многих странах в виде логического расширения теории крыла, значительно развившейся около 1920 года. Теория крыла, рассмотренная выше, основана на представлении, что подъемная сила обусловлена циркуляцией вокруг крыла, и что поскольку эта циркуляция, или «граничный вихрь», не может вдруг исчезнуть на концах крыла, то из крыла вытекают свободные вихри, следующие за ним. Подъемная сила отдельного элемента крыла просто связана с местной циркуляцией, и изменение циркуляции от элемента к элементу определяет силу свободных вихрей. Эти свободные вихри, в свою очередь, порождают индуцированную скорость на самом крыле, вносящую свой вклад в локальное направление потока, так что, зная подъемные характеристики сечения, можно найти локальную подъемную силу. Это словесное описание математически выражается двумя уравнениями, связывающими локальную подъемную силу с индуцированной скоростью, которые в сочетании приводят к известному «интегральному уравнению» для подъемной силы крыла¹⁵¹).

В точности тот же подход применили в случае пропеллера Г. Глауэрт (H. Glauert) (1894-1934)¹⁵²⁾, Э. Пистолези (E. Pistolesi)¹⁵³⁾ и С. Кавада (S.Kawada)¹⁵⁴⁾. Однако в случае пропеллера свободные вихри не прямолинейны, а лежат, грубо говоря, на спиральных путях, описываемых производящими их элементами лопастей, отчего происходят вихревые слои (вклейка 18). Если бы пропеллер имел бесконечное число лопастей, то вихревые линии сливались бы, образуя вихревые цилиндры. Тогда была бы радиальная симметрия, и одно из интересных следствий этого заключалось бы в том, что влияние вихрей, вытекающих из элемента лопасти, ограничивалось бы кольцом, заметаемым одним этим элементом, а это резко контрастирует с теорией крыла, где соответствующие вихри влияют на все другие части крыла, так что общий эффект в любом сечении крыла может быть получен лишь интегрированием по всему крылу. Эта так называемая «независимость лопастных элементов» весьма упрощает теорию пропеллера, заменяя упомянутое выше интегральное уравнение в теории крыла более простым

¹⁵¹⁾ Страницы 230-234 написаны главным образом д-ром А. Р. С. Брамуеллом (А. R. S. Bramwell), старшим преподавателем Отделения аэронавтики Лондонского городского университета.

¹⁵²⁾ British A. R. C. R&M 786 n 869, 1922.

^{153) &}quot;Vorträge aus dem Gebiete der Hydro- und Aerodynamik" («Работы по гилро- и аэродинамике»), Innsbruck: 1922.

¹⁵⁴⁾ Tokyo Imperial University, Aero. Res. Inst., No.14, 1926.

уравнением для импульса. Поскольку индуцированная скорость, создаваемая осевым давлением на кольце, действует только на это кольцо, то можно получить соотношение между скоростью и осевым давлением, рассматривая быстроту изменения импульса воздуха при переходе через кольцо. Это соотношение было уже получено для всего диска. Для кольца радиуса r и ширины dr соответствующая площадь равна $2\pi r\,dr$, и уравнение Фруда — Финстервальдера обычно записывается в дифференциальной форме:

$$dT = 4\pi r(V + v_1)v_1 dr.$$

Лопасть пропеллера можно рассматривать как сильно закрученное крыло; это необходимо, чтобы каждая секция лопасти работала при благоприятном угле атаки α (рис. 111). Каждая отдельная секция выполняет два одновременных движения: она движется вперед со скоростью самолета V и вращается вокруг оси со скоростью $u=\omega r=2\pi rn$, с результирующей скоростью W, где n— число оборотов в секунду.

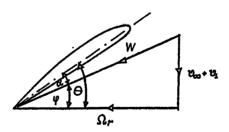


Рис. 111. Элемент лопасти пропеллера.

Рассматривая секцию лопасти как секцию крыла и выражая локальный угол атаки φ через осевую и касательную составляющие скорости, получаем выражение осевого давления на кольцо из b лопастей:

$$dT = \frac{1}{2}b\rho cW^2(C_L\cos\varphi - C_D\sin\varphi)\,dr.$$

Конечно, угол атаки φ зависит от v_1 , так что неизвестную v_1 можно исключить из двух полученных таким образом уравнений для dT, а затем вычислить dT. Таким образом, эти два уравнения математически

соединяют принципы импульса и элемента лопасти, которые прежде не удавалось совместить. Аналогичные соотношения существуют для вращательного момента.

Когда уже вычислены осевое давление и вращательный момент, эффективность всего пропеллера находится в виде

$$\eta = \frac{TV}{\omega Q}.$$

Так называемое «отношение поступи»

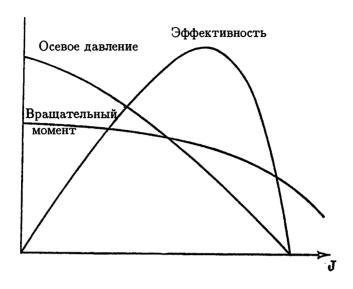
$$J = \frac{V}{nD},$$

где n — число оборотов в секунду и D — диаметр пропеллера, есть масштабный фактор, постоянное значение которого обеспечивает работу ряда пропеллеров в геометрически подобных условиях. Отношение поступи измеряет расстояние, проходимое пропеллером в течение одного оборота, а также наклон вихревой дорожки в спутной струе пропеллера. Если вычислить осевое давление, вращательный момент и эффективность для ряда значений J и изобразить их зависимость от этой величины, для заданного угла наклона лопасти, то получается рис. 112.

Эти кривые зависят от угла наклона лопасти, и обычно ряд таких кривых приводится с указанием, например, наклона лопасти у оси в качестве параметра. Скорость вращения пропеллера обычно поддерживается постоянной в течение полета, так что J становится мерой скорости полета. Из вида кривых ясно, что эффективность очень существенно меняется в зависимости от скорости полета, если угол наклона лопасти фиксирован, а потому максимальная эффективность достигается при наибольших скоростях полета, в особенности при наборе высоты. Это требование привело к развитию воздушных винтов с переменным шагом, у которых угол наклона лопасти может быть изменен вручную или, что более обычно, автоматически.

Как показал А. Бетц¹⁵⁵⁾, в случае пропеллера с конечным числом лопастей минимальная потеря энергии и тем самым наибольшая эффективность получается в том случае, когда вихревой слой (рис. 109,

¹⁵⁵⁾ Handbuch der Physik. 1927. V. 7. P. 256



Puc. 112. Типичные характеристики пропеллера.

стр. 227) образует жесткую винтовую поверхность постоянного шага, движущуюся назад вдоль оси пропеллера с постоянной скоростью относительно окружающего воздуха. Поток вокруг этих вихревых слоев тесно связан с циркуляцией вокруг лопастей и, следовательно, с осевым давлением пропеллера. Если можно вычислить скачок потенциала при пересечении слоев, то, поскольку этот расчет зависит от числа лопастей и от расстояния между слоями, можно сравнить осевые давления пропеллеров с разным числом лопастей. Эта задача очень трудна в математическом отношении, и ее первое решение, опубликованное Л. Прандтлем в Приложении к геттингенской работе Бетца, было получено сведением задачи к двумерной задаче, в которой кривые вихревые слои заменялись рядом бесконечных плоских слоев. Из результатов следовало, что пропеллер с конечным числом лопастей менее эффективен, чем с бесконечным числом, вследствие большой радиальной компоненты индуцированной скорости, возникающей вблизи концов лопастей. Прандтль представил эту потерю эффективности как эффективное сокращение радиуса лопастей. Полное трехмерное решение получил С. Гольдштейн (S. Goldstein) 156).

К концу тридцатых годов скорости самолетов стали настолько велики, что скорости концов пропеллера приблизились к скорости звука, с соответствующим падением эффективности вследствие уменьшения подъемной силы и увеличения лобового сопротивления, испытываемого наружной частью лопасти. Появились проекты, использующие принцип прямой стреловидности и придававшие лопастям вид ятагана*), но дальнейшее развитие этих работ прекратилось вследствие появления реактивного двигателя. Впрочем, пропеллеры все еще вызывают активный интерес, так как они применяются в аппаратах вертикального взлета и посадки (VTOL, vertical take-off and landing) — самолетах и вертолетах. В последнем случае ротор следует теории пропеллера при зависании и вертикальном полете, но при полете вперед ротор наклоняется по отношению к воздушному потоку; между тем теория вихревой дорожки столь сложна, что еще не достигла удовлетворительного состояния.

Внутреннее строение текучих сред

Любая текучая среда является носителем различных форм энергии. Но можно спросить, в чем внутренний источник этих проявлений энергии? Почему, например, плотность газа зависит от приложенного к нему внешнего давления?

Напомним сначала некоторые основные представления, развитые в начале книги. Текучей средой называется состояние вещества, при котором лишь равномерно изотропное¹⁵⁷⁾ давление может поддерживаться без неограниченного искажения. Совершенная текучая среда свободна от трения и потому не сопротивляется потоку, за исключением своей инерции. Однородная текучая среда имеет везде одинаковое строение и одинаковые свойства. Изотропная текучая среда имеет локальные свойства, не зависящие от вращения оси координат, вдоль которой измеряются эти свойства. Несжимаемая текучая среда — это

¹⁵⁶⁾ On the vortex theory of screw propellers, Roy. Soc. Proc. (A), 1929. V. 123, P. 440

^{*)} Ятаган — турецкая сабля с кривым клинком. — Прим. перев.

¹⁵⁷⁾ Isos = подобный, равный + tropos = способ поведения.

среда, плотность которой существенно не меняется при изменении давления. Упругая текучая среда — это среда, в которой упругие напряжения и гидростатические давления велики по сравнению с вязкими напряжениями. Ньютонова текучая среда — это вязкая среда, в которой вязкие напряжения кратны градиенту деформации, и посредующую роль в этой пропорциональности играет вязкость. Максвеллова текучая среда — это вязкая среда, в которой отношение между деформацией и напряжением включает эффект релаксации упругих напряжений, вызываемый внезапной деформацией. Тиксотропная текучая среда — это среда, в которой вязкость зависит не только от сдвигающего напряжения, но и от предыдущей истории движения внутри среды¹⁵⁸).

Все эти классы текучих сред обладают свойством текучести, способностью течь. Текучесть — это мера скорости, с которой среда деформируется сдвигающим напряжением; она математически обратна вязкости. Единица текучести — это обратный «пуаз», а пуаз — это единица коэффициента вязкости, определяемая как касательная сила на единицу площади (в динах на см²), необходимая для поддержания единичной разности скорости (1 см/сек) между двумя параллельными плоскостями в жидкости на расстоянии в 1 см (1 пуаз = 1 дина \cdot сек/см² = 1г/см \cdot сек).

Еще сравнительно недавно считалось, что текучесть — это не что иное, как перекатывание маленьких сфер среды друг по другу и проталкивание их через промежутки между ними. Но затем люди осознали, что вещество, в конечном счете, состоит из атомов, более чем девяноста разных видов — атомов химических элементов. У атомов есть собственная электрическая структура, которой мы здесь не занимаемся, и самый тяжелый из них — уран — в двести тридцать восемь раз тяжелее самого легкого — водорода; на один гран веса приходится от 180 до 42000 миллионов миллионов миллионов атомов. Но, как обнаружилось, свойства вещества большей частью зависят от частиц, состоящих из двух или более атомов 159). Оказалось также, что силы притяжения между атомами, особенно те, которые были названы си-

¹⁵⁸⁾ Scientific Encyclopedia (Научная энциклопедия), fourth edition. Van Nostrand.

¹⁵⁹⁾ См., например, Sir George Thomson The Atom. (Fifth Edition). (Атом). London: Oxford University Press, 1957.

лами химического сродства, в земных условиях очень могущественны внушая почти всем видам атомов ужас перед одиночеством; так что подавляющее большинство атомов собирается в сочетания двоякого рода — молекулы и кристаллы. Теперь надо отметить два основных свойства самих атомов. Первое из них — это межатомное притяжение главным образом в форме химического сродства; второе — тепловое движение. Это последнее происходит от бесконечного движения атомов. Одинокий атом, как можно себе представить, мчится по прямой линии со скоростью в несколько ферлонгов*) в секунду, пока не встретится с препятствием, стеной или другой летящей частицей, и тогда он либо прилипает к этому объекту (адгезия, когезия, химическое соединение), или продолжает двигаться в другом направлении. Его скорость снижается на холоде и возрастает с повышением температуры. Когла атомы соединяются, то возникающие молекулы продолжают нестись примерно таким же образом, но с меньшей скоростью, соответствующей их большему весу. Здесь нет сомнений, что мы имеем дело по существу с разрушительной силой, противодействующей атомному или молекулярному притяжению; как известно, на перекатывающихся камнях не образуется мох. Весь мир вещества можно себе представить как игру между этими двумя противоположными силами, и результат состоит в том, что чем ниже температура, тем, вообще говоря, более тесно сложено вещество.

Самый удивительный результат когезии состоит в том, что она разделяет все вещество на три агрегатных состояния: твердое, жилкое и газообразное. Лед — это твердое тело, но его можно растопить, превратив в воду, а воду можно обратить в пар. В точке кипения $(100^{\circ}\,\mathrm{C}=212^{\circ}\,\mathrm{F})$ тепловое движение молекул воды становится столь сильным, что предотвращает их слипание. В интервале жилкости между $100^{\circ}\,\mathrm{C}$ и точкой замерзания $(0^{\circ}\,\mathrm{C}=32^{\circ}\,\mathrm{F})$ когезия удерживает молекулы в виде плотно упакованной массы, все еще позволяя тепловому движению перемещать их медленным, нерегулярным движением. Ниже точки замерзания когезия еще более одерживает верх: молекулы или атомы выстраиваются в жесткие, постоянные строения, где каждому из них оставляется лишь столько движения, чтобы соверг

Ферлонг — старинная мера длины в 1/8 мили, т.е. около 200 метров. — Прим. перев.

шать небольшие, но нескончаемые колебания. Это последнее состояние продолжается при более низких температурах до абсолютного нуля (-273° C = -459° F), когда никакое движение уже невозможно.

Я начал этот параграф, отметив, что текучая среда — носитель разных форм энергии. Представление, что тепло — это одна из форм проявления внутренней энергии, возникло задолго до того, как оно было разработано в связную количественную систему, кинетическую теорию газов — главным образом Максвеллом в Англии, Клаузиусом в Германии и Ломоносовым в России. Все они пришли к одному и тому же обобщению: всюду, где есть газ, есть и тепловая энергия. А присутствие газов повсюду вокруг нас очевидно из бесчисленного множества примеров. Мы сооружаем самолеты и воздушные шары, которые могут летать вследствие существования атмосферы. Когда мы быстро бежим, мы ощущаем сопротивление воздуха. Все мы знакомы с ветром. Явление диффузии наводит на мысль о безостановочном движении частиц: утечка газа в нашем жилище дает о себе знать слишком быстро, чтобы ее можно было приписать сквозняку. И так далее, и тому подобное.

Но сколько же газа нас окружает? Поскольку я уже занимался этим вопросом, прибавлю только некоторые замечания. По выражению д-ра В. А. Каспари (W. A. Caspari), «пустой бокал объемом в полпинты на вашем столе содержит вещество (молекулы азота и кислорода, около восьми тысяч миллионов миллионов миллионов таковых), которое само по себе заняло бы лишь около семи тысячных кубического дюйма». Число молекул производит сильное впечатление. Но в действительности эти молекулы движутся столь беспрепятственно, что они, очевидно, встречают очень мало вещества.

Если мы хотим подвергнуть газ давлению, мы должны заключить этот газ в некоторый сосуд и сделать в нем скользящий поршень, или другое подобное устройство; и когда прилагается давление, то оно сразу же распространяется на весь заключенный в сосуде газ. Когда мы закачиваем воздух в автомобильную или велосипедную шину, мы отчетливо замечаем сопротивление нашим механическим усилиям. Объяснение в обоих случаях одно и то же: мы уменьшаем расстояния между молекулами. При каждом сжимающем движении поршня молекулы ударяются о стенки, и их суммарное воздействие составляет

то, что мы называем «давлением». Чем глубже погружается поршень, тем больше давление. И оказывается, что для любого газа объем данного количества газа обратно пропорционален приложенному к нему давлению (закон Бойля, 1662).

Теперь мы готовы к последнему шагу нашего анализа. Среднее атмосферное давление на уровне моря принято за стандартную меру давления, и оно равно 760 мм ртутного столба, или 1,03 килограмма на квадратный сантиметр, или 14,72 фунта на квадратный дюйм. Если поперечное сечение велосипедного насоса составляет 1 квадратный дюйм, то достаточно нажать на поршень с силой около 15 фунтов, чтобы опустить поршень на половину длины насоса. Если бы насос был наполнен водой, та же нагрузка продвинула бы поршень лишь на одну двадцатитысячную этой длины 160). Происходит это оттого, что вода и воздух имеют весьма различную сжимаемость; расстояния между молекулами воды намного меньше, чем в газах. Вследствие разреженного строения газов они имеют несравненно большую сжимаемость.

Занимаясь объемом, весом, плотностью и другими свойствами газа, мы прежде всего спрашиваем: каково его давление? Или, что то же самое: какова его температура? В самом деле, давление газа определяется соотношением p=2/3(E/V), где V— единичный объем, E— энергия поступательного движения молекул, E=3/2RT, а R и T— универсальная газовая постоянная и соответственно абсолютная температура.

Скорость звука

Галилей первый установил, что чем плотнее текучая среда, тем больше ее сопротивление. Христиан Гюйгенс, Лазар Карно, Рене Декарт (1596–1650)¹⁶¹⁾, Дюбуа и другие вывели из этого очевидного факта природы более широкую концепцию: что одна и та же текучая среда

¹⁶⁰⁾ W. A. Caspari. The Structure and Properties of Matter («Строение и свойства вещества»). London: Ernest Benn, Ltd., 1928. Для дальнейшей информации о рассматриваемом предмете, особенно о его ранней истории, мы настоятельно рекомендуем единственную в своем роде книгу — «О природе вещей» Лукреция.

¹⁶¹⁾ Lettres de Mr. Descartes (Письма г-на Декарта). Par la Compagnie des Libraires, Paris, M.DCC.XXIV, 6 volumes.

может оказывать различное сопротивление одному и тому же движущемуся в ней телу. Но этому выводу недоставало ясности, и он долго оставался более или менее абстрактным; если бы его авторы размышляли в терминах «областей застоя» Даламбера, они были бы на правильном пути; но об этом нет свидетельств. Как мы знаем, впрочем, Коши и Лаплас подчеркивали, что их уравнения верны для несжимаемых жидкостей; не слишком ли рискованно заключать отсюда, что они сознавали также эффекты «сжимаемости»? Мы видели выше, что Эйлер и Лагранж, в особенности последний, пытались выработать, и небезуспешно, математические соотношения между ρ и p; можно ли без преувеличения сказать, что и они сознавали значение сжимаемости?

Многие пытались по тем или иным мотивам заниматься этой проблемой. Но был человек, который в некотором смысле подвел итог предыдущим попыткам. Это был Пьер Анри Югонио (Pierre Henri Hugoniot, 1851–87), выдающийся французский баллистик.

Теоремы Гельмгольца не справедливы, если действующие на среду силы не имеют потенциала или если плотность массы ρ не является функцией только от давления p, потому что в таких случаях в потоке могут быть разрывы. Но разрыв стационарен, если поверхность разрыва, хотя и перемещающаяся в пространстве и меняющая свою форму, всегда состоит из одних и тех же частиц среды, или — на математическом языке — если уравнение этой поверхности не содержит времени. Если оно содержит время, то разрыв не связан с одними и теми же частицами среды. В этом случае мы будем говорить, что разрыв представляет собой волну, которая распространяется в текучей среде (как показал Феликс Савар, звуковые волны распространяются в воде таким же образом, как в твердых телах).

Жак Саломон Адамар (Jacque Salomon Hadamard, 1865–1963), Французский математик, показал¹⁶²⁾, что в случае стационарного разрыва нормальная компонента скорости остается непрерывной при переходе через волновую поверхность, что является, между прочим, краеугольным камнем теории ударных волн. Теорема Адамара оказалась в полном согласии с более ранним представлением Югонио (о так называемой «волне ускорения»), позволившим продолжать математические

¹⁶²⁾ Leçons sur la propagation des ondes et les équations de l'hydrodynamique. Paris, 1903.

уравнения через разрывы в среде. Анализ и решение этих уравнений резюмируются следующей фундаментальной теоремой Югонио¹⁶³).

В невязкой сжимаемой текучей среде возможны лишь два вида разрывов: продольные, распространяющиеся со скоростью $\sqrt{dp/d\rho}$, и поперечные, которые вовсе не распространяются и относятся всегда к одним и тем же частицам. Первые из них — это волны, а вторые — стационарные разрывы.

Приведем лишь одно место из анализа Югонио, относящееся к формуле Лапласа $\sqrt{dp/d\rho}$ для скорости звука:

«Установив уравнение движения совершенного газа в адиабатически изолированном цилиндре, мы получаем скорость распространения из уравнения

$$\left(\frac{d\xi}{dt}\right)^2 = \frac{\gamma p}{\rho} \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^{-(\nu+1)}.$$

Если газ находится в покое, то u=0 есть решение, для которого $\partial u/\partial t=0$, а потому

$$\left(\frac{d\xi}{dt}\right)^2 = a^2 = \frac{\gamma p}{\rho},$$

или

$$a=\sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}.$$

Это выражение было известно со времени Лапласа, но никогда не было строго доказано».

Это сказано достаточно ясно, и тот же закон можно вывести для сферических волн.

Впрочем, первым, кто попытался вывести соотношения между состояниями газа до ударной волны и после нее, был Г. Ф. Б. Риман (G. F. B. Riemann); но он допустил ошибку, исправленную впоследствии британским инженером У. Дж. М. Ранкином, а затем Югонио. Риман полагал, что изменение состояния при переходе через фронт ударной волны изотропно, а следовательно, и энтропия останется неизменной, что, конечно, неверно.

¹⁶³⁾ H. Hugoniot. Mémoire sur la propagation du mouvement dans les corps et spécialement dans les gases parfaits. Journal de l'École Polytechnique, Paris. 1887-89.

Я думаю, что термин «скорость звука» несколько неудачен. Может быть, было бы логичнее говорить о скорости распространения малых возмущений, или малых изменений давления, поскольку именно это имеется в виду — что и образует звук. В этом смысле звуковая волна образуется смещениями частиц среды, приводящими к перемещению областей сжатия и разрежения; эти области движутся в направлении, параллельном движению возмущения, что и составляет продольные волны адиабатических колебаний малой амплитуды.

Мы связываем эти явления лишь со сжимаемыми средами, поскольку в несжимаемой текучей среде малые изменения давления или плотности распространяются с бесконечной скоростью, мгновенно приводя в движение сразу всю среду, так что вопрос об акустических волнах не возникает; между тем, в сжимаемой жидкости эти изменения распространяются с конечной скоростью — скоростью звука и играют важную роль в формировании структуры потока в текучей среде.

Эрнст Мах (1838-1916) и другие

Эрнст Мах (Ernst Mach), австрийский физик и баллистик, ставший философом, был одним из создателей сверхзвуковой аэродинамики¹⁶⁴). Как мы увидим, в этой области механики текучих сред изучаются, среди прочих вещей, так называемые ударные волны. Чтобы сделать их видимыми, Мах применил метод "schlieren"*), оптическую систему для наблюдения изменений плотности, изобретенную Августом Йозефом Игнацем Теплером (August Josef Ignaz Töpler, 1836–1912), немецким физиком, работавшим в области акустики¹⁶⁵) (Рис. 113).

E. Mach and L. Mach. Ballistisch Photographische Versuche, Sitzungsberichte der Wiener Akademie der Wissenschaften. 1889. V. 98. E. Mach and P. Salcher. Optische Untersuchung der Luftstrahlen, ibid. 1889. V. 98. Следует также упомянуть другую его знаменитую книгу — «Механику» — критический и исторический обзор развития этого предмета. Английский перевод (The Science of Mechanics. The Open Court Publishing Company. Illinois: La Salle, 1974) содержит превосходное введение Карла Менгера (Karl Menger).

Глагол "schlieren" означает в немецкой морской терминологии «скользить»,
 «стягиваться» (об узлах). — Прим. перев.

¹⁶⁵⁾ Beobachtungen nach einer neuen optischen Methode (Наблюдения с помощью нового оптического метода). A. Töpler, Bonn: 1864.

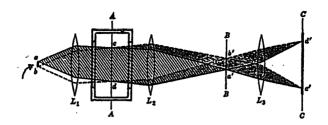


Рис. 113. Механизм скольжения

Якоб Аккерет, другой крупнейший создатель газодинамики, открывший, что отношение скорости потока (v) к скорости звука (a) в этом потоке является важным безразмерным средством исследования в газодинамическом анализе, полагал, что было бы разумно назвать это отношение именем Эрнста Маха, поскольку Мах первым показал, что эффекты сжимаемости в газовых потоках зависят не от v как таковой, но от ее отношения к a. Таким образом появилось число Маха M = v/a; оно показывает, во сколько раз скорость потока больше или меньше скорости звука в этом потоке.

Если M<1, то v<a, а потому поток называется дозвуковым. Если M=1, v=a, поток называется околозвуковым. Если M>1, v>a, поток называется сверхзвуковым. Если $M\geq 5$, $v\geq 5a$, поток называется гиперзвуковым. Впрочем, это несколько искусственные границы. Например, термин «околозвуковой» иногда применяется для описания области чисел Маха, где (1-M) меняет знак, или области, где приближенно $0,82\leq M\leq 1,2$.

Не надо быть аэродинамиком, чтобы выполнить следующий простой эксперимент в пруду, в вашей собственной ванной или в любом сосуде с водой. Выжимая влажную губку, заставим подать на поверхность воды капли, скажем, с промежутками в одну или две секунды. Если они падают в одно и то же место, то вы увидите расходящиеся волновые круги, причем центр возмущения (точка падения капель) остается на одном месте (рис. 114, а). Начните теперь двигать губку, а следовательно и центр возмущения, например, слева направо; тогда вы увидите, что впереди точки возмущения волновые круги сгущаются, а

за нею разрежаются (рис. 114, b). Можно сказать, что точка возмущения гонится за возмущениями впереди нее и убегает от возмущений позади. При $M\approx 1$ источник возмущений догоняет передние круги, и получается рис. 114, c. При M>1 источник движется быстрее распространения создаваемых им возмущений (рис. 114, d).

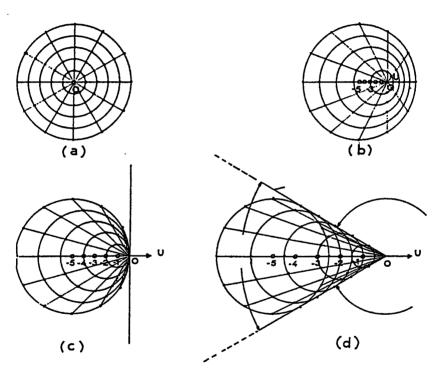


Рис. 114. Этапы формирования конуса Маха.

Если бы вы могли измерить силу какой-нибудь из этих круговых волн, то вы нашли бы, что это очень слабые волны. Когда частица жидкости пересекает такую волну, она испытывает очень незначительные, пренебрежимые для практических целей изменения своей плотности, своего давления, температуры, импульса и т. д. Конечно, то же верно в атмосфере и в любом газе.

Если вы теперь представите себе предыдущую картину в трехмерном пространстве, в атмосфере, то получаются следующие выводы: на рис. 114, а звуковые волны существуют всюду вокруг точки возмущения, т. е. зоны молчания нет; на рис. 114, b передняя зона звука стала уже, а задняя — шире, а следовательно, интенсивность звука сильнее в первой зоне и слабее во второй (поэтому свисток локомотива сильнее при его приближении, чем при удалении); на рис. 114, c звук существует только слева от вертикальной линии, т. е. в зоне справа от нее звуковых волн нет, и вы ничего не услышите; на рис. 114, d все звуковые волны находятся внутри конуса — конуса Маха — а поэтому вся внешняя зона лишена звука.

Напомним наши прежние замечания. Сэр Исаак Ньютон первым вычислил скорость звука, исходя из упругости и плотности воздуха, установленных до него. Из известного закона Бойля (называемого также законом Мариотта), выражающего изотермическое соотношение между давлением и объемом данного количества идеального газа — при постоянной температуре $pv={\rm const}$ — Ньютон вывел, что скорость звука $a=\sqrt{p/\rho}=916\,{\rm ft/sec}=280{\rm m/cek}$. Но опыты показали, что a на 20% выше. Лаплас объяснил, почему сжатие и разрежение в звуковой волне следуют адиабатической кривой Пуассона, т. е. почему они происходят адиабатически. Нагревание в месте сжатия и охлаждение в месте разрежения усиливают происходящие там изменения давления, увеличивая тем самым скорость звука по формуле $a^2=\gamma p/\rho$, где $\gamma=C_p/C_v$.

Из рис. 114, d имеем $\sin \alpha = at/vt = a/v = 1/(v/a) = 1/M$, откуда видно, что угол при вершине конуса Маха будет различен для ньютонова и лапласова значений a; поэтому и следствия, вытекающие из формы конуса, будут различны — в первом случае все строение газодинамики будет содержать серьезные ошибки, а во втором получатся точные результаты. Отсюда ясно, как велика роль Лапласа в истории механики текучих сред.

Поверхность конуса состоит из линий Маха, или возмущений Маха. Подобно волнам, наблюдаемым в вашей ванне, это очень слабые линии в том смысле, что при их пересечении частицы воздуха испытывают бесконечно малые изменения давления, температуры, плотности и скорости. Таким образом, здесь имеется глубокая аналогия ме-

жду явлениями, наблюдаемыми на свободной поверхности воды в вашей ванне, и явлениями в газодинамике (эту аналогию рассмотрел и сформулировал Л. Прандтль в 1928 году).

Сразу же возникает вопрос: что происходит с внутренним физическим состоянием среды внутри волны? Это в действительности один из важнейших вопросов механики сжимаемых сред, впервые поставленный Ирншоу в связи с проблемой максимальной скорости вытекания 166). Через 17 лет этот вопрос был также рассмотрен Югонио.

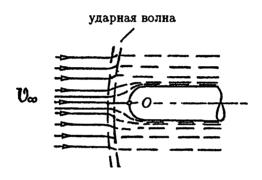


Рис. 115. Образование ударной волны.

К ответу — насколько мы его знаем в настоящее время — ведут два следующих примера (приводимые в нарочито упрощенной форме). Предположим, что когда частица газа, движущаяся по центральной линии потока, попадает в точку застоя O (рис. 115), она теряет всю свою кинетическую энергию $\rho v^2/2$ и останавливается. Частица за ней ударяет в нее; и то же происходит с миллионами других частиц. Таким образом возле точки O образуется зона накопления частиц, где возникает высокое давление и где потерянная кинетическая энергия обращается в тепловую.

Частицы могут ускользнуть лишь двумя способами — вверх или вниз. Они убегают под давлением области застоя, то есть частицы «выстреливаются» из этой области, причем каждая уносит с собой

Samuel Earnshaw. Mathematical Theory of Sound. Rev. Phil. Trans. 1858. V. 150, 133

некоторый момент. Но при движении в поперечном направлении они ударяются о набегающие частицы потока (выше и ниже центральной линии, причем они становятся тем самым источниками возмущения), и вследствие соударения они выпуждены изменить свое направление. Поэтому ударная волна из прямой, перпендикулярной направлению потока, становится кривой. Но непосредственно за обтекаемым телом она остается нормальной к потоку, а потому центральные части ударных волн этого типа называются нормальными ударными волнами. Чем выше скорость потока, то есть чем выше число Маха, тем более загнута волна (в направлении потока) и тем меньше расстояние ее отклонения.

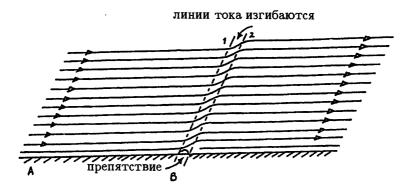


Рис. 116. Схема образования ударной волны на стенке.

В качестве второго примера рассмотрим рис. 116. Частица, движущаяся вдоль твердой поверхности AB, сталкивается с некоторым препятствием в B, отбрасывается вверх, ударяясь, в свою очередь, о ближайшую соседнюю частицу сверху. Все эти возмущенные частицы стремятся двигаться вверх. Но набегающие частицы (т. е. частицы потока) мешают им продолжить свое движение вверх, они очень скоро теряют часть своего поперечного импульса, так что линии тока искривляются лишь в полосе между прямыми 1 и 2, что можно видеть также на вклейке 19.

В обоих случаях возникает ударная волна. Эта волна намного сильнее, чем звуковые волны, рассмотренные выше. Она продолжает

существовать до тех пор, пока для потока сохраняются «ударные условия», так что частицы потока вынуждены подчиняться этим условиям. Когда же они пересекают зону, где действуют эти условия, то их кинематические и термодинамические характеристики испытывают резкое изменение — ударный скачок. Что же касается физического состояния среды внутри волны, то здесь особенно важны два предельных случая: (а) случай очень малой вязкости и (б) случай малой теплопроводности. Эти случаи были изучены Э. Жуке (Е. Jouquet) 167, Релеем (Rayleigh) P. Беккером (R. Becker) Л. Прандтлем 170 и другими. Весьма полное, вероятно, наилучшее математическое изложение всей теории ударных волн находится в знаменитом труде Н. Е. Кочина, И. А. Кибеля и Н. В. Розе 171).

Метод Чаплыгина — Христиановича

Если даже главный поток остается дозвуковым ($M_0 < 1$), то ударная волна или ударные волны могут существовать лишь в том случае, если в некоторой точке или в некоторых точках поверхности тела, движущегося в газе, локальная скорость потока сверхзвуковая (M > 1). Число Маха свободного потока, при котором это происходит (т. е. при котором локальная скорость потока становится равной локальной скорости звука), называется критическим числом Маха и обозначается через $M_{\rm cr}$. Соответствующее давление называется критическим давлением $p_{\rm cr}$ или минимальным давлением $p_{\rm min}$, поскольку при $M_0 = M_{\rm cr}$ или $v = v_{\rm cr}$ мы имеем $p = p_{\rm min}$. Как показал Христианович (СССР), для аэродинамического профиля $M_{\rm cr}$ и минимальный коэффициент давления $p_{\rm min}$ (определяемый как $2\Delta p/\rho v^2$) связаны зависимостью, изображенной на рис. 117.

Понятие «критическое» имеет только один смысл: ниже критического числа Маха не могут возникнуть ударные волны. Другой интересный факт состоит в том, что образование ударных волн при низких

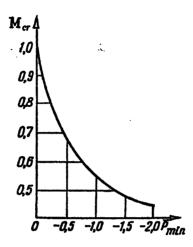
¹⁶⁷⁾ Journ. de Math., 6. 6: 1904.

¹⁶⁸⁾ Proc. Roy. Soc., 84, 247: 1910.

¹⁶⁹⁾ ZS für Physik, 8, 326: 1920.

¹⁷⁰⁾ ZS f.d. gesamte Turbinenwesen: 1906.

¹⁷¹⁾ Теоретическая гидромеханика. М., 1963. Т. 2.



Puc. 117. Диаграмма Христиановича $p_{\min} = f(M)$.

числах Рейнольдса существенно отличается от их образования при высоких числах Рейнольдса (при которых поток по крайней мере отчасти турбулентен). Когда пограничный слой турбулентен, он имеет высокое сопротивление так называемому «волновому кризису» — срыву потока. Такой срыв вызывается обычно повышением давления, происходящим от удара: это очень сложный вопрос, впервые исследованный Якобом Аккеретом.

Теория высоко дозвуковых потоков с эффектами сжимаемости была интенсивно и успешно разработана Сергеем Алексеевичем Чаплыгиным (1869–1942) в ЦАГИ¹⁷²⁾ в СССР. Его вклады в механику текучих сред были многочисленны; в частности, его работа в области высоко дозвуковых потоков имела историческое значение¹⁷³⁾. В этой работе он ввел новые независимые переменные, преобразовав общие уравнения газодинамики в уравнения в плоскости годографа, где они линеаризу-

¹⁷²⁾ Центральный аэродинамический институт под Москвой, второе в мире учреждение этого рода.

¹⁷³⁾ О газовых струях. Издание Московского ун-та: 1904. См. также его Собросоч., т.И, Москва: 1938. (Автор приводит также ссылку на англ. перевол. Прим. перев.).

ются. Уравнения принимают при этом вид

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -\frac{1}{2\tau} \frac{1 - \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}\tau}{(1 - \tau)^{\gamma/(\gamma - 1)}} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}$$
$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = \frac{2\tau}{(1 - \tau)^{1/(\gamma - 1)}} \frac{\partial \psi}{\partial \tau},$$

где

$$\tau = \frac{(\gamma - 1)\lambda^2}{\gamma + 1} = \left(\frac{v}{v_{\text{max}}}\right)^2, \quad v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}a_{\text{cr}}},$$

arphi — потенциал скоростей, ψ — функция тока, θ — угол между v и осью x, $\psi=C_p/C_v$, $\lambda=v/a_{\rm cr}$.

Другой аэродинамик из ЦАГИ, Сергей Алексеевич Христианович (род. в $1908 \, \mathrm{r.})^{174}$), близкий коллега Чаплыгина, ввел другую переменную s посредством уравнения

$$ds = \sqrt{\frac{1 - \lambda^2}{1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\lambda^2}} \frac{d\lambda}{\lambda}$$

и свел уравнения Чаплыгина к виду

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = \sqrt{K} \frac{\partial \psi}{\partial s}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial s} = -\sqrt{K} \frac{\partial \psi}{\partial \theta},$$

где

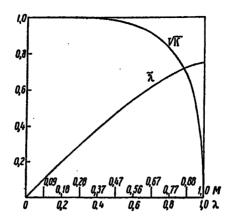
$$K = \frac{1 - \lambda^2}{\left(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\lambda^2\right)^{(\gamma + 1)/(\gamma - 1)}}.$$

Историческая объективность требует заметить, что эта использованная Христиановичем форма уравнений Чаплыгина была до него предложена Н. А. Слезкиным 175) и Л. П. Лейбензоном 176). Христианович продолжил их исследования и развил метод, заслуженно известный как «метод Христиановича». Но странным образом он не вошел в западные учебники и, как правило, неизвестен западным аэродинамикам.

¹⁷⁴⁾ Труды ЦАГИ, вып. 481, М., 1940.

¹⁷⁵⁾ Докл. АН СССР, 1936. Т. 3, № 9.

¹⁷⁶) Докл. АН СССР, 1935. № 9.



Puc.~118.~ Диаграмма Христиановича для $\sqrt{K}=f(M).$

Если λ не слишком близко к 1, то $\sqrt{K(\lambda L)}\approx 1$, как можно видеть из рис. 118 и из следующей таблицы (при $\gamma=1,4$):

λ	M	\sqrt{K}	` λ	M	\sqrt{K}	λ	M	\sqrt{K}
0,00	0,0000	1,0000	0,35	0,3228	0,9965	0,70	0,6668	0,9221
0,05	0,0457	1,0000	0,40	0,3701	0,9940	0,75	0,7192	0,8925
0,10	0,0913	1,0000	0,45	0,4179	0,9899	0,80	0,7727	0,8416
0,15	0,1372	0,9999	0,50	0,4663	0,9840	0,85	0,8274	0,7740
0,20	0,1832	0,9996	0,55	0,5152	0,9754	0,90	0,8834	0,6788
0,25	0,2294	0,9991	0,60	0,5649	0,9632	0,95	0,9409	0,5092
0,30	0,2759	0,9982	0,65	0,6154	0,9461	1,00	1,0000	0,0000

Значения \sqrt{K} легко вычисляются по формуле

$$\sqrt{K} = (1 - M^2)^{1/2} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{1/(\gamma - 1)}$$

Таким образом, для дозвуковых потоков можно положить $\sqrt{K} \approx 1$

и, следовательно, уравнения принимают вид

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = \frac{\partial \psi}{\partial s}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial s} = -\frac{\partial \psi}{\partial \theta},$$

аналогичный уравнениям Коши — Римана для несжимаемой жидкости,

$$\frac{\partial \widetilde{\varphi}}{\partial \widetilde{\theta}} = \frac{\partial \widetilde{\psi}}{\partial \widetilde{s}}, \quad \frac{\partial \widetilde{\varphi}}{\partial \widetilde{s}} = -\frac{\partial \widetilde{\psi}}{\partial \widetilde{\theta}}$$

в плоскости $(\tilde{s},\tilde{\theta})$ (\sim означает несжимаемый поток). Очевидно также, что $d\tilde{s}=d\tilde{\lambda}/\tilde{\lambda}$. Далее, Христианович полагает

$$ds = \sqrt{\frac{1 - \lambda^2}{1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\lambda^2}} \frac{d\lambda}{\lambda} = d\tilde{s} = \frac{d\tilde{\lambda}}{\tilde{\lambda}}$$

и выполняет интегрирование. Постоянная интегрирования находится из условия, что $\lim(\lambda/\tilde{\lambda}) = 1$ при $\lambda \to 0$. Способ интегрирования слишком сложен для этой книги; опускаю его, приводя взамен следующую таблицу численных результатов, которую надо сравнить с рис. 118:

λ	M	λ	λ	M	Ã	λ	M	Ã
0,00	0,0000	0,0000	0,35	0,3228	0,3410	0,70	0,6668	0,6251
0,05	0,0457	0,0500	0,40	0,3701	0,3862	0,75	0,7192	0,6568
0,10	0,0913	0,0998	0,45	0,4179	0,4307	0,80	0,7727	0,6857
0,15	0,1372	0,1493	0,50	0,4663	0,4734	0,85	0,8274	0,7110
0,20	0,1832	0,1983	0,55	0,5152	0,5144	0,90	0,8834	0,7324
0,25	0,2294	0,2467	0,60	0,5649	0,5535	0,95	0,9409	0,7483
0,30	0,2759	0,2943	0,65	0,6154	0,5904	1,00	1,0000	0,7577

Таким образом, существует определенная связь между λ и $\tilde{\lambda}$, не зависящая ни от конфигурации тела, ни от характера потока. Но в таком случае эффекты сжимаемости могут быть определены непосредственно по известным изэнтропическим формулам,

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\lambda^2}{1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}\lambda_0^2}\right)^{\gamma/(\gamma - 1)}$$

И

$$\frac{a_0^2}{a_{\rm cr}^2} = \frac{1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda_0^2}{1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda_{\rm cr}^2} = \frac{\gamma + 1}{2} \left(1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda_0^2 \right),$$

где, очевидно, $\lambda_{\rm cr}^2 = (v_{\rm cr}/a_{\rm cr})^2 = 1$. Отсюда

$$\begin{split} \bar{p}_{\text{com}} &= \frac{2(p-p_0)}{\rho_0 v_0^2} = \frac{2p_0}{\rho_0 v_0^2} \left[\left(\frac{1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda^2}{1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda_0^2} \right)^{\gamma/(\gamma - 1)} - 1 \right] \\ &= \frac{\gamma + 1}{2} \frac{1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda_0^2}{\lambda_0^2} \left[\left(\frac{1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda^2}{1 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \lambda_0^2} \right)^{\gamma/(\gamma - 1)} - 1 \right]. \end{split}$$

Ясно также, что

$$\bar{p}_{\rm inc} = 1 - (\tilde{\lambda}/\tilde{\lambda}_0)^2,$$

причем индексы "com" и "inc" означают «сжимаемый» и «несжимаемый». Таблица вместе с этими двумя формулами полностью решают задачу. Рис. 119 и 120 дают соотношения между \bar{p}_{com} и \bar{p}_{inc} при различных дозвуковых числах Маха.

Таков метод Христиановича. Его преимущество состоит в применимости к широкому разнообразию конфигураций тела. Но есть и другие методы. Например, С. А. Чаплыгин получил отдельные (но приближенные) соотношения¹⁷⁷⁾

$$\bar{p}_{\text{com}} = -\frac{2\sqrt{1+\mu_0^2}}{\mu_0^2} \left(\sqrt{1+\mu^2} - \sqrt{1+\mu_0^2} \right),$$

$$\bar{p}_{\rm inc} = 1 - (\tilde{\mu}/\tilde{\mu}_0)^2,$$

где $\mu^2=v^2/a_0^2$ (в этом случае "0" означает стационарный газ).

В 1928 году Глауэрт 178) получил для «тонкого» аэродинамического профиля соотношение между числом Маха дозвукового свободного потока M_0 и \bar{p}_{com} в виде $\bar{p}_{\text{com}}=\bar{p}_{\text{inc}}\sqrt{1-M_0^2}$, где \bar{p}_{inc} — коэффициент давления при достаточно низкой скорости, когда можно рассматривать

¹⁷⁷⁾ См. ссылку на его работу 1904 года и Собр. соч.

¹⁷⁸⁾ Proc. Roy. Soc., 1928. V. A118.

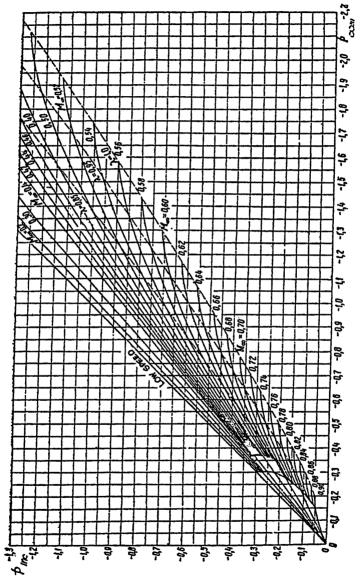


Рис. 119. Графики Христиановича для определения высоко дозвуковых эффектов сжимаемости при различных числах Маха свободного потока.

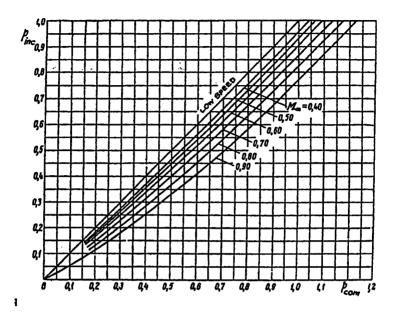


Рис. 120. Графики Христиановича для определения высоко дозвуковых эффектов сжимаемости при различных числах Маха свободного потока.

поток как несжимаемый. Затем, независимо друг от друга, Γ . С. Циен (H. S. Tsien) 179) и Теодор фон Карман 180) получили одну и ту же формулу

$$\bar{p}_{\rm com} = \frac{\bar{p}_{\rm inc}}{\sqrt{1-{\rm M}_0^2} + {}^1\!/_2(1-\sqrt{1-{\rm M}_0^2})\bar{p}_{\rm inc}}.$$

Наконец, минимальный коэффициент давления оказался функцией критического числа Маха:

$$\bar{p}_{\rm min} = 1 - \frac{1}{\rm M_{cr}^2} \left(\frac{2}{\gamma+1} + \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \rm M_{cr}^2 \right)^{\gamma/(\gamma-1)}. \label{eq:pmin}$$

¹⁷⁹⁾ J. Aero. Sci. August, 1939.

¹⁸⁰⁾ J. Aero. Sci. July, 1940.

Эта формула была получена в 1949 году профессором Γ . Ф. Бураго из Военно-воздушной академии имени Жуковского в Москве.

Стена сопротивления

К концу тридцатых годов авиация достигла «глухой стены сопротивления»; хотя скорости полета все еще оставались дозвуковыми, с числами Маха около 0,65-0,72, лобовое аэродинамическое сопротивление стало внезапно возрастать, как стена, преграждающая путь к дальнейшему увеличению скорости. Это происходило от эффектов сжимаемости, вызывавших резкие разрывы потока, неустойчивое образование ударных волн, сопровождаемое переходом большого количества энергии в тепло и в пульсацию давления, поглощавшим большую часть наличной энергии движения. Короче говоря, авиация столкнулась с новым видом лобового сопротивления — волновым сопротивлением.

Эти неприятные процессы, случайное образование ударных волн и неустойчивый механизм потока, существуют во всем диапазоне дозвуковой и сверхзвуковой аэродинамики, как это иллюстрируется вклейкой 20^{181}). На вклейке 23 представлены типичные нормальные ударные волны, полученные в Отделе аэронавтики Лондонского городского университета.

Наряду с Югонио и другими, уже упомянутыми авторами, в создании физической и математической теорий ударных волн важную роль сыграл профессор Уильям Джон Макуорн Ранкин (William John Macquorn Rankine, 1820–72), британский ученый, занимавшийся молекулярной физикой. Его знаменитая работа «О термодинамической теории волн конечного продольного возмущения» ("On the Thermodynamic Theory of Waves of Finite Longitudinal Disturbance") была опубликована сначала в Philosophical Transactions of the Royal Society, 160, 277–88, 1870, а затем неоднократно перепечатывалась 182). При внимательном чтении этой работы видно, насколько полно этот автор понимал физическую и математическую стороны предмета.

¹⁸¹⁾ R. C. Punkhurst and D. W. Holder Wind-Tunnel Technique («Техника аэродинамических труб»). London: Pitman & Sons, 1952.

¹⁸²⁾ См., например, Foundations of High Speed Aerodynamics (Основы аэродинамики высоких скоростей). Составитель Robert T. Beyer, Dover Publications, Inc., New York: 1951.

Ранкин ставил себе целью установить соотношения, которые должны существовать между законами упругости любого вещества — газообразного, жидкого или твердого — и законами волнообразного распространения конечного продольного возмущения в этом веществе. Иными словами, речь шла о возмущении, состоящем в смещении частиц в направлении его распространения, причем скорость частиц столь велика, что ею нельзя пренебречь по сравнению со скоростью распространения. В частности, это исследование показывало, при каких условиях передачи тепла от частицы к частице конечное продольное возмущение может распространяться вдоль призматической или цилиндрической массы без потери энергии и без изменения его типа: при этом слово «тип» означает отношение между величинами возмущения в данный момент ряда частиц, в их соответствующих невозмущенных положениях.

Далее, была выдающаяся работа П. Моленбрека «О некоторых движениях газа в предположении существования потенциала скоростей» (Р. Molenbroek, "Ueber einige Bewegungen eines Gases bei Annahme eines Geschwindigkeitspotentials"), впервые опубликованная в Archiv Math. Phys., (2), 9, 157, 1890, обогатившая газодинамику ценной математической техникой. И еще знаменитая работа «О двумерных процессах движения в газе, текущем со сверхзвуковой скоростью» — историческая докторская диссертация Теодора Мейера ("Ueber zweidimensionale Bewegungsvorgänge in einem Gas, das mit Ueberschallgeschwindigkeit strömt", Theodor Meyer), впервые опубликованная в Геттингене в 1908 году, а впоследствии много раз перепечатанная, полностью или частично.

Менее известны, однако, важные вклады, сделанные Кранцем (Cranz), отдельно или в сотрудничестве с другими. Он упорно стремился — может быть, упорнее всех до первой мировой войны — решить такие проблемы, как отношение между скоростью полета и лобовым сопротивлением полету пули, поведение газа впереди быстро движущегося тела, роль конфигурации передней части тела в образовании лобового сопротивления и т. д.

Конечно, Кранц был знаком с теориями Югонио и Ранкина, так что можно с уверенностью сказать, что он также изучал ударные волны, как это будет очевидно в дальнейшем. Но из его работ не ясно,

отдавал ли он себе отчет в важнейшем значении взаимозависимости между \bar{p}_{\min} и возникновением ударных волн. Нельзя понять также, различал ли он высоко дозвуковую газодинамику от сверхзвуковой. Во всяком случае, он не получил решений, подобных описанным выше; можно даже сказать, что Кранц потерпел неудачу в своих попытках объяснить сверхзвуковую «стену сопротивления». Но его современник и друг полковник Гаупт (Р. Haupt), выдающийся немецкий артиллерист, полагал, что знает ответ. В нескольких статьях 183) Гаупт развил теорию лобового сопротивления пулям и артиллерийским снарядам, основанную на кинетической теории газов при высоких и низких дозвуковых скоростях. Он опять-таки не имел особого успеха, но интересно, что в его рассуждениях центральное место занимали эффекты сжимаемости и нагревания: это был в самом деле правильный подход.

Еще более интересно, что капитан Й. Шатте (J. Schatte) опубликовал две статьи¹⁸⁴⁾ под названием «Экспериментальное определение благоприятной формы снаряда на основании нового метода измерения сопротивления воздуха» ("Die experimentale Ermittlung der günstigsten Geschossform auf Grund einer neuen Methode zur Messung des Luftwiderstands", содержавшую отличные картины сверхзвуковых ударных волн и спектра обтекания, полученные методами скольжения (schlieren) и интерферометрии (вклейка 22). Это был тот самый Шатте, работы которого по оптической визуализации волн (и спектров обтекания), создаваемых пулями, были с энтузиазмом встречены многими физиками, аэродинамиками и военными специалистами (рис. 121).

Далее, был французский баллистик по имени Ж. Дидион (J. Didion), предложивший 185 полуэмпирические формулы и таблицы для вычисления характеристик лобового сопротивления артиллерийским снарядам с различной конфигурацией головки. Кстати, в его работе упоминается так называемый «угол головки», который в действительности предшествовал в некотором смысле стреловидному крылу.

Наконец, была знаменитая работа Ф. Сиаччи¹⁸⁶⁾ (F. Siacci, 1839–1907) — вероятно, один из самых ценных вкладов в теорию лобового

¹⁸³⁾ Artillerische Monatshefte, Nr 40, 1910.

¹⁸⁴⁾ "Kriegstechnische Zeitschrift", 1913, 1. Heft und 2. Heft.

¹⁸⁵⁾ "Traité de balistique", Paris: 1848.

¹⁸⁶) Rivista d'artigleria e genio, Vol. 1: 1896.

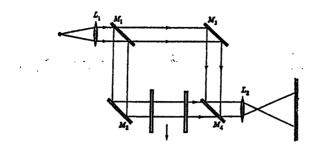


Рис. 121. Оптическая система Шатте для визуализации потока.

сопротивления перед появлением аэродинамики в виде связного построения из законов и теорем. Он показал, что когда скорость тела, движущегося в атмосфере, приближается к скорости звука, закон $R \propto v^2$ теряет силу.

Когда «тяжелая» материальная точка движется в атмосфере вертикально вверх, то ее вес W и сопротивление воздуха R стремятся замедлить движение, то есть уменьшить ее скорость. Поэтому уравнения движения следует писать в виде

$$\frac{W}{g}\frac{dv}{dt} = -W - R,$$

откуда

$$\frac{dv}{dt} = -g - \frac{gR}{W}.$$

Здесь gR/W имеет размерность ускорения. Сиаччи обозначил это выражение через I=cf(z)F(v), где f(z) представляет закон изменения плотности с высотой, так что $f(0)=1;\ F(v)$ — функция Сиаччи, для которой была составлена специальная таблица; c — баллистический коэффициент, определяемый формулой $c=id^3\cdot 10^3/W$, где d — диаметр снаряда, а i — так называемый «конфигурационный коэффициент».

Когда тело летит со скоростями, для которых $R \propto v^2$ (т. е. при v < 200 м/сек), отношение $F(v)/v^2$ постоянно. Но когда оно движется со скоростями $v \ge 200$ м/сек (т. е. когда проявляются эффекты сжимаемости), эта функция постепенно изменяется, убывая при пересечения распространяющихся волн, причем сверхзвуковая скорость остается

конечной, если только (выпуклое) изменение направления не слишком резко, как это происходит при внезапных взрывах Борда.

Математические, кинематические и термодинамические характеристики всех этих и других явлений можно найти в работе д-ра Теодора Мейера¹⁸⁷⁾ или, в сжатой форме, в одном из следующих выдающихся учебников: (1) Г. Н. Абрамович, Прикладная газовая динамика. М., 1953; (2) Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе, Теоретическая гидромеханика. М., 1963. Т. 2 (вероятно, один из лучших учебников по механике текучих сред); (3) Л. Г. Лойцянский, Механика жидкости и газа. М., 1959 (отличный учебник); (4) Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М., 1954; (5) Г. В. Липман, А. Рошко. Элементы газодинамики (H. W. Liepmann and A. Roshko. Elements of Gasdynamics. New York, 1957); (6) К. Осватич. Газовая динамика (K. Oswatitsch. Gasdynamics, Wien, 1952); (7) А. М. Кюте, Дж. Д. Шецер. Основания аэродинамики (A. M. Kuethe and J. D. Schetzer. Foundations of Aerodynamics, New York, 1961); (8) Дж. Г. Дуиннел. Основы аэродинамики (J. H. Dwinnel. Principles of Aerodynamics, New York. 1949); (9) Д. О. Доммаш, С. С. Шерби, Т. Ф. Конноли. Аэродинамика camonemos (D. O. Dommash, S. S. Sherby, Th. F. Connolly. Airplane Aerodynamics, New York, 1951); ограничимся этим перечнем.

Дальнейшее развитие и укрепление науки о сверхзвуковых потоках и ударных волнах происходило под влиянием тысяч участвовавших в ней университетских профессоров и исследователей, которых
мы, конечно, не можем здесь перечислить. Однако надо отметить решающие вклады, которые внесли А. Буземан, Бесконечно малые конические сверхзвуковые потоки (А. Визетапп. "Infinitesimal kegelige
Überschallströmung", 1943); Л. Прандтль, А. Буземан, Аэродинамическая подъемная сила при сверхзвуковых скоростях (L. Prandtl and
A. Busemann, "Aerodynamischer Auftrieb bei Überschallgeschwindigkeit",
1935); Я. Аккерет, Газодинамика (J. Ackeret. Gasdynamik, Handb. der
Physik, Bd. VII, 1927) и О воздействиях воздуха на крылья, движущиеся со сверхзвуковой скоростью ("Über Luftkräfte auf Flügel, die mit
grösserer als Schallgeschwindigkeit bewegt werden", 1925); Т. фон Карман, Сверхзвуковая аэродинамика (Th. von Karman. "Supersonic Aero-

¹⁸⁷⁾ Ueber zweidimensionale Bewegungsforgänge in einem Gas, das mit Ueberschallgeschwindigkeit strömt, von Dr Th. Meyer, Berlin: 1908.

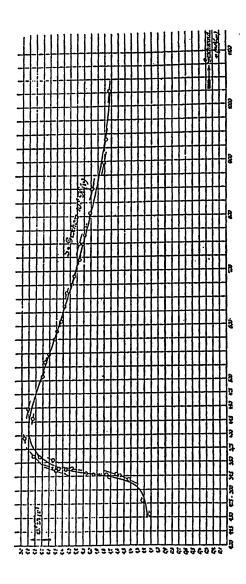
dynamics", 1947); С. А. Христианович, Обтекание тел газом при больших скоростях (1940); Я. Б. Зельдович, Теория ударных воли (1946); Р. Зауэр, Введение в теоретическую газодинамику (R. Sauer. "Einführung in die theoretische Gasdynamik", 1944/45) и многие другие.

Впрочем, есть некоторые аспекты газодинамики, возникшие на несколько десятилетий раньше — и здесь я должен буду вернуться также к околозвуковой газодинамике. В 1910 году капитан Бенсберг и д-р Кранц опубликовали статью 188 , содержавшую чрезвычайно интересную информацию, в том числе фотографии движущихся пуль. В этой статье и в последовавшей за ней серии статей можно видеть кривые Кранца, полученные теоретическим и экспериментальным путем. В них содержится детальное описание знаменитых в настоящее время методов визуализации потоков — метода скольжения (schlieren) и метода интерферометрии. На рис. 122 показаны общеизвестные в настоящее время паттерны изменения лобового сопротивления в зависимости от числа Маха (надо отметить, что Кранц пользовался не отношением M = v/a, а скоростью v).

Как можно заключить из внимательного изучения различных работ Кранца, он пытался объяснить резкое повышение коэффициента лобового сопротивления в околозвуковой области. Он развил представление об ударной трубе¹⁸⁹⁾. Проблема стены сопротивления рассматривалась в книгах Э. Валье, Экспериментальная баллистика (Е. Vallier. Balistique expérimentale, Paris, 1894), Ф. Бешорта, Математическое исследование движения снарядов (Bashorth. Mathematical Treatise on the Motion of Projectiles. London, 1873), К. Кранца, Внешняя баллистика (С. Cranz. Äussere Ballistik. Leipzig, 1910) и других важных публикациях по этому предмету, но ни в одной из них не была достигнута высота работы Сиаччи. Впрочем, был еще один исследователь, труд которого заслуживает внимания: О. фон Эбергард, который в своих Новых опытах о сопротивлении воздуха летящим снарядам и об его оценке с помощью теоретической внешней баллистики (О. v. Eberhard. "Neue Versuche über Luftwiderstand gegen fliegende Geschosse und

^{188) &}quot;Über eine photographische Methode zur Messung von Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsverlusten bei Infanteriegeschossen", Artillerische monatshefte, Berlin, 1910. Nr.41

¹⁸⁹⁾ ZS. f.Physik, 56, 170. C. Cranz und H.Scheridan: 1929.



Puc. 122. Кривая Кранца околозвукового и сверхзвукового лобового сопротивления.

ihre Verwertung durch die theoretisch äussere Ballistik", Artilleristische Monatshefte, No. 71, September, 1912) дает превосходную математическую теорию и около 40 кривых $C_D(v)$, из которых около 30 теоретические, а остальные экспериментальные; многие из этих кривых передают паттерн околозвукового и сверхзвукового лобового сопротивления с замечательной точностью (рис. 123).

Таким образом, люди сумели проникнуть в секреты поведения частиц воздуха при высоких скоростях — хотя бы в некоторой степени, и по крайней мере для конфигураций, подобных пуле. И как только было установлено существование «стены» лобового сопротивления — заслуженная слава этого достижения принадлежит не аэродинамикам, а баллистикам — проблема сопротивления самолету стала рассматриваться с более отчетливым пониманием.

Околозвуковые эффекты сжимаемости при подъеме

До сих пор мы рассматривали «стену сопротивления» движению осесимметрического тела при нулевом угле атаки. Но части самолета, как правило, не симметричны, как и весь самолет в целом. Первичная аэродинамическая функция конфигурации самолета состоит в создании и поддержании подъемной силы, а эта сила ни при каких значениях чисел Маха неотделима от лобового аэродинамического сопротивления. Возникает вопрос, что происходит с подъемной силой при наличии стены лобового сопротивления?

На этот вопрос мы будем отвечать последовательными приближениями. Диаграмма на рис. 124 показывает взаимозависимость между образованием ударных волн и распределением давления на аэродинамический профиль при различных значениях чисел Маха и при постоянном угле атаки 190). При $M_0=0,4$ локальная скорость не достигает величины скорости звука, а потому профиль свободен от ударных волн.

При ${\bf M}=0,6$ вблизи точки A верхней поверхности скорость локального потока достигает скорости звука и давление, как говорят, становится «критическим». После этого в пределах очень малого расстояния AB поток является сверхзвуковым, и давление падает. В точке B

¹⁹⁰⁾ Н. С. Аржаников, В. Н. Мальцев. Аэродинамика. М., 1956.

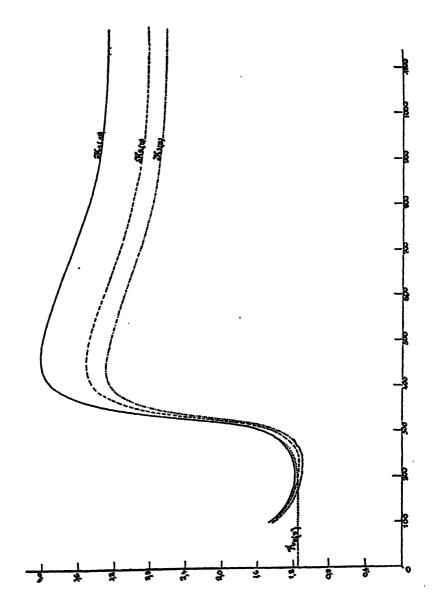


Рис. 123. Теоретические кривые Эбергарда.

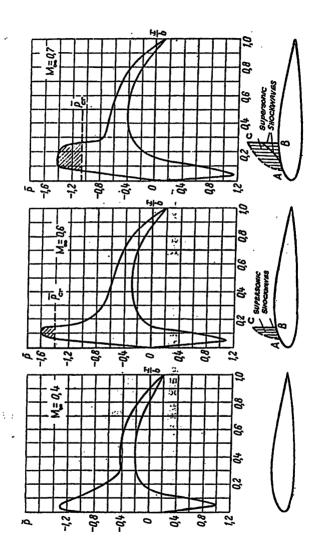
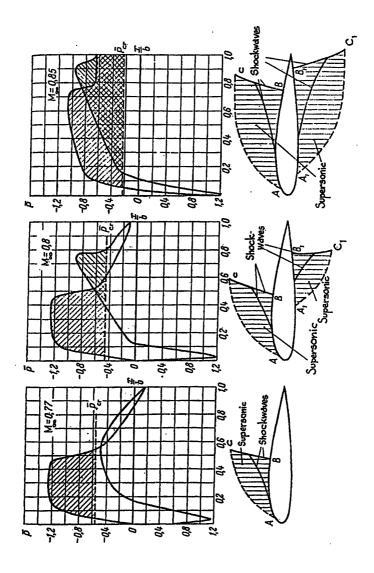
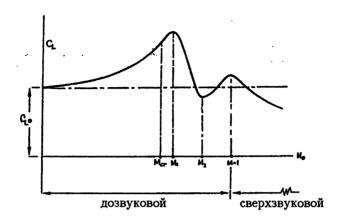


Рис. 124. Паттерны распределения давления и ударных воли на крыле. (Окончание на стр. 266)



Puc. 124. Паттерны распределения давления и ударных волн на крыле. (Окончание. Начало на стр. 265)



Puc. 125. Поведение коэффициента подъема в околозвуковой области.

сверхзвуковой поток резко переходит в дозвуковой, и давление столь же резко повышается: это значит, что образовалась ударная волна (BC).

При M=0,7 и 0,77 сверхзвуковая зона (ABC) расширяется; ударная волна BC передвинулась ниже по течению. Теперь мы имеем λ -образную систему ударных волн.

При $M_0=0,8$ общий паттерн ударных волн остается тем же, но они перемещаются еще дальше вниз по течению, к заднему краю. Вдобавок мы имеем теперь сверхзвуковую область и λ -образную ударную волну также на нижней поверхности; а это значит, что коэффициент подъемной силы крыла не может быть столь высоким, как при $M_0=0,7$, поскольку давление упало в нижней сверхзвуковой области.

При $M_0 = 0,85$ сверхзвуковые зоны, верхняя и нижняя, становятся больше, покрывая почти всю поверхность крыла; очевидно, его подъемная сила становится еще меньше.

Мы можем теперь изобразить общую зависимость коэффициента подъемной силы аэродинамического профиля от числа Маха M_0 данного полета при заданном угле атаки при высоко дозвуковых скоростях (рис. 125). Очень важно отметить тот факт, что в области от (приблизительно) $M_{\rm cr}$ до $M_0=1$ подъемная сила совершает «прыжки» вверх и вниз и становится даже меньше ее низшего дозвукового значения C_{L0} .

Но это лишь одна из неприятностей. Другую можно усмотреть



Рис. 126. Распределение давления и момент тангажа аэродинамического профиля при $M_{cr} < M_{\infty} < 1$.

из схематической картины на рис. 126: характер распределения давления таков, что (при $\rm M_{cr} < M_0 < 1)$ возникает ненормальный момент тангажа.

И наконец, рис. 127 показывает, какие точки на кривой стены сопротивления соответствуют различным случаям образования ударных волн.

Теоретические (математические) основания этих экспериментальных фактов изучались задолго до того, как были получены экспериментальные данные. Первую фундаментальную работу в этой области опубликовал, по-видимому, С. А. Чаплыгин (1904)¹⁹¹⁾. Затем в 1927 году Г. Глауэрт (H. Glauert) из Кембриджа опубликовал важную работу под названием «Влияние сжимаемости на подъемную силу аэродинамического профиля» ("The Effect of Compressibility on the Lift of an Aerofoil", R. and M., No. 1135), где упомянутое уже соотношение появляется в виде $C_p = C_{p0}/\sqrt{1-M_0^2}$; здесь C_{p0} — коэффициент давления при столь низкой скорости, при которой поток можно считать несжимаемым.

Я должен теперь сослаться на ряд статей, постепенно ускользающих из нашей памяти, но существенно содействовавших в свое время

¹⁹¹⁾ Эта работа имеется в английском переводе: NASA TM No.1063: 1944. (Автор не приводит ссылки на русский подлинник. — Прим. перев.)

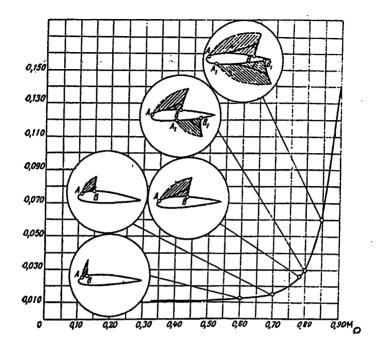


Рис. 127. Диаграмма, показывающая паттерны ударных волн в различных точках кривой «стены сопротивления».

формированию теории и экспериментальных методов исследования эффектов сжимаемости: «Испытания в аэродинамических трубах с переменной плотностью типа аэродинамических профилей с необычно большой максимальной передней кривизной» ("Tests in the Variable-Density Wind Tunnel of Related Airfoils Having the Maximum Camber Unusually Far Forward", by E. N. Jacobs and R. M. Pinkerton, NASA Report No. 537, 1935); «Испытания типа аэродинамических профилей с искривленностью вперед в аэродинамической трубе с переменной плотностью» ("Tests of Related Forward-Camber Airfoils in the Variable-Density Wind Tunnel", by E. N. Jacobs, R. M. Pinkerton and H. Greenberg, NASA Rep. No. 610, 1937); «Данные отдела аэродинамических профилей, полученные в аэродинамической трубе с переменной плотностью NASA"

("Airfoil Data Section Data Obtained in the NACA Variable-Density Wind Tunnel", by E. N. Jacobs and I. Abbot, NASA Report No. 669, 1939); «Двумерный дозвуковой поток сжимаемой текучей среды» ("Two-Dimensional Subsonic Flow of Compressible Fluids", by Hsue-Shen Tsien, Journ. Aero. Sci., August, 1939); «Испытание 16 однотипных аэродинамических профилей при высоких скоростях» ("Tests of 16 Related Airfoils at High Speeds", by J. Stack and A. E. Doenhoff, NASA Rep. No. 492, 1934); «Поток газа мимо тела при высоко дозвуковых скоростях», С. А. Христианович, Труды ЦАГИ, № 481, 1940, и некоторые другие.

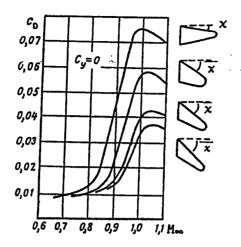
Дальнейшие замечания об околозвуковой аэродинамике

Природа газовых потоков в околозвуковой области была все еще недостаточно изучена, главным образом потому, что «околозвуковые» означает не просто число Маха, равное единице, а весь диапазон чисел Маха примерно от 0.82 до 1.26, и потому, что околозвуковые потоки — это смешанные потоки, включающие как сверхзвуковые, так и высоко дозвуковые режимы. Это достаточно ясно иллюстрирует рис. 128. Теория крыла бесконечного размаха показывает, а эксперименты подтверждают, что резкое возрастание C_D при некоторых дозвуковых числах Маха может быть задержано посредством прямой стреловидности крыла с углом χ ; но возрастание продолжается примерно до $M \geq 1...$

Хорошо сконструированное крыло самолета должно быть способно к полету на горизонтальном уровне при числах Маха около 0,82 или 0,85, не сталкиваясь с серьезной неустойчивостью потока. Но горизонтальный полет — это лишь одно из многих условий работы крыла. Например, при выполнении маневров на высокой скорости неизбежно увеличение угла атаки, а потому неприятности со сжимаемостью можно предвидеть при значительно меньших числах Маха свободного потока.

Сложные проблемы околозвуковых потоков подвергались теоретическим и экспериментальным исследованиям примерно с середины тридцатых годов. Но более или менее систематические статьи и книги на эту тему стали появляться лишь после второй мировой войны 192).

¹⁹²⁾ См., например, «Метод годографа для околозвуковых потоков» ("The hodo-



Puc. 128. Зависимость «стены лобового сопротивления» от угла стреловидности.

Одну из самых замечательных работ по этому предмету опубликовал Ганс Вольфганг Липман (Hans Wolfgang Liepmann, Journal of the Aeronautical Sciences, December, 1946); в ней показано, что паттерн ударных волн и распределение давления в околозвуковом потоке сильно зависят от состояния пограничного слоя, и что переход от ламинарного пограничного слоя к турбулентному при данном значении числа Маха весьма резко меняет паттерн потока.

Эти и другие явления требовали обширных экспериментальных исследований, которые могли быть проведены только в околозвуковых аэродинамических трубах. Но проектирование и особенно калибровка таких труб представляли очень трудную задачу. Как я знаю из личного опыта, даже в период 1947—49 годов многие все еще сомневались вообще в возможности околозвуковых аэродинамических труб. Причина была в неустойчивой природе околозвуковых потоков и в «стене»,

graph method in trans-sonic flow". M. J. Lighthill, Proc. Roy. Soc., London: 1947). Исследования о двумерных околозвуковых потоках сжимаемой текучей среды (Studies on two-dimensional transonic flows of compressible fluid. S. Tomotika and K. Tomada, University of Kyoto, Japan: 1946). Испытания в околозвуковой аэродинамической трубе (Transonic Wind Tunnel Testing. B. H. Goethert, London: Pergamon Press, 1961.

сопровождавшейся так называемыми «блокадой» и «запиранием потока». Можно не сомневаться, что проектировщики аэродинамических труб никогда до этого не сталкивались с таким числом головоломок. Нужна была совершенно новая философия проектирования. Это означало много длительных и дорогостоящих усилий в Германии, Франции, Италии, СССР, США и, несомненно, в других странах. Но результаты были отнюдь не удовлетворительны. Тогда вдруг кто-то где-то вспомнил давно забытую статью японца К. Кондо (К. Kondo)¹⁹³⁾, где был, по-видимому, ответ: идея прорезания щелей в стенах аэродинамических труб. Со временем отсюда возникли нынешние аэродинамические трубы с перфорированными стенами.

Как обычно, в дальнейшем было множество вкладов в теорию щелевых или перфорированных стен. Я сказал бы, пожалуй, что лидером в этой специальной области было Deutsche Versuchanstalt für Luftfahrtforschung, DVL, Berlin - Adlershof. Во всяком случае, таково мое личное впечатление.

СССР отставал от Германии на целую эпоху, но уже через два года — как я сам мог видеть — ЦАГИ (Центральный аэрогидродинамический институт близ Москвы) в кратчайшее время завершил проектирование, постройку и ввод в эксплуатацию одной из крупнейших и в ту пору самых современных в мире околозвуковых аэродинамических труб (вклейка 21). Она была создана под руководством С. А. Христиановича, С. А. Аристархова, Б. В. Белянина и В. Г. Гальперина. Разумеется, исследования в этой трубе привели ЦАГИ к установлению новых свойств перфорированных стен, таких как устранение сильных возмущений и неправильностей в сверхзвуковых потоках, стабилизация локальных чисел Маха и т. д. 194)

Когда появляется «стена» сопротивления (при $M \sim 0,7-0,95$), то блокада и запирание потока становятся недопустимо высокими, и мы просто не знаем, что мы измеряем. Если мы при этом пытаемся решить неприятную проблему запирания, оставляя поток открытым (трубы с открытым выходом), то неустойчивая и неуправляемая природа око-

^{193) &}quot;Boundary Interference of Partly-closed Wind Tunnel". K. Kondo, Aeronautical Research Institute's Report No. 137, 1936.

¹⁹⁴⁾ Г. Л. Гроздовский, А. А. Никольский, Г. П. Свищев, Г. И. Таганов: Сверхзвуковые течения газа. М., 1967.

лозвуковых и сверхзвуковых потоков вызывает более или менее резкие пульсации, измерительные приборы нерегулярно колеблются, и мы опять сталкиваемся со слишком большим числом неизвестных; сверх того, подобные трубы невыгодны в смысле потребляемой энергии.

Но все трудности человеческого познания преодолеваются человеческой мыслью; а правильная мысль, однажды пробудившись, уже не спит. Кто-то где-то (может быть, в Берлине, может быть, в Москве, а вероятнее всего в обоих местах) выдвинул идею, что источником описанных выше трудностей может быть старый враг аэродинамики — пограничный слой, и что поэтому надо направить на этот источник свои целительные силы. Отсюда пошли известные в наше время способы обращения с указанной проблемой: либо применение подвижных стенок, устраняющих пограничный слой, либо применение большого числа малых отверстий, через которые пограничный слой можно отсасывать (ряд «ускорителей пограничного слоя», струй, вдуваемых вдоль стен через малые трубки строго в направлении главного потока).

В 1945 году мы узнали, что германское DVL разрабатывало другие идеи 195). Немцы, как и все работавшие в этой области, знали, что при околозвуковых скоростях и скоростях, превосходящих скорость звука, стенки трубы, блокада модели и запирание взаимодействуют между собой и вместе «портят» едва ли не всю работу и что случайное образование ударных волн будет мешать удовлетворительному решению проблемы околозвуковых труб, если не применить что-нибудь вроде продольных щелей.

Щели предоставляют пульсациям давления путь «выдоха», а потоку — возможность успокоиться. Но, как показывает опыт, результаты еще лучше, если вместо щелей используется перфорация стенок.

Полностью перфорированные стенки (см. вклейку 24), хотя и не свободные от недостатков, приняты теперь во всем мире, поскольку они удерживают искажения потока в околозвуковой области на допустимо низком уровне, доставляя, таким образом, среди прочих преимуществ, более или менее гладкий переход от $M_0 < M_{\rm cr}$ к $M_0 > M_{\rm cr}$. Как показывает опыт, накопленный в Отделе аэронавтики Лондонского городского

¹⁹⁵⁾ См., например, Испытания в околозвуковых аэродинамических трубах (В. Н. Goethert. Transonic Wind Tunnel Testing. London: Pergamon Press, 1961)

университета М. М. Фристоуном (М. М. Freestone) и Д. М. Сайксом (D. M. Sykes), а также в других учреждениях, такие стенки имеют все описанные преимущества. Вклейка 23 показывает, что запирание в самом деле почти полностью устранено: неприятные конфигурации ударных волн и их местонахождение поддаются наблюдению.

Теперь можно сказать, что главные проблемы околозвуковой аэродинамики решены. Конечно, все еще есть огромные трудности, но мы, по крайней мере, знаем, в каком направлении надо идти, чтобы с ними справиться. Мы знаем, это область, где абсолютное техническое совершенство невозможно; но то, что уже достигнуто, показывает, что можно решить даже самые сложные проблемы.

Часто спрашивают: действительно ли нам надо знать явления околозвуковых потоков? Конечно, надо. Не случайно пилоты так не любят околозвуковые полеты. Когда самолет проходит через эту область, могут произойти неожиданные изменения в триммировании. Вследствие появления ударной волны (или ударных волн) на верхней поверхности крыла точка приложения результирующей подъемной силы может внезапно сместиться, нарушив этим относительное положение подъемной силы и силы веса¹⁹⁶).

Еще более неприятны, если не опасны, нарушения, которые могут возникнуть, и в самом деле возникают, при полетах с высокими скоростями. Иногда пилот обнаруживает, что руль высоты или руль направления крайне неэффективен. Он двигает ручку управления или нажимает на педали руля управления, но самолет не реагирует. Это может объясняться ударным срывом потока с фиксированных горизонтальных или вертикальных поверхностей, при наличии которого управляющая поверхность движется в спутной струе и не действует. В другом случае пилот может обнаружить, что управляющая поверхность «заморожена»; по-видимому, аэродинамический вращающий момент становится столь большим, что он не может его одолеть. Для этого явления нет полного объяснения; возможно, оно связано с местонахождением ударной волны. Некоторые пилоты говорят, что наблюдают сдвиг управляющих поверхностей при определенном значении числа

¹⁹⁶⁾ Теодор фон Карман. Аэродинамика, избранные вопросы в свете их исторического развития. (Theodore von Karman. Aerodynamics. Selected Topics in the Light of their Historical Development. Ithaca, New York: Cornell University Press, 1957).

Маха, зависящем от данного самолета; руль направления, руль высоты или элерон выходят из своей нейтральной позиции и перепрыгивают в отклоненную позицию без всякого действия пилота.

Часто наблюдаются вибрации хвоста, или даже всего самолета. Можно предполагать, что в смешанном околозвуковом и сверхзвуковом потоке над крылом положение ударных волн не вполне определено; они могут двигаться взад и вперед. Наблюдали также, что когда ударные волны производятся на обеих поверхностях крыла или хвоста, верхней и нижней, то они могут двигаться в противоположной фазе, что приводит к колебаниям спутной струи, которые передаются крылу или хвосту.

Дальнейшие замечания о сверхзвуковой механике текучих сред: сверхтекучесть

Теперь я сосредоточу внимание главным образом на сверхзвуковых ударных волнах. Напомним, что вся область вне конуса Маха (рис. 114, d, стр. 244) свободна от возмущений. Но что происходит в ближайшей окрестности источника возмущения, где этот источник нельзя уже считать малым?

Чтобы справиться с «непостижимыми точками застоя», Даламбер предложил, чтобы у тел, движущихся в текучей среде, делали очень острые передние края. Но, во-первых, невозможно строить корабли, фюзеляжи самолетов и ракет с игольчатым носом или крылья самолетов и хвостовые плоскости с острым, как бритва, передним краем, потому что это может привести к серьезным или катастрофическим происшествиям; во-вторых, даже такие носы и края не предохранили бы аэронавтику и космическую технику от ударных волн.

Рассмотрим снова рис. 115 (стр. 245) и посмотрим, что произойдет с формой, изображенной на рис. 129, при сверхзвуковых скоростях. Когда бесчисленные миллионы частиц газа достигают области O, то давление непосредственно у переднего края (или, если можно так выразиться, у передней точки) очень резко возрастает, так что вся заштрихованная область между ударной волной и краем превращается в область сжатого газа. А это значит, что набегающие частицы не могут проникнуть в эту область с их сверхзвуковыми скоростями. Иными

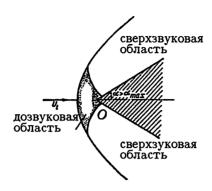


Рис. 129. Сверхзвуковой поток мимо острия (увеличено).

словами, ударная волна разделяет поток на две различные области: сверхзвуковую слева и дозвуковую справа. Таким образом, когда частицы пересекают ударную волну, их скорости изменяются из сверхзвуковых в дозвуковые. За волной они дальше замедляются, и в состоянии застоя находятся в условиях, близких к адиабатическим.

Релей первый заметил, что это последовательное сжатие (сначала в ударной волне, затем в дозвуковой области) приводит к значительно более низкому давлению, чем при вполне изэнтропическом (адиабатическом) сжатии от сверхзвуковых скоростей к полному застою 197). Можно показать также, что когда частицы газа пересекают ударную волну, изэнтропия возрастает, и из энергетического баланса следует, что возрастание энтропии приводит к определенному убыванию давления. Таким образом, существование ударной волны впереди тела типа, показанного на рис. 115, приводит к определенному снижению лобового сопротивления телу.

В случае резкого края явления по существу остаются теми же, но размеры дозвуковой области гораздо меньше, и расстояние остановки волны при возрастании числа Маха становится все меньше; при некотором числе Маха волна прилипает в переднему краю (в случае закругленного края волна остается отдельной, как бы мало ни было расстояние остановки). Другой интересный факт состоит в том, что при

¹⁹⁷⁾ Proc. Roy. Soc., 84, 247: 1870.

увеличении числа Маха свободного потока ударные волны становятся все менее искривленными, в то время как их углы наклона становятся все меньше.

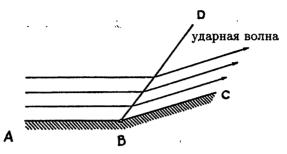


Рис. 130. Волна сжатия.

Рассмотрим теперь сверхзвуковой поток вдоль твердой стены, изображенный на рис. 130. Когда частицы достигают точки B, стена BC вынуждает их внезапно и резко изменить направление движения, и возникает ударная волна сжатия BD. Если стена имеет несколько углов (рис. 131), то ударная волна искривляется. Впрочем, надо подчеркнуть, что линии BB_1 , CC_1 , DD_1 и т. д. могут быть недостаточно сильными, чтобы их можно было рассматривать как ударные волны: здесь опять многое зависит от числа Маха свободного потока и от самого угла. Это снова приводит нас к уже рассмотренным линиям Маха.

Важная и интересная особенность волн Маха состоит в том, что если это волны растяжения (разрежения), то они никогда не могут соединяться, усиливая друг друга, а всегда расходятся в стороны наподобие веера; если же это волны сжатия, то они действительно часто соединяются и усиливают друг друга; в таких областях усиления имеется большое число сжатий, складывающихся друг с другом и составляющих, таким образом, фронт, поперек которого существует определенное, почти разрывное сжатие — ударная волна 198).

^{198) «}Гремлины и барьеры» ("Gremlins and Barriers") — так называлась вступительная лекция, прочитанная профессором А. Д. Янгом (А. D. Young) 12 мая 1955 года в Колледже королевы Марии Лондонского университета (Queen Mary College, University of London). (Гремлины — злые духи, вредящие летчикам, из фольклора английских авиаторов. — Прим. перев.)

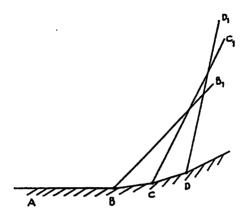


Рис. 131. Ударные волны сжатия, вызванные последовательными углами.

Если бы частицы газа (рис. 132), достигнув точки A, продолжали свое движение по прямой линии BB', то вся угловая область θ оказалась бы в состоянии вакуума, что невозможно и физически, и математически: текучие среды не выносят разрывов вещества. Происходит же следующее: причины, противодействующие причинам образования волн сжатия, изображенных на рис. 115, 130, приводят к тому, что на рис. 132 существует внезапное падение давления в точке B. Эти изменения происходят постепенно в веерообразной области, называемой областью Прандтля — Мейера, или областью расширения. С теоретической стороны интересно, что при этом расширении не теряется энергия. С другой стороны, волны расширения бывают только в сверхзвуковых потоках и всегда скошены. (На вклейке 26 показан веер подлинных волн растяжения на стене аэродинамической трубы).

Первая и наиболее полная теория волн сжатия и расширения была развита Т. Мейером (см. сноску 187). Из дальнейших участников развития этой теории мне хотелось бы выделить Я. Аккерета, Л. Прандтля и А. Буземана, труды которых всегда были и остаются фундаментом, стенами и крышей здания современной сверхзвуковой газодинамики. Не могу не прибавить, что, по моему личному мнению и опыту, среди более новых вкладов в механику сплошных сред вообще и в газодинамику, в частности, наиболее выдающимся по существу и наиболее

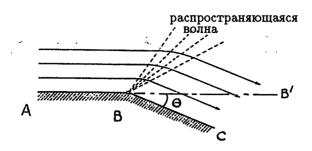


Рис. 132. Формирование распространяющихся ударных волн.

прекрасным по математической форме была великая книга «Механика сплошных сред» Ландау и Лифшица, М., 1954; трудно представить себе большее профессиональное удовольствие, чем испытываемое при чтении этой книги.

Кстати, именно издание 1944 года этой книги дало современной механике текучих сред одну из ее самых блистательных и оригинальных глав, теорию сверхтекучести гелия (не имеющую ничего общего со сверхзвуковой газодинамикой; но поскольку речь зашла о Ландау, мне кажется дозволенным сказать об этом несколько слов).

В природе нет идеальных текучих сред. Но есть одна недавно открытая «газообразная жидкость», ведущая себя во многом как идеальная жидкость: это гелий-два, Не-2. Вообще, гелий сжижается труднее всех газов; но в 1908 году он был сжижен К. Г. Оннесом (К. Н. Onnes) из Лейденского университета в Голландии. В 1938 году советский физик П. Л. Капица открыл так называемую «сверхтекучесть» Не-2, и в течение 1941-44 годов Л. Д. Ландау (другой советский физик) развил гидродинамическую теорию этого вещества.

При атмосферном давлении жидкий гелий замерзает при температуре $T=14,04^{\circ}\mathrm{K}$ и остается в этом состоянии вплоть до абсолютного нуля. Но при $T=2,19^{\circ}\mathrm{K}$ он испытывает некоторое изменение и в точке превращения (λ -точке) переходит из одной внутренней структуры в другую (рис. 133). Соответственно этому при $T<2,19^{\circ}\mathrm{K}$ жидкий гелий называется He-2. Жидкий Не ведет себя подобно жилкому водороду, неону, воздуху и т. д. и может рассматриваться как

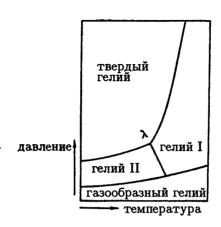


Рис. 133. Диаграмма состояния гелия.

совершенно нормальная жидкость с вязкостью порядка $\mu \sim 10^{-5}$ пуаз.

Поведение He-2 необычайно: теплопроводность его превосходит теплопроводность меди и серебра, но не пропорциональна градиенту температуры; он может протекать через тонкие капилляры, трещины, через любые отверстия, не проявляя ни малейших признаков вязкости (последняя оценивается как $\mu \sim 10^{-11}$ пуаз, и не поддается измерению существующими методами); его потоки не переносят тепла и всегда потенциальны. Короче говоря, He-2 ведет себя как идеальная жидкость.

Теория сверхтекучести Ландау основана на гипотезе, что He-2 представляет собой смесь двух различных жидкостей: одна из них обладает свойством сверхтекучести, другая же ведет себя как нормальная вязкая жидкость, причем первая течет через вторую. Математическая форма теории имеет обычные черты механики текучих сред, но содержит специальные термины.

Гиперзвуковая газодинамика

Мы переходим теперь к той отрасли механики текучих сред, которая именуется гиперзвуковой газодинамикой, т. е. газодинамикой при $M \gtrsim 5$. Главная особенность этой отрасли — интенсивность ударных волн, которые, кстати, имеют намного меньшие углы Маха — намного большую стреловидность (см. вклейку 25, репродуцируемую с любез-

ного разрешения У. Хилтона (Hilton, W., High Speed Aerodynamics, Longmans Green, London, 1952).

В некотором смысле и в некоторой степени отцом гиперзвуковой газодинамики можно назвать Г. С. Циена (H. S. Tsien) (теперь выдающегося ученого Китайской Народной Республики), поскольку его теория вызвала почти немедленную реакцию 199) нескольких других «отцов», проложив тем самым путь к более широким исследованиям. Гиперзвуковая газодинамика тесно связана с ракетами и космическими кораблями, которым придется летать в других физических условиях, начиная с нормального атмосферного континуума до крайне разреженных внешних слоев атмосферы.

На очень больших высотах атмосфера становится столь разреженной, что уже не ведет себя как непрерывная текучая среда. Лежащая в основе этих явлений молекулярная природа воздуха производит важные изменения в аэродинамических явлениях и явлениях теплопроводности. Континуальная газодинамика сначала должна быть видоизменена, а затем оказывается непригодной. Для высоко разреженных потоков основные явления и теоретические подходы существенно отличаются от применяемых к умеренно разреженным потокам. Поэтому приходится разделить динамику разреженного газа на области, рассматривающие потоки разного режима²⁰⁰).

Поток, характерный для высоко разреженного газа, называется «свободным молекулярным потоком». В этом режиме средний путь свободного пробега велик по сравнению с характерным размером погруженного в поток аэродинамического тела; молекулы, сталкивающиеся с телом, а затем отражающиеся от него, как правило, будут уже далеко от тела, когда столкнутся с другой молекулой. Отсюда следует, что падающий на тело поток газа в основном не возмущается присутствием тела. Аэродинамические характеристики и характеристики теплопроводности зависят лишь от падающего потока и от среднего импульса и энергии взаимодействия между ударяющимися молекулами и поверхностью тела. Подъемная сила, лобовое сопротивление и коэффициенты теплопроводности могут быть вычислены прямым способом через небольшое число эмпирических параметров взаимодей-

¹⁹⁹⁾ H. S. Tsien. Similarity laws of hypersonic flows. Journ. Math. Phys., 3, 25: 1946.

²⁰⁰⁾ NAVORD Report 1488, Vol.5, 1957.

ствия с поверхностью. Для сравнительно небольшого числа исследованных случаев экспериментальные результаты, как правило, были в корошем соответствии с этими теоретическими предсказаниями. Но эти теоретические и экспериментальные результаты ограничивались столь низкими скоростями и температурами, при которых столкновение с поверхностью тела не вызывает у молекул газа внутримолекулярных или внутриатомных переходов. При очень больших скоростях и на больших высотах можно ожидать, что на поверхности или вблизи ее будут происходить молекулярная диссоциация, возбуждение или даже ионизация, величину которых нельзя предвидеть.

Поток, характерный для умеренно разреженных газов, называется «обтекающим потоком». Это название происходит от явления «обтекания», одного из важных эффектов, происходящих в умеренно разреженном газовом потоке, прямо связываемого с его неконтинуальной, молекулярной структурой. Слой газа, непосредственно прилегающий к поверхности, не пристает к ней, а скользит вдоль нее с определенной скоростью, пропорциональной произведению касательному напряжению у стенки и средней длине свободного пробега молекул. Как известно, существует и соответствующий скачок температуры.

Режим, промежуточный между скользящим потоком и свободным молекулярным потоком, называется «переходным режимом потока». Он соответствует уровню плотности, при котором длина свободного пробега имеет тот же порядок величины, что и характерные размеры потока.

Кривые на рис. 134 показывают физические режимы, или уровни плотности, как функции от чисел Рейнольдса и Маха и от высоты.

Гиперзвуковая газодинамическая теория первого режима была развита рядом авторов: H. S. Tsien "Superaerodynamics, Mechanics of Rarefied Gases", Journ. Aero. Sci., vol. 13, Dec., 1946; E. Sanger "Gas Kinetik sehr grosser Flughöhen", Schweizer Archiv für Angewandte Wissenschaft und Technik", vol.16, 1950; M. Heineman "Theory of Drag in Highly Rarefied Gases", Comm. on Pure and Applied Math., vol.1, 1948; H. Ashley "Applications of the Theory of Free Molecular Flow to Aeronautics", Journ. Aero. sci., Feb., 1949, и другие. Что касается других режимов, то мне было бы трудно перечислить их «строителей» в каком-либо логичном порядке. Поэтому все дальнейшее надо рассматривать как изложение предмета в более или менее случайном порядке.

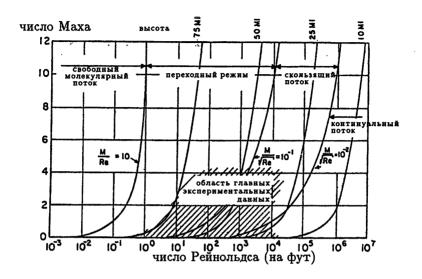


Рис. 134. Режимы плотности потока.

Г. Джулиан Аллен (H. Julian Allen), один из лидеров Исследовательского центра имени Эймза НАСА близ Сан-Франциско (NASA, National Aeronautics and Space Administration, Ames Research Center). является автором многочисленных работ по аэродинамике входа в атмосферу космических кораблей и баллистических ракет. Еще в 1958 году он опубликовал фундаментальную работу о гиперзвуковых полетах и о проблеме возвращения 201), где среди других идей и концепций он выдвинул концепцию, по которой для уменьшения нагрева при входе в атмосферу Земли надо применять головки затупленной конфигурации. Он предупредил, однако, что такая конфигурация создает сильную отрывающуюся ударную волну, что осложняет всю газодинамическую теорию. Он подчеркнул также, что ракеты и космические корабли достигают очень больших высот, где длина свободного пробега молекул может иметь тот же порядок величины, что размеры тела, поэтому важно исследовать режим скольжения и свободно-молекулярный режим.

²⁰¹⁾ Journal of the Aeronautical Sciences, 25, No.4: 1958.

Затем он рассмотрел проблему с другой точки зрения. При гиперзвуковых скоростях давление застоя и температура столь велики, что может происходить в некоторой степени диссоциация молекул кислорода и азота воздуха; а это, в свою очередь, может привести к ионизации. В этих условиях сопутствующая тепловая конвекция может стать иной, чем у «идеального» газа. Более того, сжатый и нагретый газ может стать электропроводящим, что создает практические трудности для двусторонней радиосвязи.

Наконец, Аллен отметил, что надо изучать не только физические и химические свойства атмосферы, но также природу частиц высокой энергии — от метеоров до космических лучей.

Это были, по существу, главные философские концепции гиперзвуковой аэродинамики. Что касается более специальных вкладов Аллена, то я упомяну его совместную с А. Дж. Эггерсом (A. J. Eggers) работу «Исследование движения и аэродинамического нагрева баллистических ракет, входящих в земную атмосферу при высоких сверхзвуковых ско-POCTAX» ("A Study of the Motion and Aerodynamic Heating of Ballistic Missiles Entering the Earth Atmosphere at High Supersonic Speeds", NASA Rep. 1381, 1958). Из названия работы видно, какие вопросы в ней рассматриваются — и это, конечно, весьма важная работа. Далее, в ноябре 1962 года на совместной конференции НАСА и университетов по научным и техническим проблемам исследования космоса Аллен изложил превосходную работу под названием «Газодинамические проблемы космических кораблей», где рассматривались самые острые проблемы космических полетов и проектирования космических кораблей. Если бы это был его единственный вклад, то и в этом случае история и философия космической газодинамики воздали бы ему должное.

• Другой ведущий деятель того же Исследовательского центра имени Эймса НАСА в Калифорнии, Алфред Дж. Эггерс (Alfred J. Eggers) внес очень важные вклады в гиперзвуковую аэродинамику возвращения кораблей, из которых мне хотелось бы отметить его «Возможность безопасной посадки» ("The Possibility of a Safe Landing")²⁰²⁾. Главные темы этой работы — торможение ракет, атмосферное торможение,

[«]Космическая техника», глава 13 коллективного труда под тем же названием, превосходная работа в 54 страницы (Space Technology, John Wiley & Sons, Inc., New York: 1959. См. также NASA TN No.4946, 1957.

вопросы проектирования гиперзвуковых кораблей, движение и нагрев баллистических снарядов переменной геометрии в полете с постоянным замедлением. Читатель должен иметь в виду, что в то время не было буквально никаких установившихся представлений по этим вопросам, что и сделало эту специальную работу мировым событием.

Как я уже сказал, строители гиперэвуковой газодинамики перечисляются здесь в том порядке, как они приходят мне на ум, без всякого плана или предпочтения. Важным лицом среди них был и остается Лестер Лиз (Lester Lees). Уже в 1957 году он подчеркнул главные отличия этого предмета от обычной газодинамики²⁰³⁾. Через два года он опубликовал выдающуюся работу²⁰⁴⁾, в которой выдвинул ряд важных предложений и методов решения проблем конвекционной теплопроводности с приращением массы и химическими реакциями, а также использования аэродинамической подъемной силы во время входа в земную атмосферу. В работе содержались результаты экспериментальных исследований различных конфигураций головок при M=5,8. Несомненно, это была одна из лучших работ по этому предмету в то время, поставившая имя Лиза в число его создателей.

Далее, был ряд статей Эласа Д. Хейеса (Allace D. Hayes) и Рональда Ф. Пробстейна (Ronald F. Probstein) — в дальнейшем собранных в объемистую книгу — касавшихся всего диапазона гиперзвуковой аэродинамики. С появлением их книги (Теория гиперзвуковых потоков, Hypersonic Flow Theory, Academic Press, New York, 1959) можно было считать завершенным образование новой отрасли механики текучих сред — гиперзвуковой газодинамики. Но, конечно, перечень ее строителей значительно длиннее. В него входят Антонио Ферри (Antonio Ferri), Альфред Буземан (Alfred Busemann), Джордж Саттон (George Sutton), М. В. Ван Дайк (М. D. Van Dyke), Дж. Сталдер (J. Stalder), Н. Фриман (N. Freeman), Дж. Фей (J. Fay) и Ф. Риддел (F. Riddell) и многие другие в США, Канаде, СССР, Франции, Японии, Великобритании и других странах.

Почти невероятное развитие военных и исследовательских космических ракет доказало, что основные теории и избранные эксперимен-

²⁰³⁾ "Jet Propulsion", 27, No.11: 1957.

^{204) &}quot;Use of Aerodynamic Lift During Entry into the Earth's Atmosphere", ARS Journal, September, 1959.

тальные методы были, по существу, верны. Рассмотрим теперь внимательнее некоторые факты, ставшие известными всему миру.

И в американской, и в советской программах исследования Луны придавалось важное значение проблеме возвращения в земную атмосферу. Напомним, что скорость возвращения лунного корабля v=36000 футов в секунду на высоте свыше 400000 футов и еще выше, до верхнего края атмосферы. Отсюда вытекают некоторые основные проблемы: (1) как обеспечить, чтобы корабль оставался в узком коридоре между безвоздушными перигеями входа и выхода, (2) каковы законы аэродинамического сопротивления при рассмотренных выше уровнях плотности, (3) как обеспечить достаточную управляемость корабля в течение критической фазы возвращения, (4) каков будет нагрев в области застоя и т. д.

Как показала практика космической техники 205), теоретические и экспериментальные решения, предложенные еще молодой тогда гиперзвуковой газодинамикой 206), оказались почти во всех отношениях превосходными.

Например, мы знаем теперь, что теория использования отношения подъемной силы к лобовому сопротивлению была не просто нужной: она оказалась решающей в смысле успеха или неудачи. В случае «Аполлона» центр тяжести корабля был намеренно отодвинут от продольной оси, чтобы сделать отношение аэродинамической подъемной силы к лобовому сопротивлению L/D порядка 0,3. Направление вектора подъемной силы можно было изменять, пользуясь осевым давлением системы управления реакциями для вращения корабля вокруг вектора лобового сопротивления как оси устойчивости. Таким образом, вектор подъемной силы может быть установлен в любом положении между направлениями вверх и вниз, чтобы создать необходимое переменное соотношение вертикальной и боковой компонент аэродинамической силы, нужное для управления траекторией.

При входе в атмосферу аэродинамическое сопротивление вызы-

²⁰⁵⁾ См., например, «Программа "Аполлон" > ("The Apollo Program", Space Division of North American Rockwell Corporation: 1968.

²⁰⁶⁾ Труды Объединенной конференции НАСА и университетов по космической науке и технике исследования космоса, т.2 (Proceedings of the NACA-University Conference on the Science and Technology of Space Exploration, vol.2, Chicago: 1962.

вает (1) сильное замедление корабля, (2) сильные аэродинамические нагрузки и (3) сильный аэродинамический нагрев. Что касается последнего, то сжатие между главной ударной волной и передней поверхностью тела столь интенсивно, что максимальная температура в области застоя может достигать 5800°F (Аполлон-13). При таких температурах воздух становится вибрирующим, диссоциирующим и ионизированным газом. Ввиду наличия электронов и ионов происходят сильные воздействия на энергию и перенос масс даже при невысоком уровне ионизации. Быстро растет теплопроводность — и т. д., и т. п.

Впрочем, не надо думать, что гиперзвуковая газодинамика — это только наука о ракетах и космической технике. Значение ее гораздо шире. У нас будут новые типы космических кораблей, а в будущем также гиперзвуковые самолеты. Кто бы мог подумать, скажем, 25–30 лет назад, что будут такие сверхзвуковые самолеты, как Конкорд или Ту-144? Но сегодня они уже есть. Нет никакого сомнения, что придет черед и для гиперзвукового транспорта. Таким образом, гиперзвуковая газодинамика — это не только наука о ракетах и о возвращении космических кораблей.

Всеобщая непрерывность вещества и энергии

С математической точки зрения пространство — это попросту трехмерная область. Но пространство, о котором я собираюсь говорить, это нечто большее: оно «наполнено» веществом и энергией в многочисленных состояниях и формах существования. Более того, пространство (в математическом смысле слова), вещество, энергия и время не существуют отдельно и независимо: ни одно из них даже нельзя представить себе без других.

В такой формулировке понятие «пустого пространства» теряет смысл, а представление об исследовании пространства приобретает смысл. В самом деле, латинское слово materia означает то, что существует повсюду во Вселенной. Греческое слово energeia означает буквально одно из главных свойств вещества, то есть материи. Человек, животные, Земля, планеты, звезды, галактики, атмосфера, вода, огонь, свет, темнота и т. д. — все это различные формы и состояния, в которых существуют вещество и энергия. В этом смысле самое основное

свойство пространства = Вселенной — это всеобщая непрерывность вещества и энергии.

Как сказал Луи де Бройль²⁰⁷⁾, прогрессу знания всегда мешало тираническое влияние некоторых концепций, которые, в конце концов, стали рассматривать как догмы; поэтому следует время от времени самым внимательным образом исследовать принципы, принимаемые нами без дискуссии. Именно так обстояло дело с концепцией мирового эфира.

Удар ей нанесла теория поля Альберта Эйнштейна²⁰⁸) и его попытка создать единую теорию поля, основанную на четырехмерной пространственно-временной геометрии. Эта теория представляет собой, прежде всего, пересмотр ньютоновой теории тяготения, в которой силы действуют на тела, но в пространстве между ними ничего не происходит; между тем, в общей теории относительности Эйнштейна силы, действующие на тела, не столь важны, как то, что происходит в пространстве между ними, где находится гравитационное поле (распространяющееся с конечной скоростью). Эйнштейну удалось сформулировать закон, управляющий этим полем, из которого он вывел (ньютоновы) законы движения.

Каждый уголок Вселенной занят веществом и/или энергией. Но вещество, энергия и поля неотделимы друг от друга. Везде и всегда, где есть одно из них, есть и два других. Если бы мы могли разрушить или создать вещество, мы тем самым разрушили или создали бы энергию и поля. Если бы мы могли «устранить» электромагнитные поля, то ничто не связывало бы атомы с электронами и электроны с атомами. Если бы не было гравитационных сил, ничто не удерживало бы Землю на ее орбите, звезды в своих галактиках, и весь мир был бы разрушен.

Вещество существует не только в форме материальных тел. Свет и радиоволны не имеют веса и других ощутимых свойств, так что их нельзя назвать материальными телами. Но они обладают такими свойствами, как интенсивность, длины волн, частота, зависимость от

²⁰⁷⁾ Революция в физике: 1953.

²⁰⁸⁾ Альберт Эйнштейн, Собрание сочинений в четырех томах. Русский перевод, «Наука», Москва. См. также «Моя картина мира» ("Mein Weltbild", Frankfurt am Mein: 1955).

времени и т. д., которые можно измерить.

Таким образом, пространство и время «наполнены» и пронизаны веществом и энергетическими полями. Пустого пространства, или абсолютного вакуума, не существует, не может существовать, его даже нельзя себе представить. Нельзя представить себе и пустое время.

Термин «свет» относится, собственно, к диапазону частот электромагнитного излучения, связанных со зрением. Длины волн видимого света находятся приблизительно в пределах от 4000 ангстремов (крайний фиолетовый свет) до 7700 ангстремов (крайний красный свет). Но Макс Планк показал, что излучение любого рода есть поток энергии; основная единица энергии, испускаемая единственным волновым движением излучения, есть «квант» или, иначе, «фотон». Таким образом, свет есть поток фотонов. И при этом масса фотона равна нулю! Но это не значит, что фотона не существует. Он в действительности существует: в движении, то есть не бывает покоящихся фотонов, есть только фотоны в движении. Или, что то же: остановить свет в его распространении значит его уничтожить, уничтожить вещество, энергию, электромагнитное поле, что невозможно.

Другая поразительная особенность фотонов (света) состоит в том, что они движутся со скоростью 300000 км/час. Более того, это должна быть самая наибольшая скорость в мире; никакое материальное тело не может достичь этой скорости. Почему же? Потому что в противном случае, когда оно догонит фотон, оно будет покоиться по отношению к свету, а потому перестанет существовать, что невозможно.

Всякий, кто когда-нибудь подставил призму под лучи солнца и увидел цвета солнечного спектра, отраженные от экрана, увидел весь диапазон видимого света. В самом деле, человеческий глаз чувствителен только к узкой полосе излучения, между красным и фиолетовым пветом.

Длина волны красного света равна 0,00007 см, а фиолетового света 0,00004 см. Но солнце испускает и другие виды излучения: инфракрасные лучи от 0,00008 до 0,032 см; ультрафиолетовые лучи от 0,00003 до 0,000001 см; рентгеновские лучи, которые короче ультрафиолетовых лучей; и другие виды лучей. Повторяю, мир буквально пронизан ими, хотя мы и не можем их наблюдать. Более того, мы не знаем в точности, какая часть излучения из внешнего пространства не пропускается атмосферой на Землю.

Но каждая материальная частица притягивает каждую другую частицу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Отсюда следует, что каждый кубический миллиметр пространства пронизывается не только волнами излучения, но и волнами гравитации. Мы их не видим, но они есть.

Представьте себе космический корабль, летящий со скоростью больше скорости света. Он сначала догонит свет, испущенный вчера, потом свет, испущенный позавчера, и так далее. И команда корабля будет двигаться по отношению к времени из настоящего в прошлое, то есть будет становиться все моложе и моложе.

С другой стороны, поскольку скорость остается постоянной, энергия движения также остается постоянной. Но когда скорость возрастает, энергия тоже возрастает. Вопрос в том, откуда тело берет эту добавочную энергию? Значит ли это, что для движения быстрее скорости света наш космический корабль должен иметь магический источник энергии?

Из элементарной механики мы знаем, что чем больше масса ракеты, тем труднее ее ускорить; обратно, чем меньше масса, тем легче ее ускорить. Но до какой скорости? Ответ тот же, что и раньше: космический корабль не может достичь скорости света — если только его масса не совсем исчезнет. Но именно этого мы не можем сделать с космическим кораблем: он стал бы несуществующим кораблем! Так что масса остается, но скорость приближается к скорости света — не забывайте, что это воображаемый случай. Что же это значит? Это значит, что масса — или вес — становится «очень большой», столь большой, что никакое дальнейшее усилие уже не может дальше ускорить это тело до скорости света, когда тело стало бы «бесконечно массивным».

Корабль становится более массивным только когда его скорость, а следовательно, энергия его движения возрастает. Поэтому энергия

^{•)} Имеется в виду значение постоянной Планка в системе CGS. — Прим. перев.

движения «вносит добавочную массу»; приток энергии равносилен притоку массы. Сколько же «добавляется» массы? Ответ дает формула Эйнштейна

$$E = mc^2$$

где E — энергия, m — масса и с — скорость света. Эта революционная формула была выведена Альбертом Эйнштейном на трех страницах его исторической работы «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии?» ("Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?", "Annalen der Physik, Bd. 18, 636, 1905). Там показано, что законы классической механики должны быть изменены, чтобы соответствовать теории относительности. Достаточно привести пример: кинетическая энергия тела mv^2 превращается в $mc^2/\sqrt{1-v^2/c^2}$. Мне хотелось бы назвать $v^2/c^2=\varepsilon$ «числом Эйнштейна». Когда

Мне хотелось бы назвать $v^2/c^2 = \varepsilon$ «числом Эйнштейна». Когда $v \to c$, то $\varepsilon \to 1$, и кинетическая энергия становится бесконечно большой, что физически и механически невозможно. Но это не должно нас беспокоить, потому что ничто в мире не может двигаться со скоростью света; во всех случаях современных космических полетов $\varepsilon = v^2/c^2 \ll 1$, так что формула сводится к mc^2 .

Теперь представим себе космический корабль весом в полтонны, направленный к Луне со скоростью $v=11,2\,\mathrm{km/cek}$; по обычным представлениям, его кинетическая энергия огромна; но масса его возрастет лишь на один миллиграмм! Полтонны и один миллиграмм: до сих пор нет приборов, способных измерить такое изменение. Но когда-нибудь люди создадут фотонные ракеты, способные развить скорости порядка, например, $260000\,\mathrm{km/cek}$, а тогда масса корабля удвоится.

Зачем нужны такие скорости? Ответ вытекает из самой природы Вселенной. Представьте себе, что наш земной шар находится на третьем этаже дома, именуемого Солнечной системой. Дом расположен в отдаленной части обширного звездного сообщества, насчитывающего примерно 150000 миллионов звезд. При этом даже ближайшая звезда, кроме Солнца — Альфа Центавра — отстоит от нас так далеко, что свету требуется на этот путь 4,3 лет, что равносильно 270000 расстояний от Земли до Солнца.

Чтобы достигнуть даже ближайшей звезды на космическом корабле используемой теперь системы, понадобились бы сотни тысяч лет чтобы добраться туда и вернуться. Но, мягко выражаясь, человек так долго не живет. Поэтому решение проблемы будут искать новыми путями; идея фотонной ракеты и есть такой новый путь.

Напомню, что электрон — это элементарная частица с отрицательным зарядом, находящаяся внутри атома. В том же атоме есть так называемые протоны; масса протона в 1800 раз больше массы электрона, а заряд его положителен.

Протоны и электроны существуют во всех материальных телах, в веществе. Но вещество содержит также элементарные частицы, именуемые позитронами и антипротонами. Масса позитрона равна массе электрона, но он имеет положительный заряд; масса антипротона равна массе протона, но его заряд отрицателен. Вообще, античастица имеет ту же массу, что и соответствующая частица, она тождественна с ней почти во всех отношениях, но имеет противоположный заряд. Когда частица встречается с античастицей, они полностью аннигилируют друг друга с выделением их энергии в форме фотонов, откуда и возникает идея фотонной ракеты.

Предположим, что мы умеем создавать и хранить во время полета вещество и антивещество. И предположим, что мы умеем ускорить их до столкновения перед очень большим параболическим зеркалом. Тогда они аннигилируют друг друга и высвободят огромное количество фотонов, которые отразятся от зеркала, превратившись в параллельный пучок фотонов, движущихся со скоростью света $c=300000\,$ км/сек. Этот пучок создаст фотонную реактивную силу — фотонное давление — и мы получим фотонную ракету.

Полет фотонного корабля можно разделить на три главных этапа: ускорение, инерциальный полет с постоянной скоростью и замедление. Если в течение первого этапа космический корабль поддерживает земное ускорение силы тяжести, то за 17 месяцев он достигнет скорости в 250000 км/сек, то есть 83 процентов скорости света, и покроет расстояние в 7300 миллиардов километров, или 18% расстояния до Альфы Центавра. Затем начнется второй этап: фотонный двигатель будет выключен, и полет будет происходить по инерции, со скоростью 250000 км/сек, в течение 3 лет и 4 месяцев. Наконец, будет включена система замедления, и начнется третий этап; его продолжительность по времени и пространству будет та же, что на первом этапе. Таким образом, полная длительность полета к ближайшей звезде составит 6 лет и 2 месяца в одну сторону, или 12 лет 4 месяца в оба конца.

Авторский указатель

Абрамович Г. Н., 259	Буссине, 138
Адамар Жак Саломон, 239, 240	D 000
Аккерет Якоб, 187-190, 203, 205,	Валье Э., 260
220, 242, 248, 260, 278	Ван Дайк М. В., 284
Александер Патрик, 199	Вейерштрасс, 137
Александр Великий, 38	Вентури Дж. Б., 109
Алигьери Данте, 24, 43, 44	Ветчинкин В. П., 157, 226
Аллен Г. Джулиан, 282, 283	Вивиани Винченцо, 74, 86
Андерсон Реймонд, 177	Вольтер, 154
Аполлоний, 33	Вышнеградский И. А., 159
Аржаников Н. С., 262	Гаген, 111, 113, 215
Аристарх, 38	
Аристархов С. А., 271	Галилей Галилео, 27-29, 69-74,
Аристотель, 24, 26-31, 34, 45, 47, 68,	100, 144, 239
69, 71, 74, 75, 100, 131, 144, 153	Гальперин В. Г., 271
Архимед, 32-24, 36-38, 47, 61, 67,	Гамильтон Вильям Роуан, 7
69, 72, 100, 153, 225	Гаунт, 257
Афанцини, 182	Гей-Люссак Жозеф Луи, 155
Farer 110 105	Гельмгольц, 91, 110, 135, 137–141,
Базен, 119, 125	167, 169, 171, 186, 213, 239
Бейкер Р., 41 Беккер Р. 247	Гераклит, 24
Bekkep P., 247	Герике, 75
Бекон Френсис, 17 Белянин Б. В., 271	Герон Александрийский, 11,
Бенар Анри, 211	38–42, 225
Бенсберг, 260	Геро, 38
Бернулли Даниил, 78, 91, 92, 94, 95,	Гершель Клеменс, 110
100, 102, 107, 110, 124, 130, 152,	Гете, 48, 117
167, 194, 211, 213, 228	Гиерон, 37
Берт Ф. П., 12	Гильемини, 87
Бетц А., 177, 188 189, 190, 220,	Гиппарх, 38
233, 234	Глауэрт, 176, 230, 252, 254, 267
Бешорт Ф., 260	Гольдштейн С., 233
Био Жан Батист, 156, 175, 176, 177	Грациа В. ди, 73
Блазиус, 217, 218	Грет, 68
Бобылев Д. К., 158, 160	Гроздовский Г. Л., 271
Борда Шевалье де, 107, 109, 110,	Грин, 158
120–123, 125, 213, 259	Громека И. С., 114, 159
Боссю Шарль, 117, 118, 120, 125	Гюйгенс, 29, 100, 239
Брашман Н. Д., 158	да Винчи Леонардо, 18, 45-69, 72,
Бройль Лун де, 287	74, 86, 99, 104, 107, 110, 119,
Буземан А., 259, 277, 284	131, 137, 153, 219, 225
Бураго Г. Ф., 255	Давыдов А. Н., 158
-JF	

Даламбер (Д'Аламбер), 86, 100, 104-1-6, 116, 117, 131, 133, 144, 167, 209, 213, 239, 274 Дарси, 119, 125 Декарт Рене, 86, 100, 239 Джевецкий, 229 Джинс Джеймс, 71 Джон Роберт, 177 Дилион Ж., 257 Дисмашги, 192 Доммант Д. О., 259 Дуиннел Дж. Г., 259 Дюбуа, 91, 110-112, 118, 119, 125, 213, 239 Дюга Рене, 151 Дюкло, 114, 138

Евклид, 18, 38 Евфалин, 39 Ершов А. С., 158

Жирар, 91, 110, 138 Жуке Э., 247 Жуковский Н. Е., 137, 159, 163, 165-169, 170, 172, 174, 176, 185, 196, 205, 210, 213, 222, 225

Зауэр Р., 260 Зельдович Я. Б., 260 Зоммерфельд Арнольд, 119

Ирншоу, 245 Истахри, 192

Кавада С., 230 Кантон, 15 Капица П. Л., 278 Кардано Джироламо, 78 Карман Теодор фон, 112, 160, 173, 203, 208, 210, 212, 218, 255, 266 Карно Лазар, 129-132, 239 Каспари В. А., 237 Кастелли Бенедетто, 73 Кельвин, 141 Кеппен, 203 Кибель И. А., 247, 259 Кирхгоф, 91, 110, 114, 167, 211 Клазиус, 237 Клейц, 91, 110, 213 Клеро А. К., 100, 102, 133 Ковалевская С. В., 159 Колладон, 15 Кондо К., 271 Кондорсе Антуан, 117 Конноли Т. Ф., 259 Котельников А, 160 Кочин Н. Е., 247, 259 Коши Огюстен Луи, 134-137, 139, 157, 239, 251 Кранц, 256, 260 Кранц К., 257, 260 Кребс Николай, 45 Куломб Л. де, 73 Кулон, 111, 213 Купле, 112, 213 Кутта Вильгельм, 168, 174, 176, 185, 206 Кюте А. М., 259

Лагранж Жозеф Лун де, 7, 84,

99-104, 107, 110, 112, 129-131,

133, 135, 141, 166, 194, 219, 228, 239 Лакур Поль, 199 Ландау Л. Д., 259, 278 Ланчестер, 126, 169, 171, 174, 206 Лаплас Пьер Симон де, 84, 129, 132, 135-137, 239, 244 Лафе, 186 Лежандр Адриен Мари, 117 Лейбензон Л. П., 249 Лейбниц, 33 Лейтгезер Иоахим, 151 Лиз Лестер, 284 Лилиенталь Отто, 167, 199 Липман Г. В., 259, 270 Лифшиц Е. М., 259 Лобачевский Н. И., 159 **Лойцянский Л. Г., 216, 259** Ломоносов М. В., 151-156, 225, 237 Луи-Филипп, 134 Ляпунов А. М., 159

Магнус, 125, 127, 185-187, 191, 194, 205, 207, 211 Максвелл Джеймс Кларк, 195, 235, 237 Маллок, 208, 211 Мальцев В. Н. 262 Мариотт Эдм, 120, 144, 213, 243 Марцелл Марк Клавдий, 32 Max, 130, 241-246, 252-255, 261, 263, 269-272, 276 Мейер, 91, 110, 138, 213, 259, 277 Менделеев Д. И, 155 Мещерский И. В., 160 Моленбрек П., 256 Монж Гаспар, 117 Морли Э. В., 12 Mynk Make, 177

Навье, 91, 110, 112, 114, 116, 125, 141, 157, 215
Нассау Морип, 65
Никольский А. А., 271
Никуралзе И. Н., 138
Ньютон Исаак, 29, 71, 83–85, 87, 91, 96, 100, 106, 110, 114, 123, 128, 131, 134, 144, 160, 163, 167, 213, 243

Оннес К. Г., 278 Осватич К., 259 Остроградский М. В., 157

Паскаль Блез, 16, 36, 78-82, 100, 115, 209, 213
Пейдж Фредерик Хендли, 210
Перкинс, 15
Петров Н. Ф., 159
Пистолези Э., 230
Пифагор, 18, 24
Планк Макс, 160, 288
Платон, 24-26, 31, 45
Польгаузен, 218
Прандтль, 151, 160, 174, 176, 187, 190, 215, 234, 245, 247, 260, 278
Пробстейн Р. Ф., 284
Прони, 112
Птолемей, 38

147, 216 Пуассон, 91, 110, 114, 132, 244 Ранкин В Дж М, 144, 225, 240, 257 Рахманинов И И, 158 Рейнольдс, 141, 144-151, 167, 180, 207, 217, 248, 282 Релей, 144, 186, 209, 211, 247 Риддел Ф, 284 Ризон Г А., 151 Риман Г Ф. Б , 136, 137, 240, 251 Рихтер В., 177 Робинс Бенджамин, 121-129, 185-187, 192, 195, 205, 243 Розе Н. В., 247, 259 Рошко А., 259 Рыкачев М. А., 155, 164, 225 Рябушинский Д. П., 102, 157, 160, 187, 195-197, 199, 201, 204-206, 208, 210, 213, 220, 229

Пуазейль, 91, 110, 113, 125, 138,

Савар Ф , 175-177, 239 Савониус Сигурд И., 201 Сайкс Д. М., 273 Сальвиати, 72 Саттон Джордж, 284 Свищев Г. П., 271 Сен-Венан, 91, 110, 213 Сиаччи Ф., 257 Симов И. В., 158 Слезкин Н. А., 249 Слудский Ф. А., 159 Сталдер Дж., 284 Стевин Симон, 36, 65-69, 72, 80, 100, 115, 133, 209 Стеклов В. А., 159 Стефан, 138 Стокс, 114, 116, 135, 141, 215

Таганов Г. И., 271 Тауэр Бичем, 146 Тегижов Л. С., 159 Теплер Август Йозеф Игнац, 241 Токаев Г. А., 222 Токати, 208 Томсон Уильям, 141 Торричелли Эванджелиста, 74-78, 86, 100, 110, 167

Фавр Александр, 220-222 Фалес Милетский, 23 Фарадей Майкл, 152, 195 Фей Дж., 284 Ферри А., 284 Финстервальдер, 176, 228, 231 Флеттнер А., 125, 177-185, 187-195, 220 Фриман Н., 284 Фристоуи М. М., 273 Фруд В., 212-215, 227-231

Хаммураби, 192 Хейес Элас Д., 284 Хилтон У., 280 Хинан, 214 Христианович С. А., 248-254, 260, 268, 271

Фукс Б., 177

Фурье, 132, 157, 177

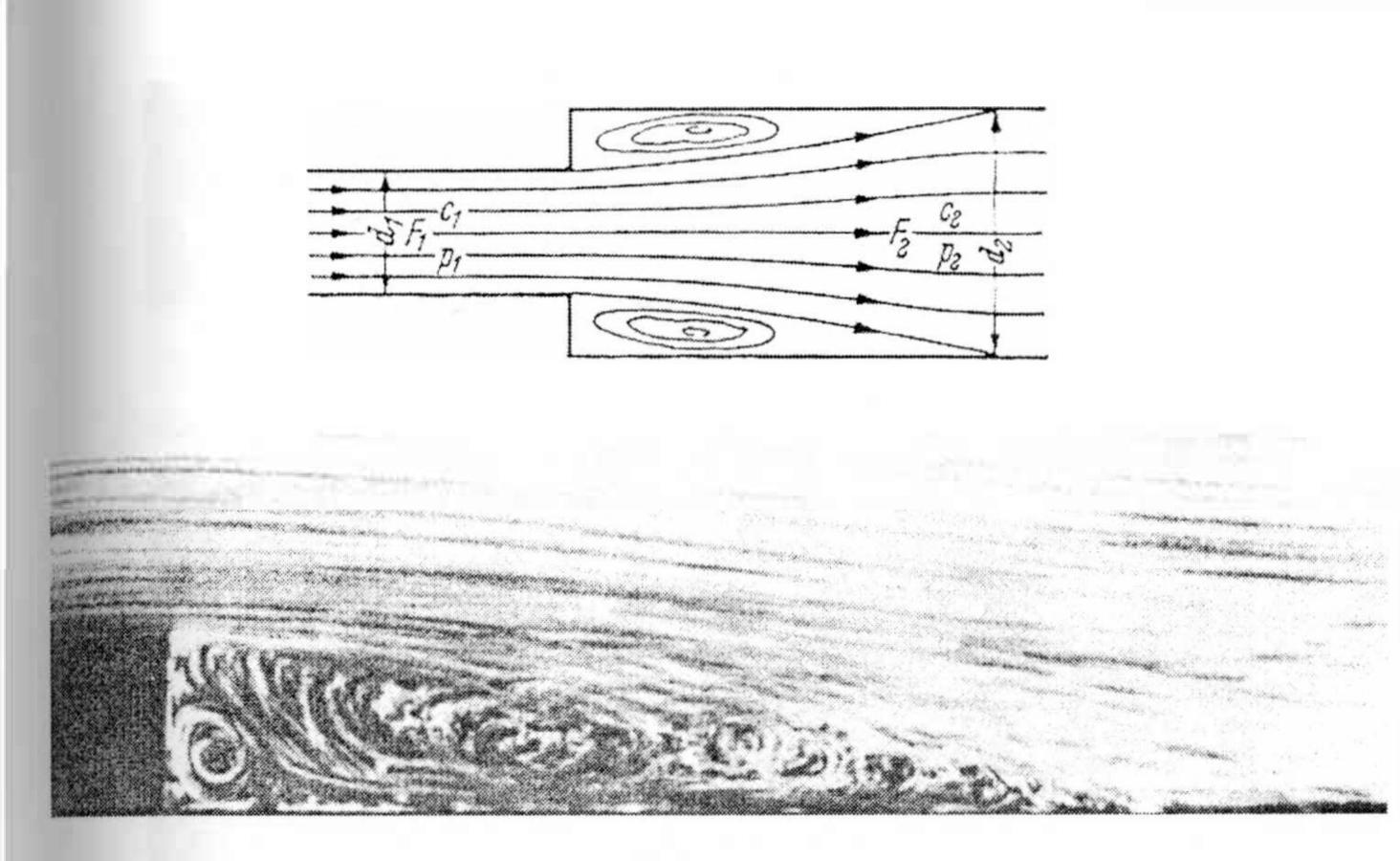
Цам, 214 Циен Г. С., 254, 280 Цингер В. Я., 159 Циолковский К. Э., 160–165 Циперон Марк Туллий, 32 Чаплыгин С. А., 160, 176, 222, 248–250, 252, 267 Чебышев П. Л., 159

Шатте Й., 257 Шези, 111 Шерби С. С., 259 Шецер Лж. Д., 259 Шренк, 221 Штурм, 15

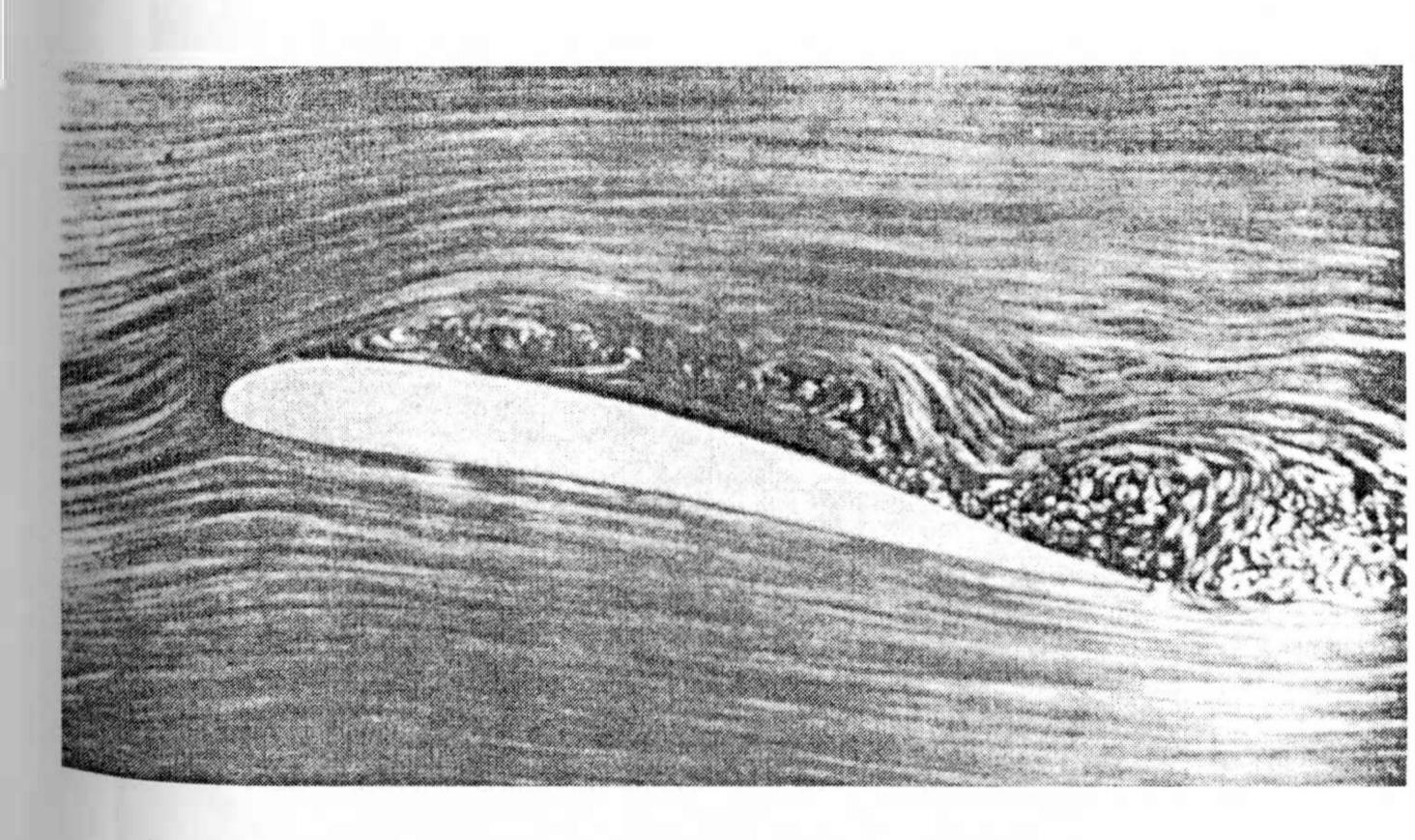
Эбергард О. фон, 260 Эггерс А. Дж., 283 Эдгар Э. Ч., 12 Эйлер Леонард, 7, 95-101, 104, 112-115, 124, 126-131, 133, 135, 137, 144, 152, 163, 167, 186, 195, 209, 213, 239 Эмпедокл (Эмпредокл), 24 Энгельс Ф., 24 Эратосфен, 38 Эрстед, 15

Югонио Пьер Анри, 239-241, 245, 257 Юрьев Б. Н., 159, 177, 221

Якобсон, 113, 138



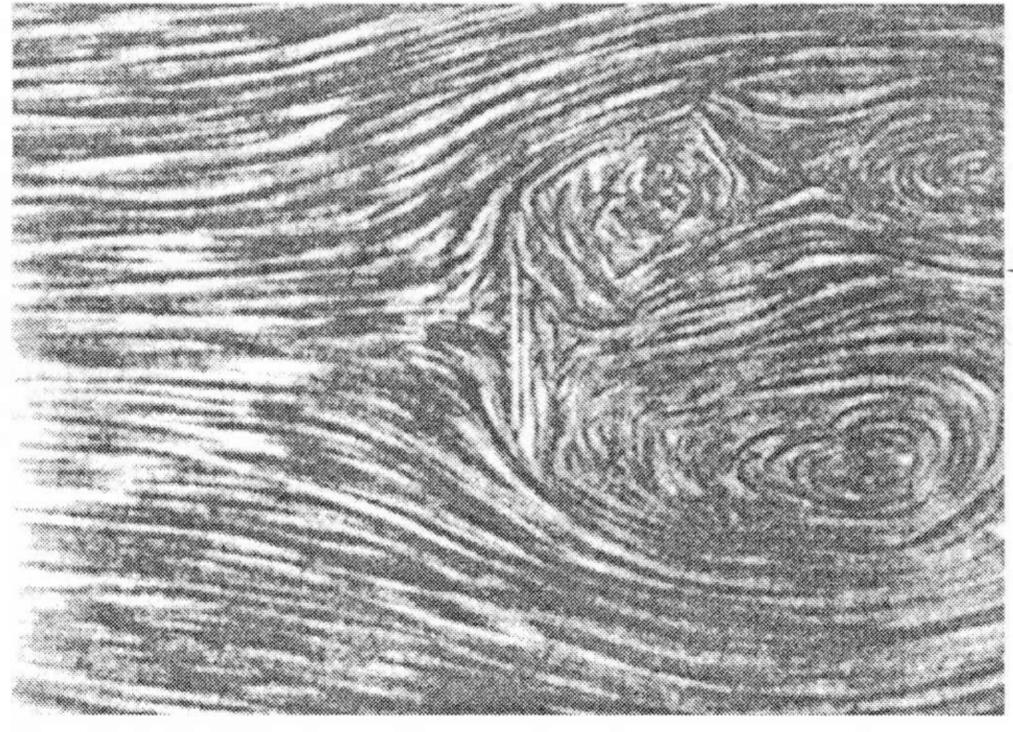
Вклейка 1. Теорема Борда



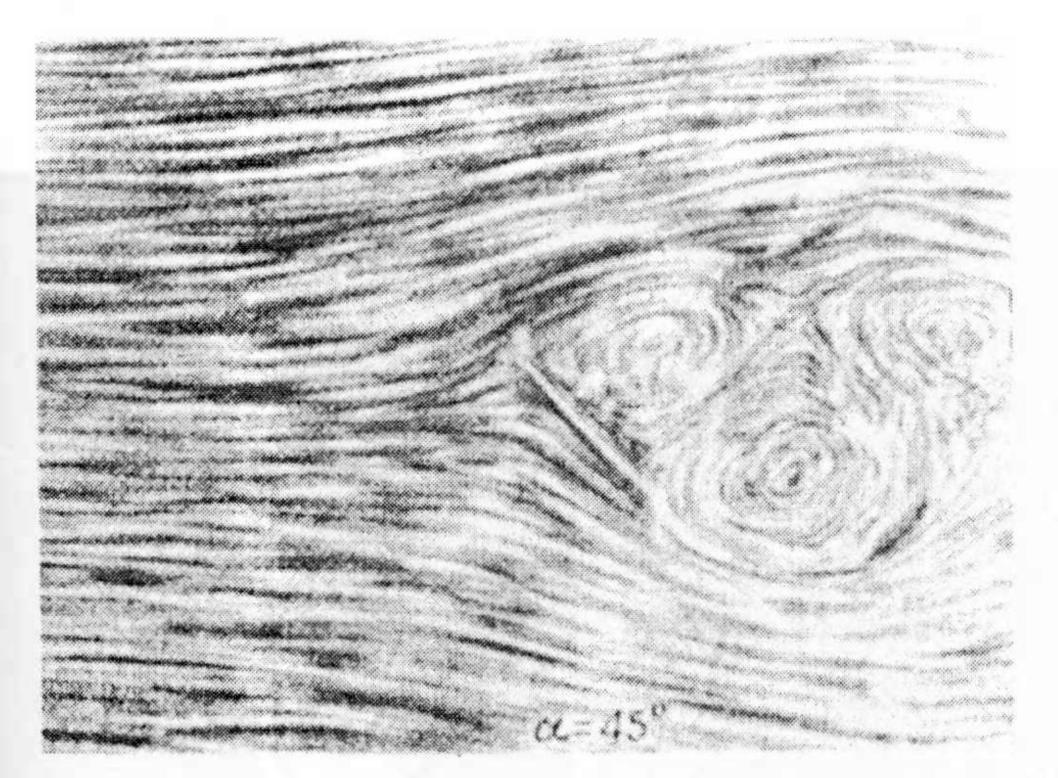
Вклейка 2. Срыв потока на верхней стороне крыла



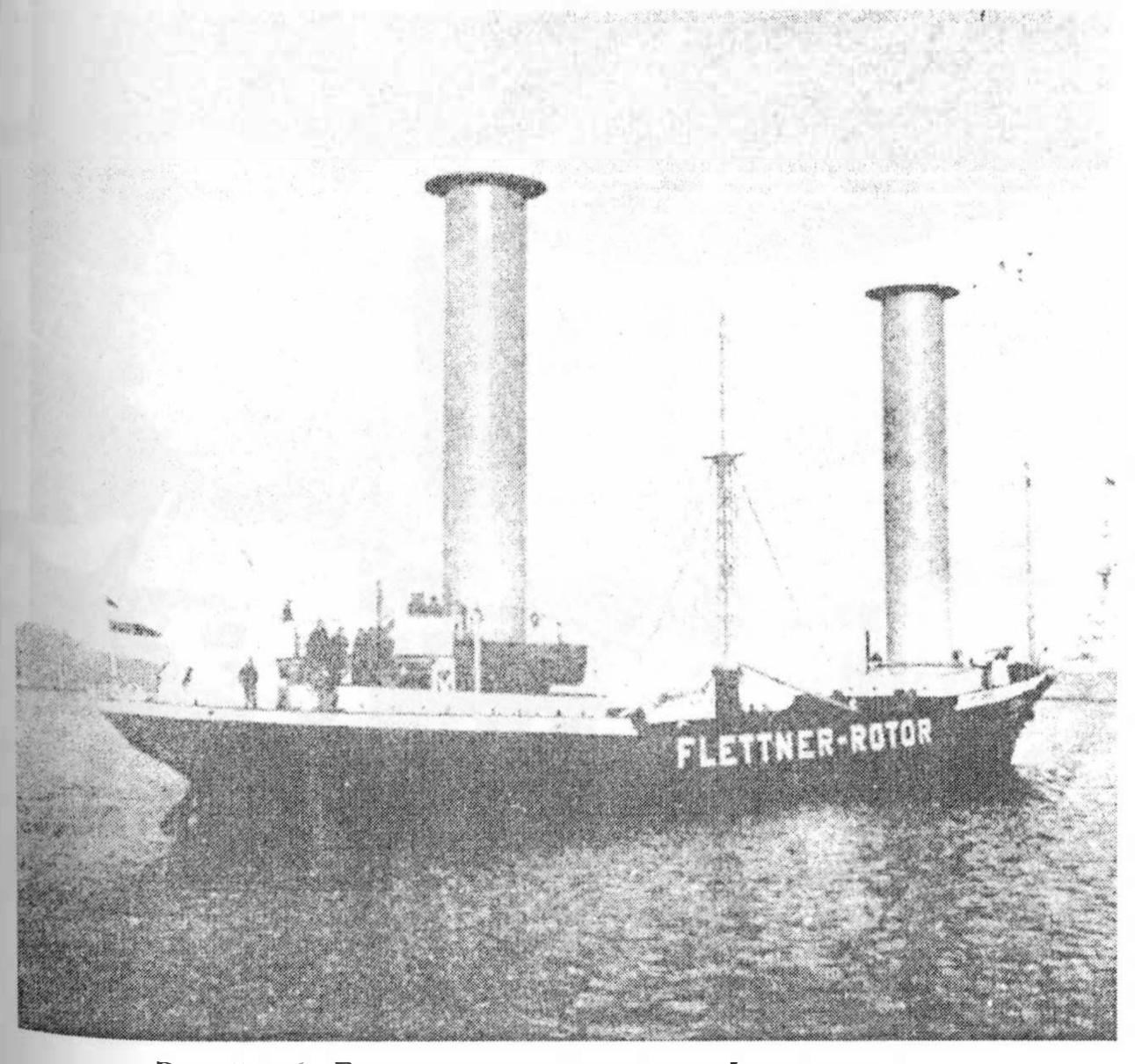
Вклейка 3. Вихрь на концах крыла и вихревой слой за крылом летящего самолета



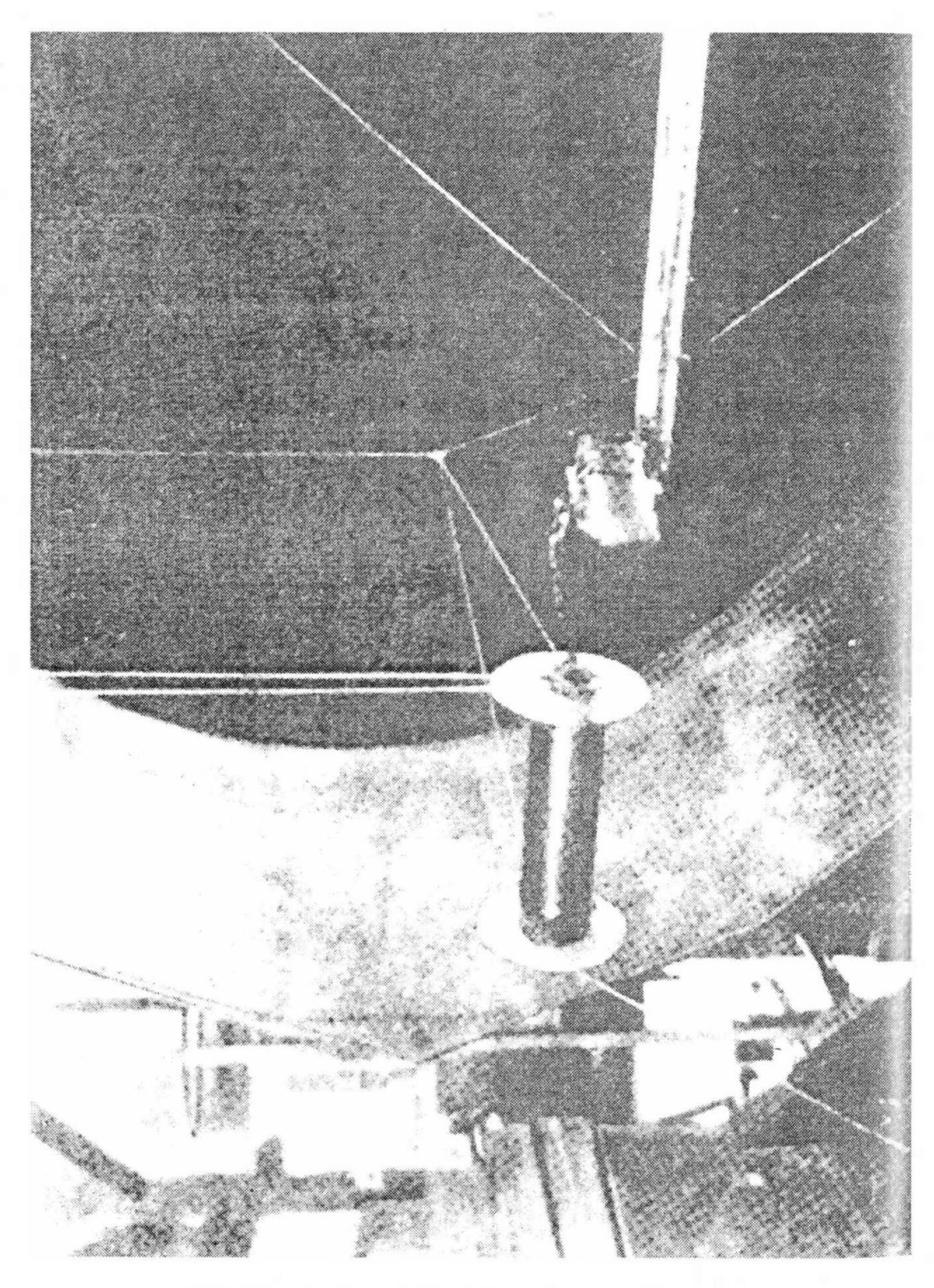
Вклейка 4. Поток огибает пластину, перпендикулярную его направлению



Вклейка 5. Поток огибает наклоненную плоскую пластину



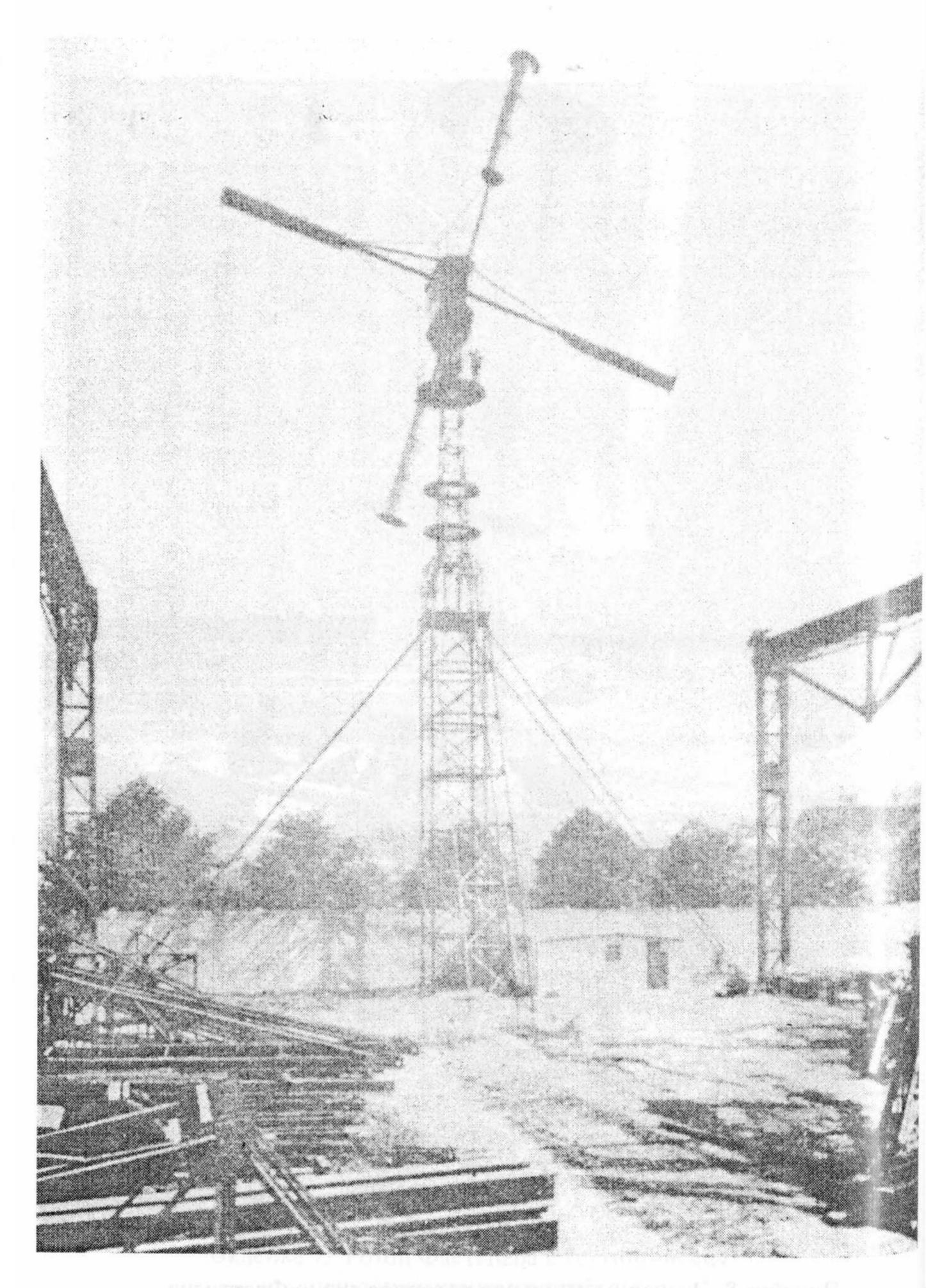
Вклейка 6. Большое роторное судно Флеттнера



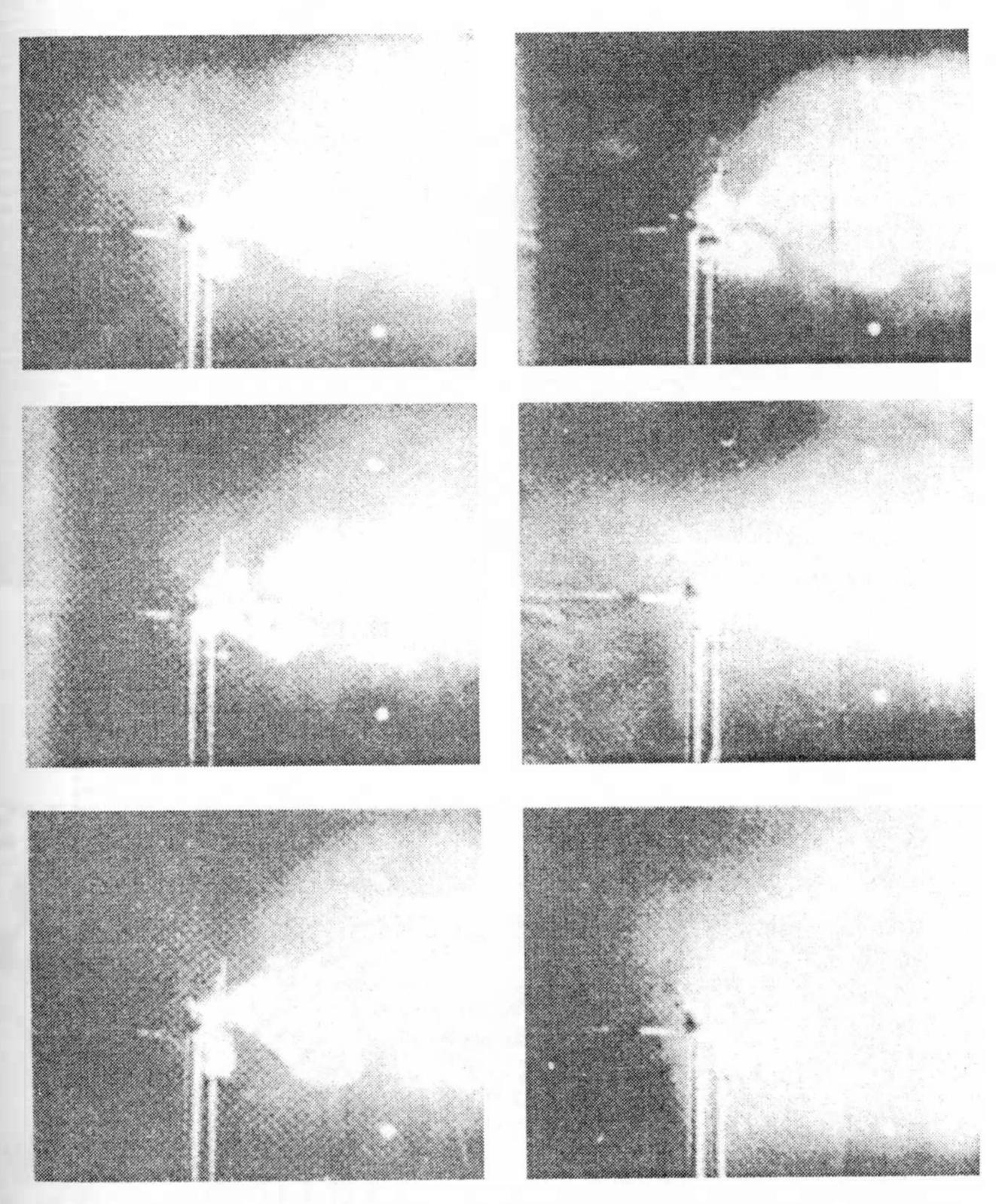
Вклейка 7. Ротор Флеттнера в геттингенских аэродинамических трубах



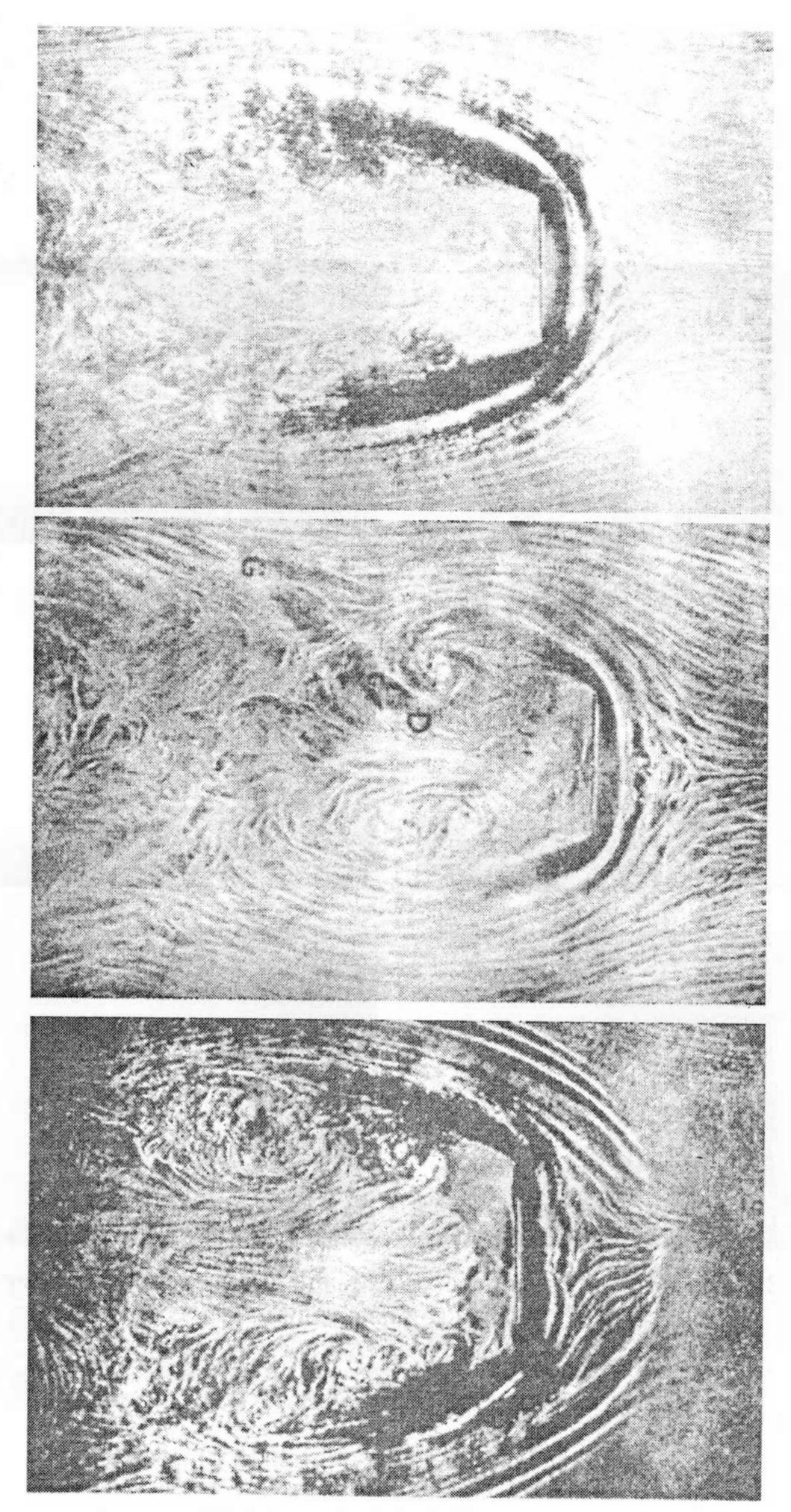
Вклейка 8. Экспериментальное роторное судно Флеттнера



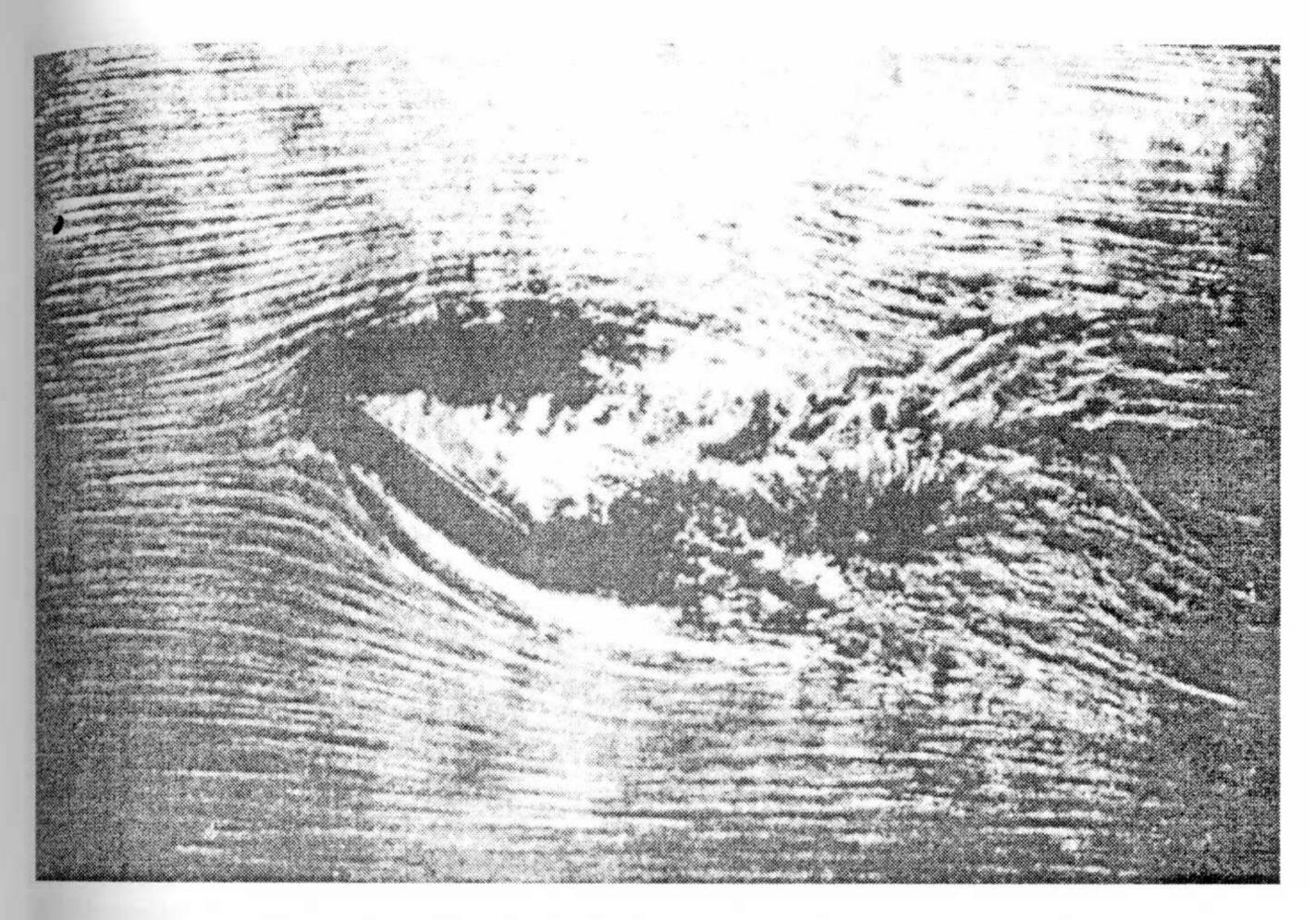
Вклейка 9. Роторная мельница Флеттнера



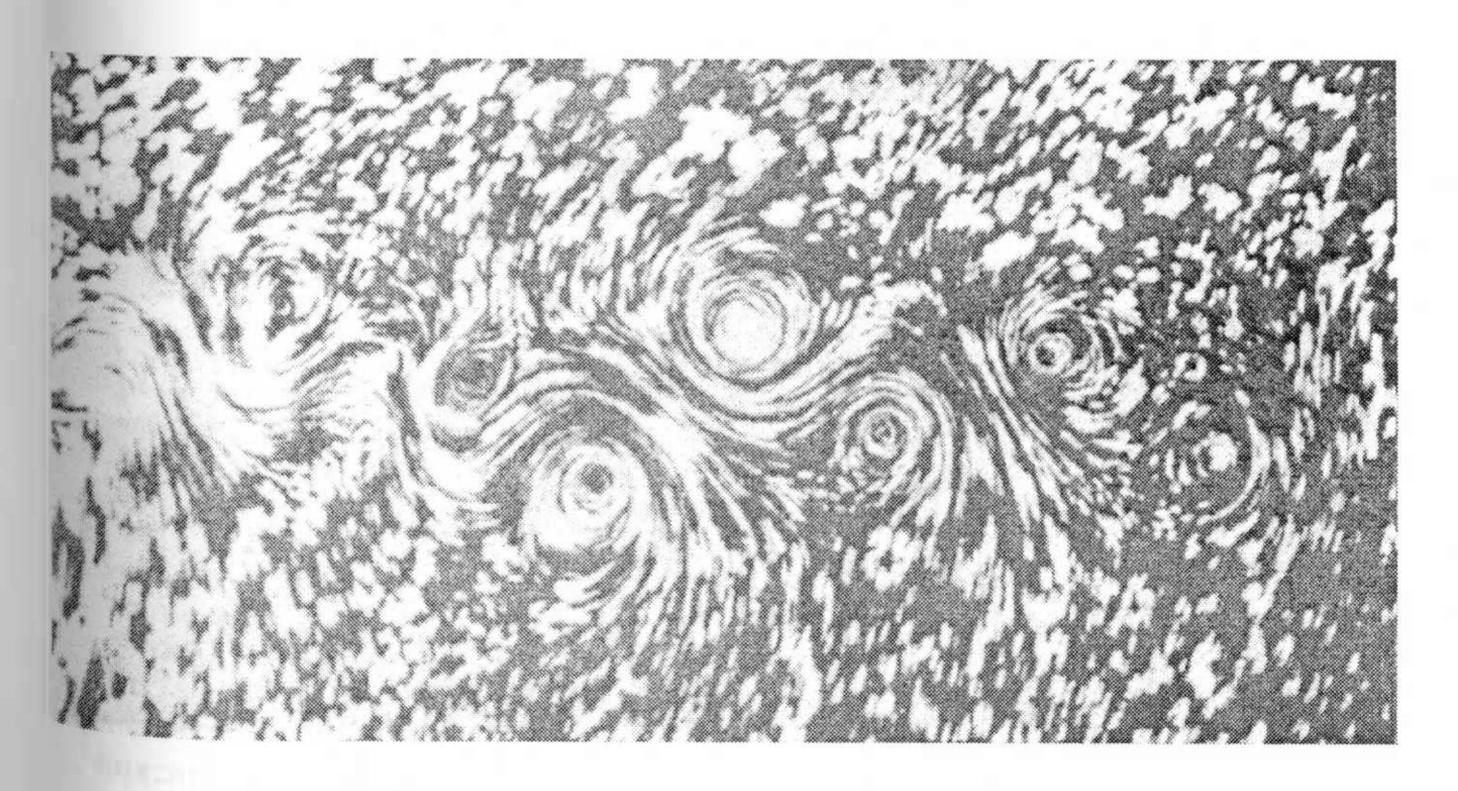
Вклейка 10. Образцы потоков Рябушинского при авторотации плоской пластины



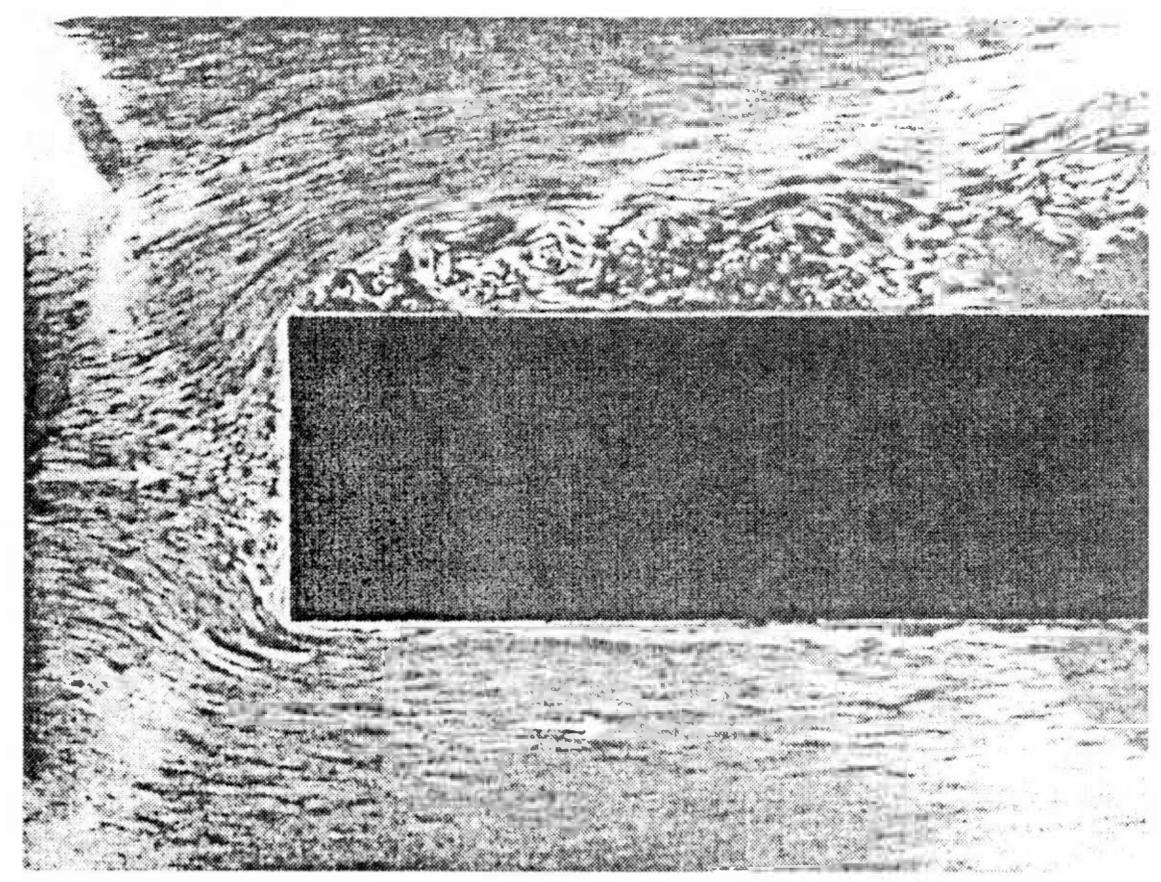
Вклейка 11. Образцы потоков Рябушинского



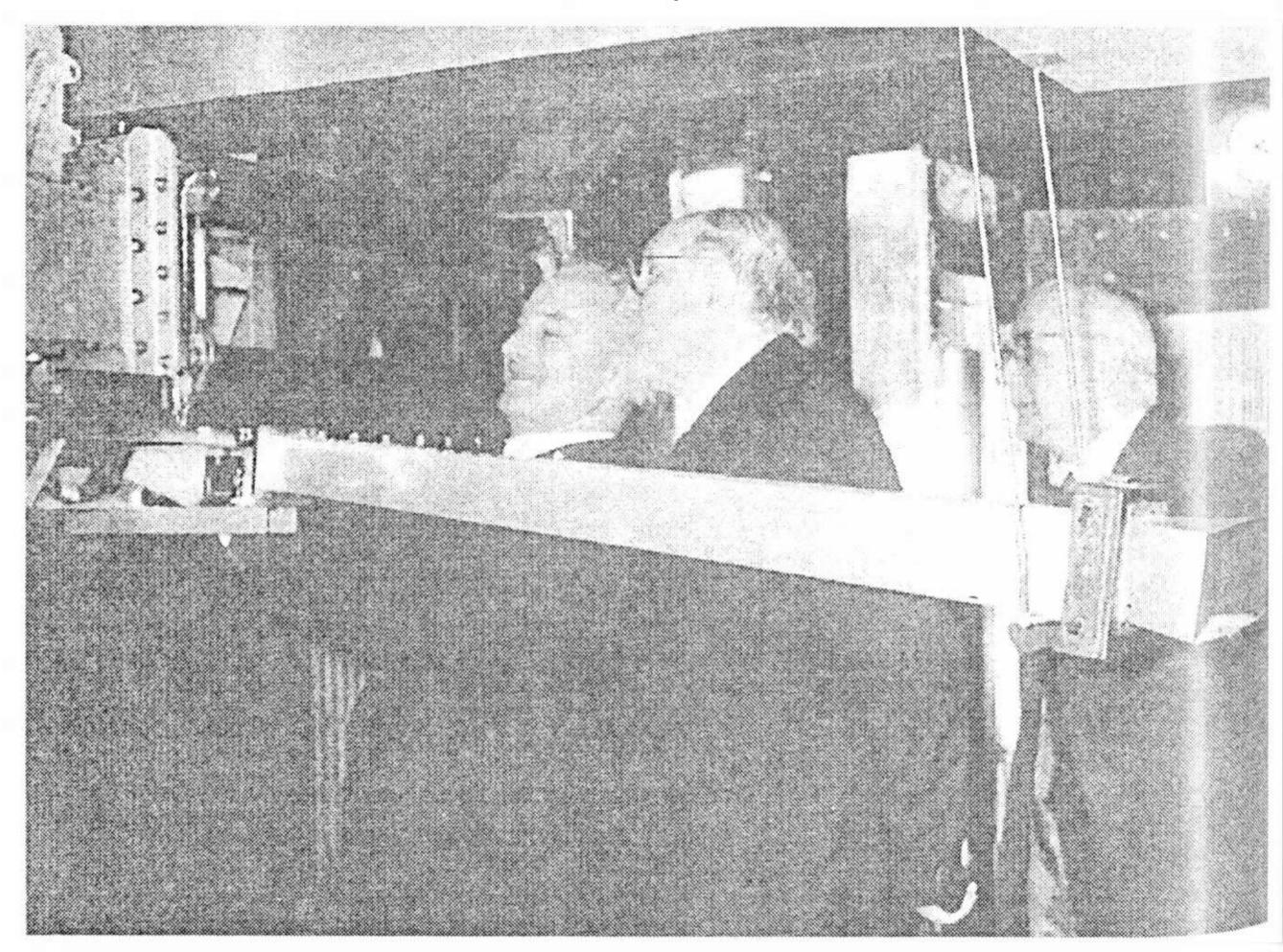
Вклейка 12. Образцы потоков Рябушинского



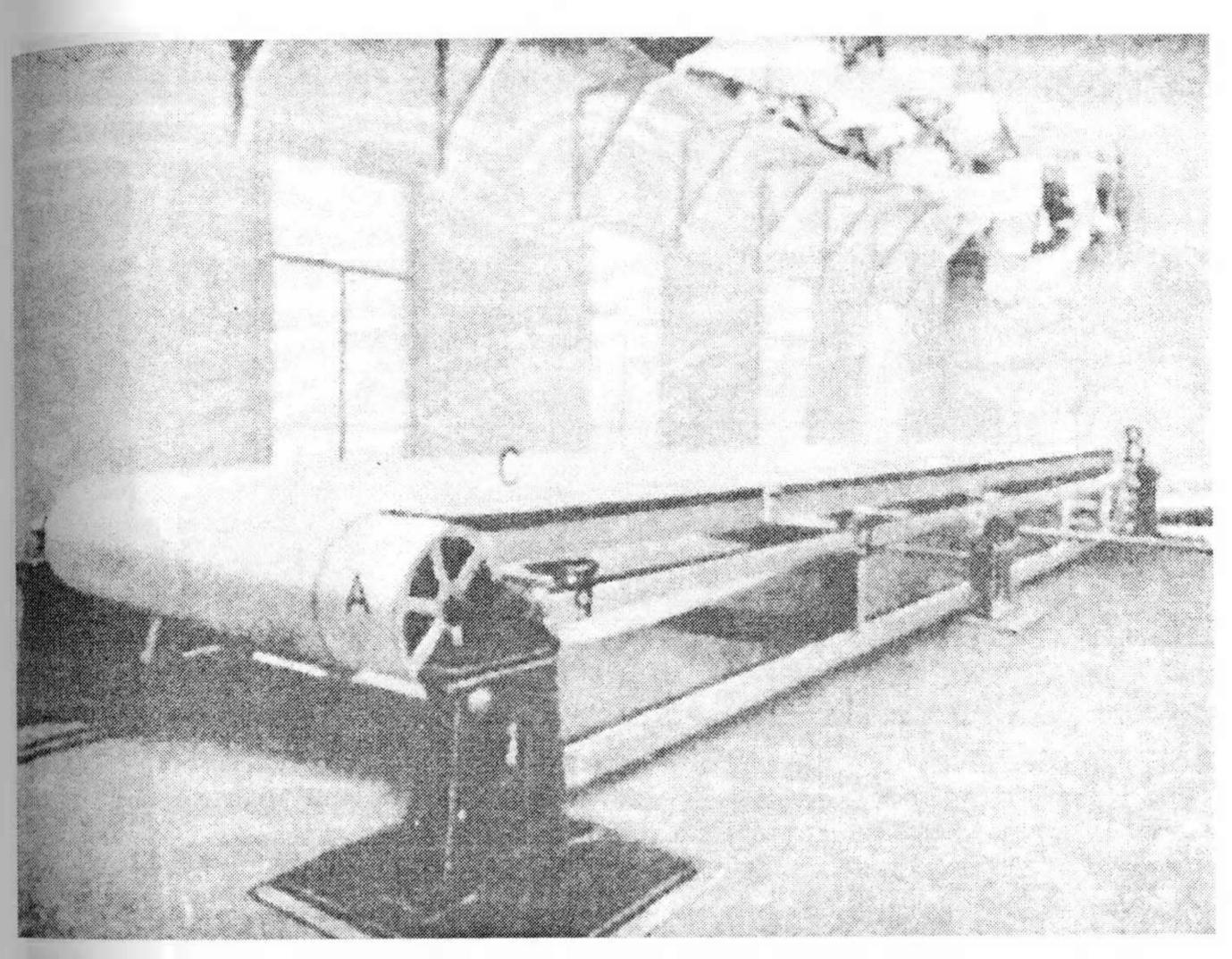
Вклейка 13. Вихревые слои, следующие за цилиндром



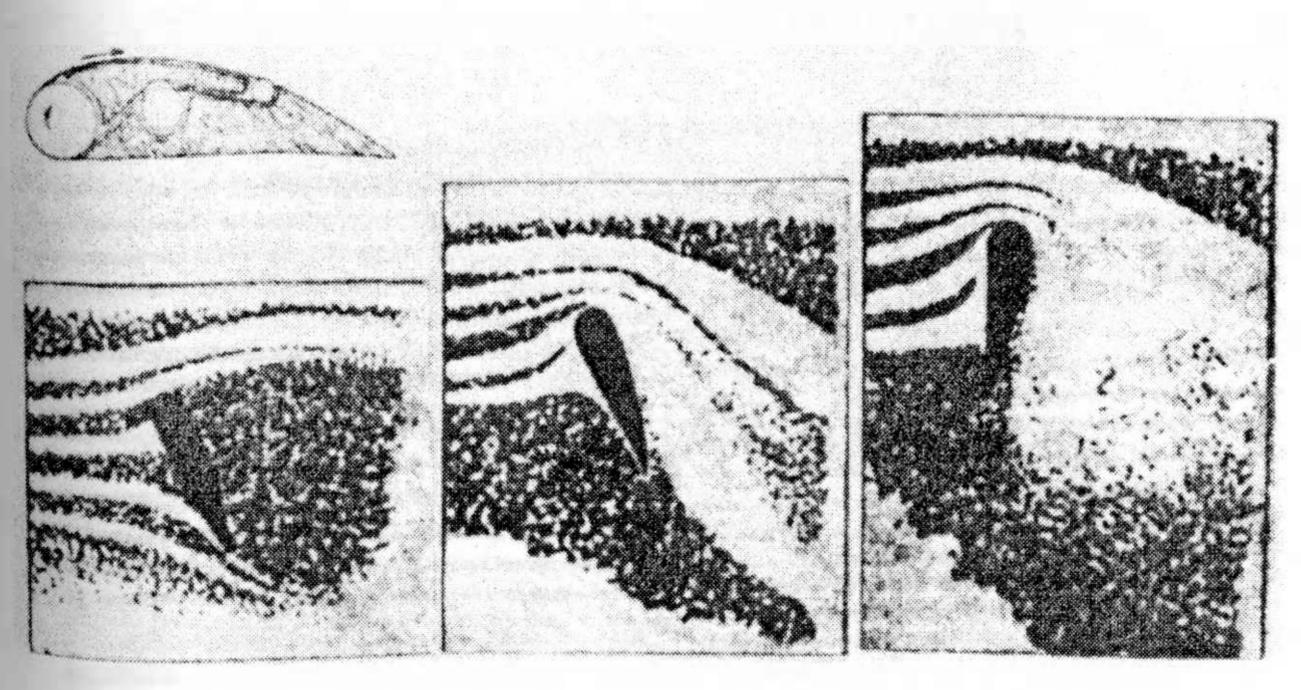
Вклейка 14. Срыв потока



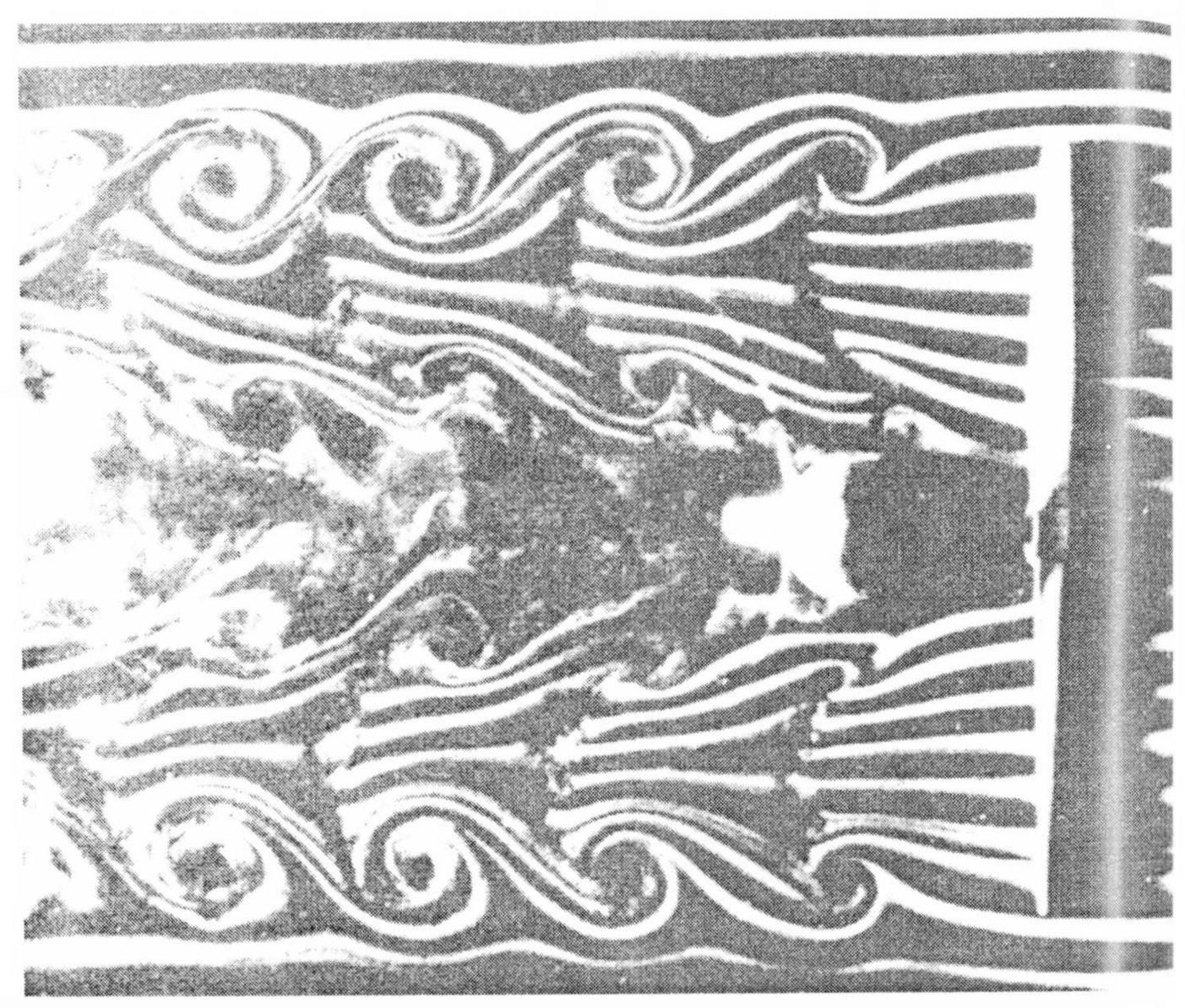
Вклейка 15. (Слева направо) Г.А.Токати, Дмитрий Павлович Рябушинский и сэр Джеймс Тэйт (вице канцлер), наблюдающие за образованием сверхзвусковых ударных воли в Лондонском городском университете, Лондон, 1961г.



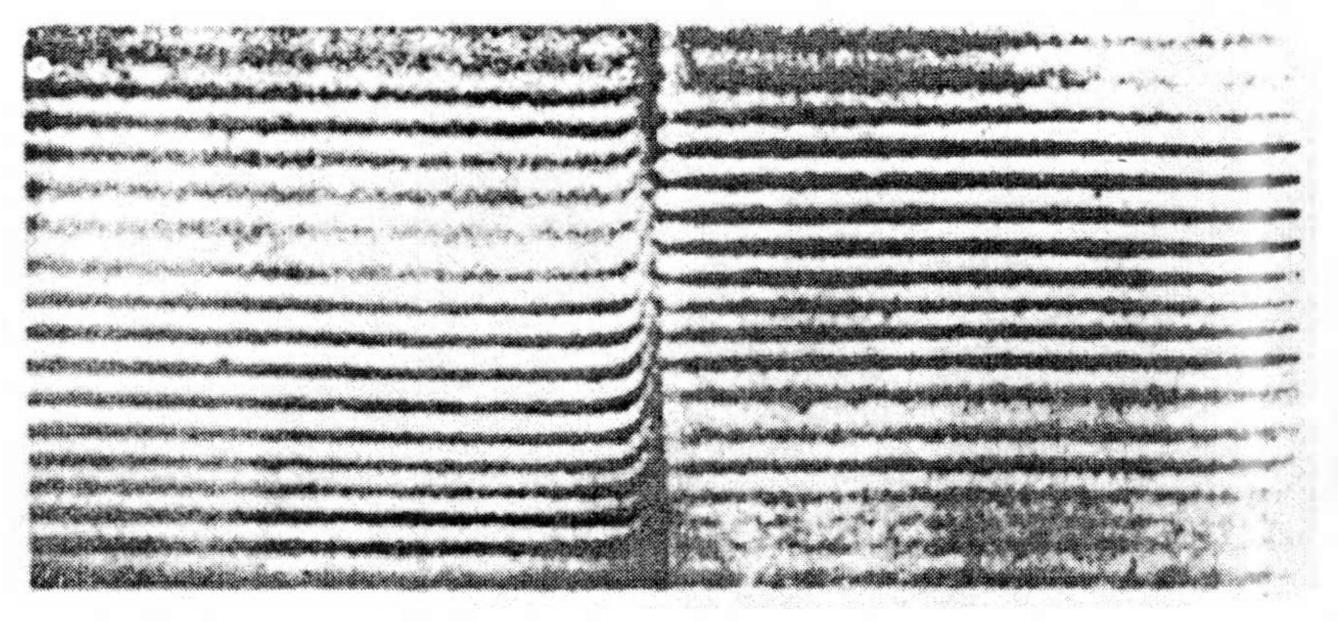
Вклейка 16. Построенная и использованная подвижная поверхность Рябушинского



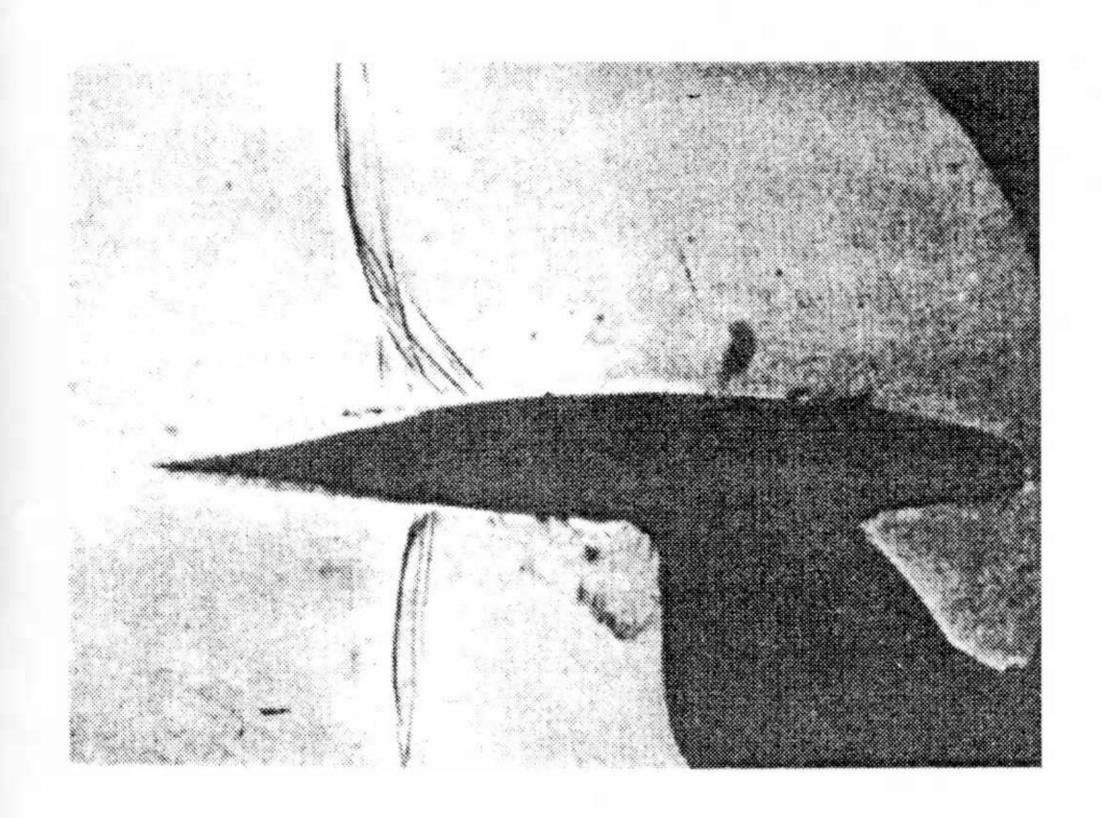
Вклейка 17. Крыло Фавра с подвижной поверхностью, задерживающее отделение до 105^н угла атаки

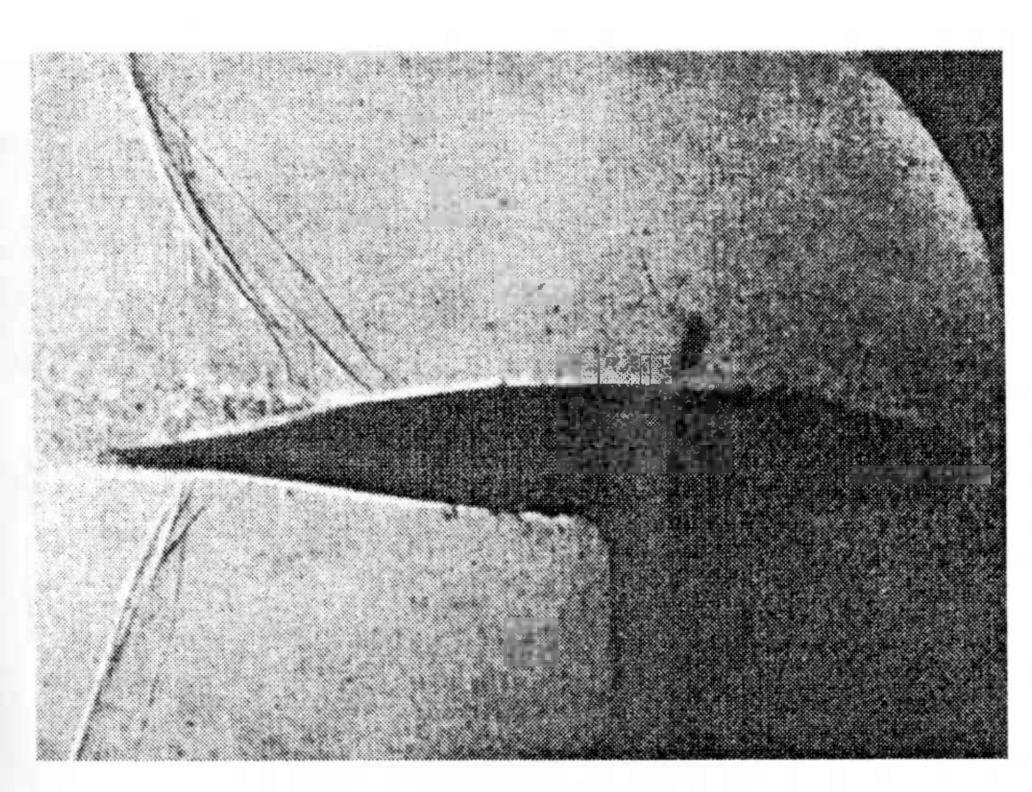


Вклейка 18. Возникновение вихрей за пропеллером

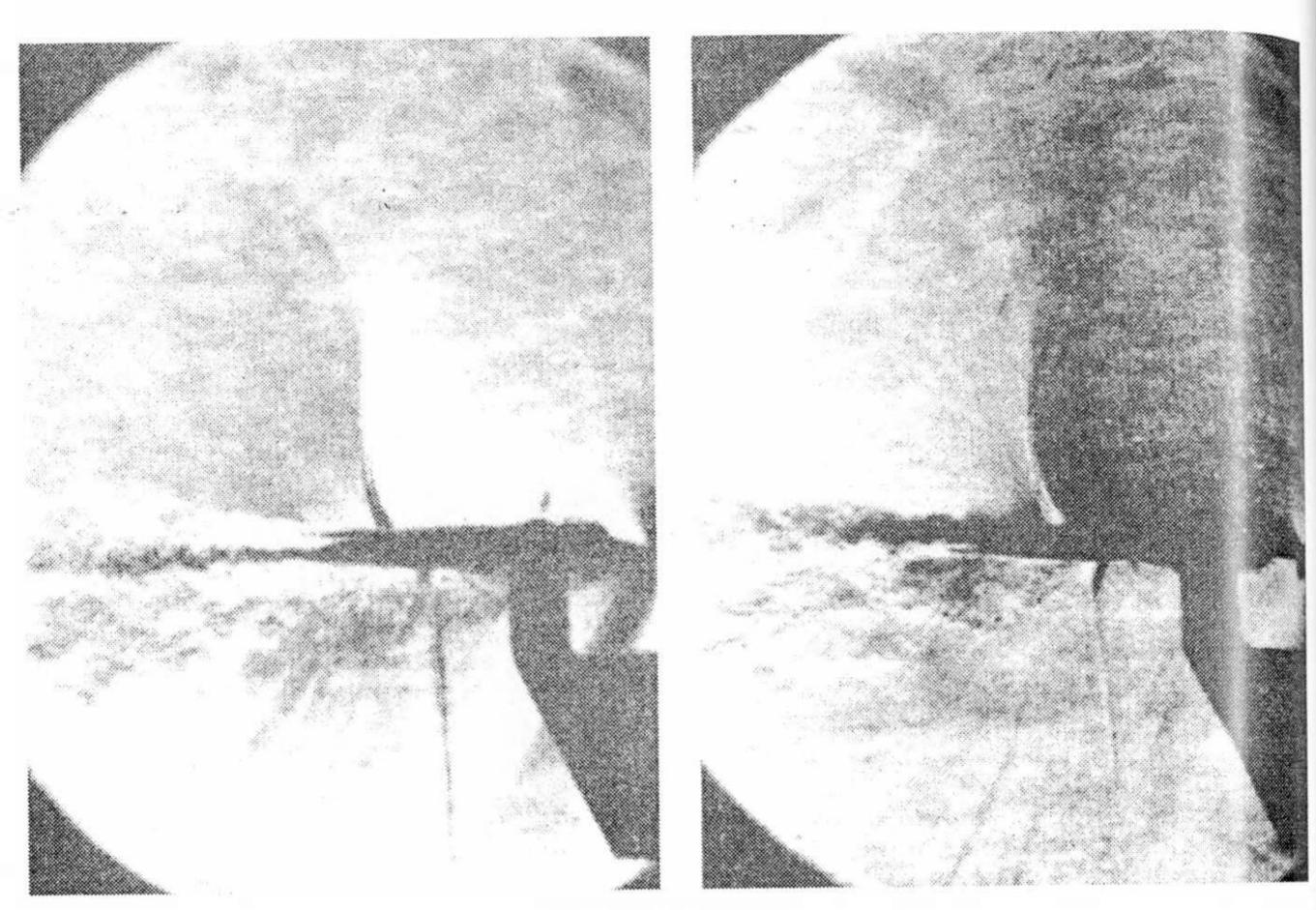


Вклейка 19. Фотоснимок искривляющихся линий тока

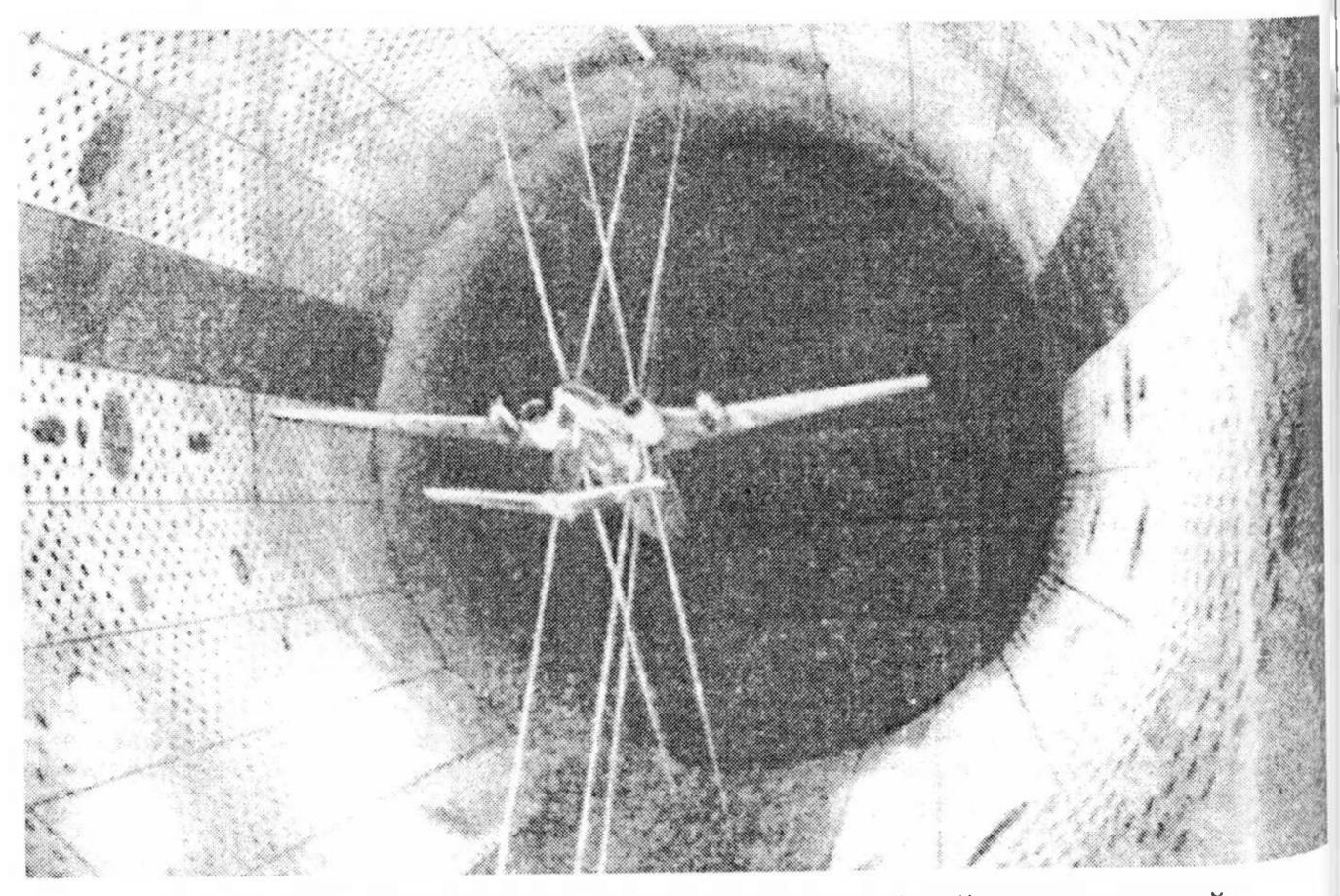




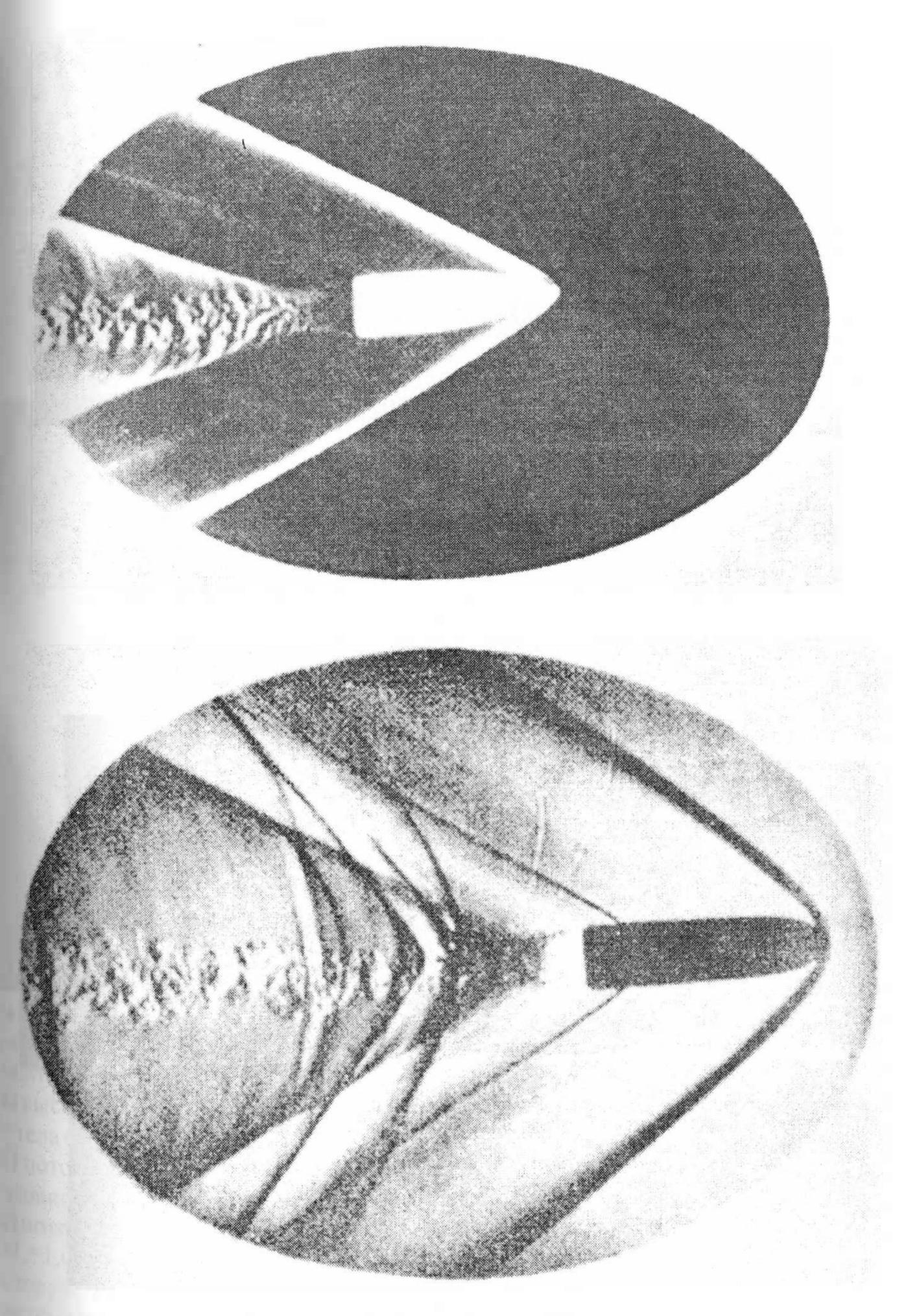
Вклейка 20. (а) и (б), а (с) на следующей странице. Образцы ударных волн при высоких дозвуковых числах Maxa (R.C. Punkhrust and P.W. Holder Wind Tunnel Technique) («Техника аэродинамических труб»)



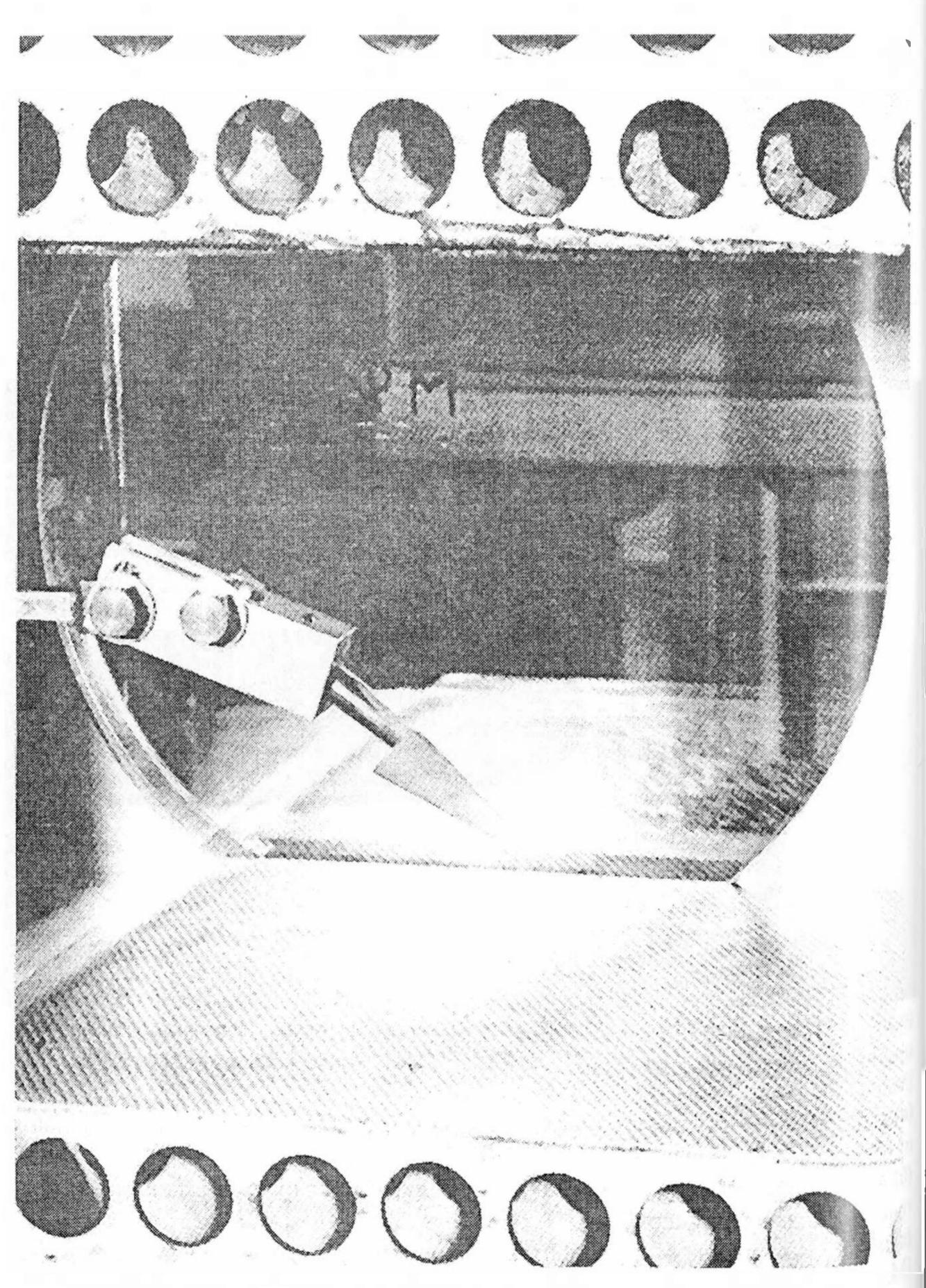
Вклейка 20 (с)



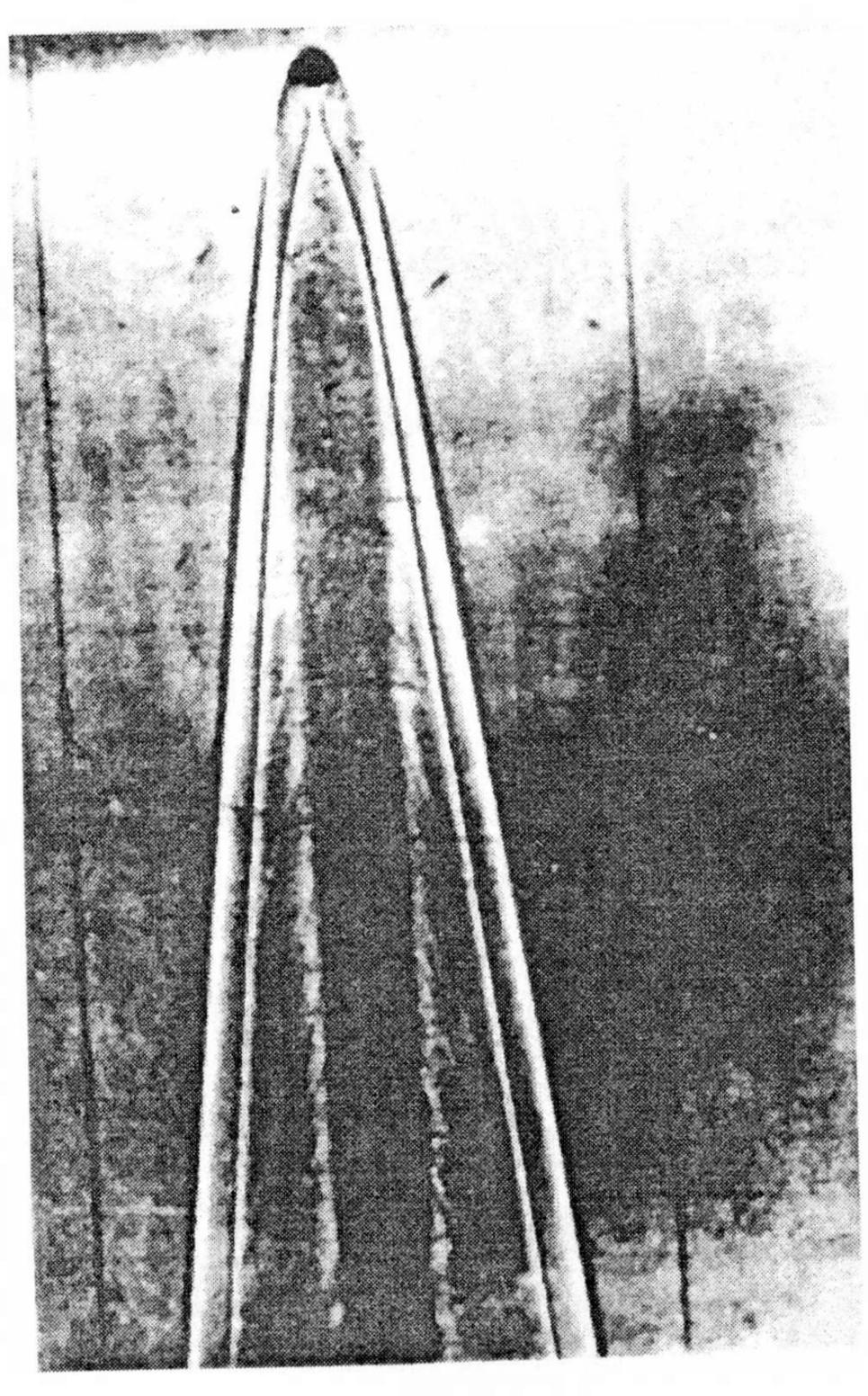
Вклейка 21. Работающее отделение крупнейшей околозвуковой аэродинамической трубы с перфорированными стенами в ЦАГИ (СССР)



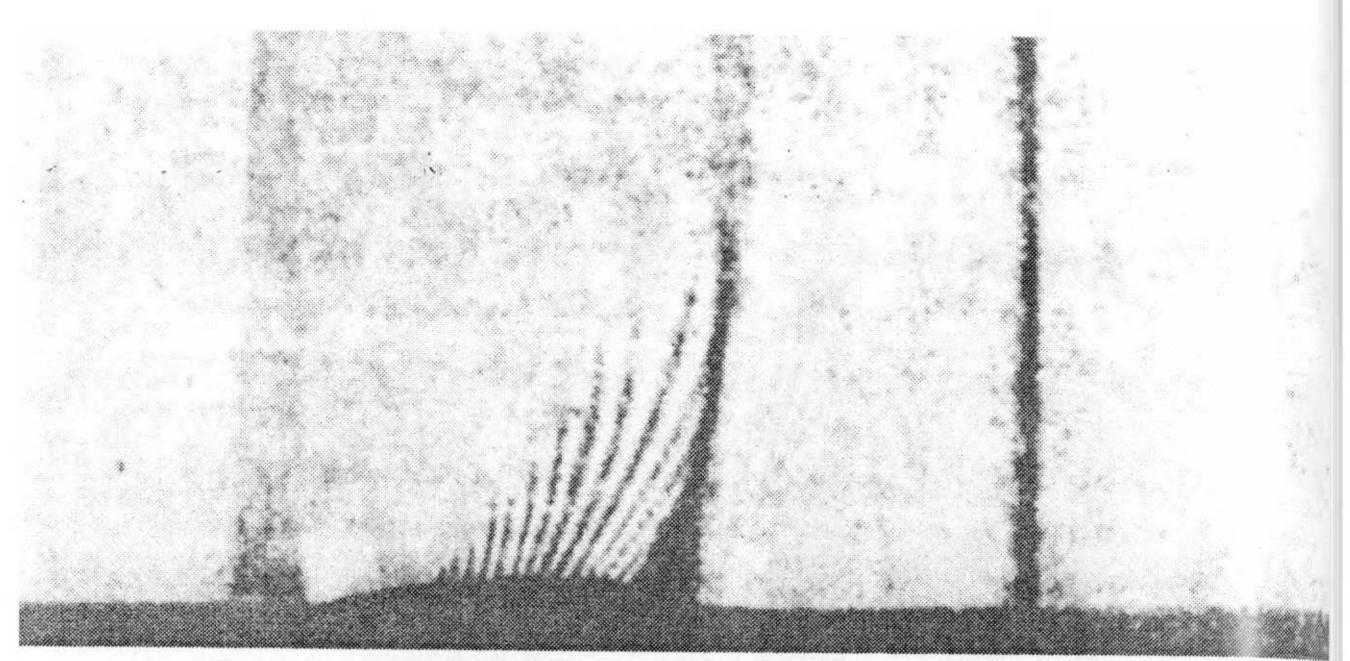
Вклейка 22. Фотоснимки Шатте



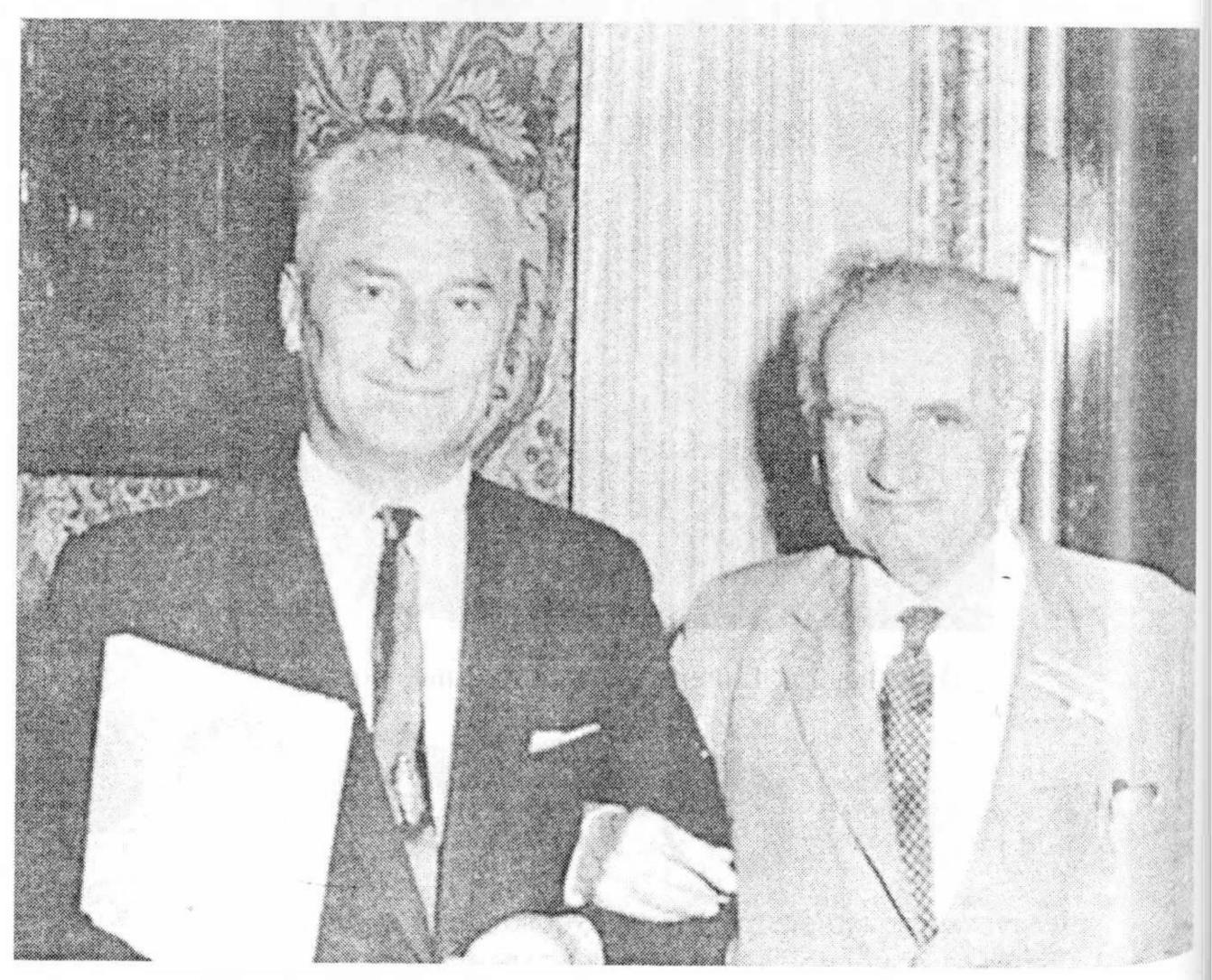
Вклейка 24. Общий вид работающего отделения сверхзвуковой аэродинамической трубы отдела аэронавтики Лондонского городского университета, Лондон



Вклейка 25. Гиперзвуковые ударные волны



Вклейка 26. Веер ударных волн на стене аэродинамической трубы (поток слева направо)



Вклейка 27. Г.А.Токати (слева) и Теодор фон Карман

Токати Григорий Александрович История и философия механики текучих сред

ЛР № 021053 от 05.05.96 Подписано в печать 15.10.99 Формат 60×88 ¹/₁₆ Печать офсетная Гаринтура Таймс Бумага офс. № 1 Печ. л. 18,75+1,25 вкл. Тираж 3000 экз. Заказ 159

Северо-Осетинский научный центр 362025, Владикавказ, ул. Фрунзе, 24

Отпечатано в Производственно-издательском комбинате ВИНИТИ, 140010, г. Люберцы, Московской обл., Октябрьский пр-т, 403. Тел. 554-21-86

Г. Л. Токати

ИСТОРИЯ И ФИЛОСОФИЯ МЕХЛНИКИ ТЕКУЧИХ СРЕД

На протяжении веков фундаментальные проблемы флюидмеханики — изучения законов движения текучих сред — занимали многие из самых величайших умов истории человечества. В этой книге выдающийся ученый в области аэронавтики представляет увлекательную историю механики текучих сред. В центре изложения — пионерские достижения ученых и мыслителей, чьи вдохновляющие открытия легли в основу таких принципиально новых изобретений как оросительные системы, океанские лайнеры, ветряные мельницы, реактивный двигатель и космический корабль.

В начале автор представляет основы механики текучих сред, затем рассказывает об открытиях таких мыслителей как Платон, Аристотель, да Винчи, Галилей, Паскаль, Пьютон, Вернулли, Эйлер, Лагранж, Эрнст Мах и ученых 20 столетия. Особенно важным является сравнительный анализ развития механики текучих сред в бывшем Советском Союзе и на Западе. Книга заканчивается рассмотрением трансзвуковой сжимаемости и аэродинамики, сверхзвуковой механики текучих сред, гиперзвуковой газовой динамики и всеобщей непрерывности вещества и энергии.