ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ –
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени А.И.ЛЕЙПУНСКОГО

ОТДЕЛЕНИЕ 6 – ИНСТИТУТ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

УЧЕБНО-НАУЧНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ
«ОБОРУДОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК»

ИНСТИТУТ
ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

П. Л. КИРИЛЛОВ

ИМЕНА И ЧИСЛА ПОДОБИЯ (ЧЕТЫРЕ ПОРТРЕТА)

Обнинск–2006

КИРИЛЛОВ П.Л.

ИМЕНА И ЧИСЛА ПОДОБИЯ
(четыре портрета)

«... Память замечательных людей скоро исчезает по причине недостатка исторических записок ...».

/Из примечаний А.С. Пушкина к «Евгению Онегину»/

- 2006-

УДК 53(092)

Кириллов П.Л. Имена и числа подобия (четыре портрета). — Обнинск, ГНЦ РФ ФЭИ, 2006. — 116 с.

В книге представлены достижения и судьбы четырех ученых XIX – XX веков, внесших крупный вклад в развитие теории теплоты и гидродинамики. Их именами: Фурье, Рейнольдс, Прандтль, Нуссельт названы числа подобия (Fo, Re, Pr, Nu).

Книга рассчитана на студентов вузов и специалистов по технике, особенно по теплофизике и гидродинамике.

© ГНЦ РФ ФЭИ, 2006.
© Кириллов П. Л.

Вместо предисловия

Науку делают реальные люди и по мере того, как мы отдаляемся от них во времени, теряется связь между их открытием и именем. Мы с малых лет знаем о проводниках электрического тока или тепла, относимся к этому так, как будто эти понятия были присущи человечеству вечно. Но это совсем не так! За каждым научным термином «температура», «теплота», «напряжение» и т.д. стоят труд, опыты, размышления конкретных людей. И об этих людях надо хотя бы изредка вспоминать.

Наука о теплообмене на протяжении последних трех столетий делалась многими людьми. Основополагающий след в ней оставили те, именами которых в учебниках и справочниках названы числа подобия. Эти безразмерные комплексы обычно обозначаются из двух первых букв фамилий ученых. Некоторые (несведущие) физики иронизируют о том, что в теплофизике «произведение или функция от двух фамилий дает третью». Студенты, инженеры, конструкторы, проектировщики так свыкаются с практикой использования чисел подобия, что редко вспоминают истоки и принципы теории подобия. Только некоторые специалисты знают, что это были за люди, «именами-числами» которых они оперируют.

Что же привлекает в той или иной судьбе человека? Как правило, ее необычность, неординарность, блестящие идеи, озарения или ошибки, иногда трагичность.

«История науки не может ограничиться развитием идей — в равной мере она должна касаться живых людей, с их особенностями, талантами зависимостью от социальных условий страны и эпохи... Ясно поэтому, что жизнь и деятельность передовых людей — очень важный факт в развитии науки, а жизнеописание их является необходимой частью истории науки» /С.И. Вавилов/.

Любое физическое уравнение всегда можно выразить через безразмерные величины так, что оно примет простой вид и будет содержать минимальное количество независимых переменных. В теореме, известной под названием «π-теоремы» (Рябушинского – Букингема) доказывается, что «если для системы из «n» переменных существует «k» основных размерностей, то любую физическую зависимость между этими «n» переменными можно выразить в виде уравнения, содержащего (n – k) безразмерных величин (комплексов)». Эти безразмерные комплексы называют числами подобия и обычно обозначают символами из двух первых букв фамилий знаменитых ученых:

Фурье (Fourier) – Fo;
Рейнольдс (Reynolds) – Re;
Прандтль (Prandtl) – Pr;
Нуссельт (Nusselt) – Nu.

Общее количество чисел подобия, используемых в технике, насчитывает более пятидесяти, но, конечно, не все они одинаково часто встречаются в расчетах.

Выбор личностей ученых в этой книге определялся четырьмя наиболее значительными публикациями последних двух столетий (XIX, XX) в области гидродинамики и теплообмена.

Многие согласны, что одна из наиболее важных книг первой половины XIX столетия — книга Жана Батиста Фурье «Аналитическая теория тепла», основы которой были представлены 21-летним автором в 1807 году, но не были сначала приняты его знаменитыми современниками, такими как Лаплас, Лагранж, Лежандр. Книга была опубликована лишь через 15 лет (1822). В 2002 году (180 лет спустя) этому событию была посвящена в Гренобле (Франция) 12-я Международная конференция по теплообмену с участием более 500 ученых из разных стран.

Жан Фурье — весьма незаурядная личность, живший и творивший в бурную эпоху французской революции, сподвижник Наполеона. Жизнь его была полна опасностей и часто могла привести к гильотине – одни власти (в начале революции) преследовали его за недостаток революционности, другие (при реставрации) за слишком большой революционный пыл. Он был не только ученым, но, по настоянию Наполеона, одно время был добросовестным префектом Гренобля, занимался хозяйственной деятельностью, организовал в Гренобле, где было всего 20 тысяч жителей, университет (1808 – 1810), занимал должность ректора.

Во второй половине XIX века была опубликована широко известная работа Осборна Рейнольдса «О двух способах движения воды в трубах» (1884). Едва ли есть другой такой простой и наглядный эксперимент о переходе ламинарного течения в турбулентное, который бы цитировался во всех (без исключения) школьных и вузовских учебниках физики. Обычно именно этот эксперимент вспоминают при имени Рейнольдса, но он проводил самые различные исследования (от теории смазки до работ по гравитации). Кругозор его поразителен! Рейнольдс был одним из оригинальных и независимых людей своего времени с собственным мнением о характере преподавания новой дисциплины. Деятельность О. Рейнольдса совпала с эпохой бурного развития многих областей физики и термодинамики во второй половине XIX и начале XX веков. В эти годы трудились его современники: Г. Ламб (1849 – 1934), Дж. В. Струтт (более известный как лорд Рэлей, 1842 – 1919), Дж. Гиббс (1839 – 1903), Л. Больцман (1844 – 1906), Ван-дер-Ваальс (1837 – 1923) и многие другие.

Стремительное развитие аэродинамики на рубеже XIX и XX веков привело к открытию теории пограничного слоя 29-летним немецким ученым Людвигом Прандтлем (1904). Его деятельность, кроме аэродинамики, охватывала различные области техники – теорию пластичности, теорию теплообмена и многие другие. Теория пограничного слоя развивалась преимущественно в Геттингене, где Л. Прандтль создал знаменитую на весь мир шко-

лу аэродинамиков, множество его учеников (более 80 докторов наук) работали в разных странах. Пережив семейные несчастья, фашизм и трагедию второй мировой войны, он создал: «Путеводитель по гидроаэромеханике», содержащий описание основ физических явлений этой области.

Менее известны, хотя и не менее значительны, труды его современника, другого немецкого ученого – Вильгельма Нуссельта, опубликовавшего две основополагающие статьи по законам теплопередачи: «Теплопередача в круглых трубах» (1909); «Основные законы теплопередачи» (1915). В этих работах применение анализа размерностей к процессам теплообмена позволило В. Нуссельту обобщить ранее полученные частные результаты разных исследователей и наметить новые эксперименты. Поэтому 1915 год можно считать годом рождения науки о конвективном теплообмене. Его жизнь не была заполнена бурными событиями, но именно число Нуссельта (Nu) наиболее часто используется в различных расчетах теплообмена. Уравнениями Нуссельта называют широко известную функциональную связь, используемую для расчетов конвективного теплообмена в стационарных условиях турбулентного режима:

$$Nu = f\,(Re,\ Pr).$$

Для нестационарных вязкостных течений известна связь

$$Nu = f\,(Fo,\ Re,\ Pr,\ l/d).$$

В конце своей жизни он написал двухтомный учебник по теплопередаче, по которому учились несколько поколений инженеров. Этот учебник в обиходе называли «Большой Нуссельт».

Ниже содержатся краткие биографии перечисленных выше четырех ученых в контексте событий того времени. Они были очень разными людьми и многодетными, и одинокими, и счастливыми, и не очень, с разными характерами, некоторые дожили до старости, другие ушли из жизни раньше, но все отдали себя науке. Дж. Максвелл писал: «Наука захватывает нас только тогда, когда, заинтересовавшись жизнью великих исследователей, мы начинаем следить за историей их открытий».

Эта книга дает возможность читателю познакомиться с несколькими известными учеными — основоположниками науки о теплообмене и гидродинамике. Автор считал бы свою задачу выполненной, если смог пробудить интерес к таким людям, а читатель нашел здесь пищу для ума и размышлений.

Жан Батист Жозеф Фурье

21.03.1768 – 16.05.1830

Жозеф Фурье — французский математик, без имени которого сегодня немыслим ни один курс математики, физики и теории теплообмена. Далекие предки его были земледельцами в Лотарингии, а позже стали мелкими предпринимателями.

Отец Жозефа был бедным портным в Оксере, провинция Бургонь (Auxerre, Bourgogne), городке с 10000 жителей. После смерти (1757 г.) его первой жены, от которой у него было трое детей, отец через 2 года женился вторично на Жермен Лебег. От этого брака родилось 13 детей, и Жозеф был девятым (по другим сведениям десятым). Он родился 21 марта 1768 г. При крещении ему дали имя Жан-Батист-Жозеф. Девять его братьев умерли в младенчестве, двое стали портными, двое служили в армии, но он не поддерживал с ними связь. Когда ему было 8 лет, умирает его мать, а через два года — отец. В 10 лет он — круглый сирота. Органист Оксера принимает его в пансион, учит начальной грамоте в школе, которая готовила музыкантов для собора. Здесь же он изучал латынь, французский и показал большие успехи. Затем в его жизни принимает участие церковь, о нем заботится епископ, его помещают в колледж Оксера, поскольку один из его предков был канонизированный блаженный монах — Пьер Фурье.

Людовик XV создал военные школы, в которых учащимся кроме военного давалось классическое образование. Из 12 таких школ 10 были под покровительством бенедиктинцев (члены католического монашеского ордена, основанного около 530 г. н. э.). В одной из таких школ учился и Бона-

парт, который был на год моложе Фурье. Школа в Оксере была организована в 1777 г. Первоначально она предназначалась для детей дворян, которые намеревались сделать военную карьеру. Учились в школе и дети не дворян, но им не разрешалось учиться фехтованию и танцам (!). В 1780 г. Жозефа помещают в такую королевскую военную школу в Оксере на бесплатное обучение. Школа дает современное по тем временам образование: изучается латынь, немецкий язык. Дисциплина в школе строгая, но отношение к ученикам доброжелательное, телесные наказания отменены. Его литературный талант обнаруживается в 12 лет. Он хорошо пишет сочинения, и, по свидетельству Араго, написанные им оригинальные проповеди высокие сановники церкви отправляли в Париж, без зазрения совести выдавая их за свои. Жозеф впитывает знания и становится первым учеником. Днем он собирает огарки свечей, а ночью, закрывшись в класс, много читает. Его увлекает математика, особенно геометрия и алгебра. В 14 лет он проштудировал 6 томов «Курса математики» Безу (de Bezout), достиг больших успехов в риторике и был послан на два года совершенствоваться в Парижский колледж. В 1783 г. он получает первую премию за реферат по книге «Общая механика». Выпускникам из школы были две дороги – либо быть военным, либо священнослужителем. Жозеф хотел пойти в артиллерию, но даже если бы он был вторым Ньютоном, этот путь для него был закрыт, так как он был беден и не был дворянином. За 15 летнего выпускника ходатайствовал перед военным министром знаменитый ученый Лежандр, но безрезультатно. Поэтому в 1787 г. он решает перейти в Бенедиктинское аббатство Сан Бенуа-сюр-Луара в 30 км от Орлеана для подготовки к деятельности священника. Его интерес к математике не ослабевает, он постоянно держит связь с г-ном Бонаром — профессором математики в Оксере, так как не был уверен в правильности решения стать священником. Подготовив статью по алгебре, он в письме к Бонару сообщает, что хотел бы совершенствоваться в математике. Жизнь в аббатстве была довольно аскетична, у Фурье не было научных собеседников, отсутствовали необходимые книги.

В одном из писем к своему учителю и другу г-ну Бонару в Оксер он писал: «*Одиночество лучше для научной работы, сердце проигрывает, но разум выигрывает. Я занимаюсь греческим, чтобы читать Эвклида, Диофанта, Демосфена. Сегодня мне 21 год, это возраст, когда Ньютон и Паскаль уже достигли многого, чтобы претендовать на бессмертие*».

Во второй половине XVIII столетия историческое развитие Франции подошло к задаче ликвидации феодализма и утверждения капитализма. Народившиеся новые капиталистические отношения не могли стать господствующими, не уничтожив революционным путем мешавший им феодальный строй. Франция задыхалась, опутанная сложной сетью феодальных связей. Жалкое существование влачило сельское хозяйство, основанное на примитивной технике, истощаемое большим количеством налогов и поборов, лежащем на нищем, бесправном крестьянстве. В неблагоприятных условиях находилась промышленность. Старая система цехов препятствовала

развитию крупной индустрии. И промышленность и торговля сильно страдали от узости внутреннего рынка, от низкой покупательной способности большинства населения.

Привилегии меньшинства, произвол и роскошь власти, бесправие большинства — все это копило недовольство, озлобляло широкие слои населения. Революция была в достаточной мере подготовлена, нужен был только толчок, чтобы она началась. Тысяча семьсот восемьдесят девятый год стал переломным в истории Франции. Уже давно ряд признаков предвещал большие события. Толчком явилась надвинувшаяся на страну угроза финансового краха. Тучи начали сгущаться еще с 1788 г., когда лето было неурожайным. С полей нечего было собирать. Затем наступила непривычно суровая зима, реки замерзли, морозы погубили виноградники. Бедствия, голод, нужда обрушились на народные массы. Доведенные до отчаяния, крестьяне уходили бродяжничать, поднимали мятежи. В городах ходили антиправительственные листовки. Несмотря на самое энергичное обложение налогами производящих классов, государственная казна пришла в полное расстройство. Ощущение конца старого мира охватывало привилегированные сословия, и даже окружение короля. В поисках средств королю Людовику XVI пришлось созвать представителей всех трех сословий. Зимой 1788 г. король вынужден был обещать созыв Генеральных штатов, не собиравшихся уже в течение 174 лет. Но король уже не мог управлять страной. Революция была неизбежной, феодально-абсолютистский строй изжил себя, стал преградой экономическому, социальному и политическому развитию страны. В марте и апреле 1789 г. по ряду провинций прокатилась волна крестьянских волнений, рабочие громили дома крупных фабрикантов, сражались против правительственных войск. Открывшиеся 5 мая заседания Генеральных штатов превратились в словесные сражения между депутатами третьего сословия и королевской властью (третье сословие — буржуазия, крестьянство, рабочие, ремесленники; первые два сословия — духовенство и дворянство — привилегированные).

17 июня 1789 после выяснившейся невозможности прийти к соглашению с королевской властью по вопросу о порядке заседаний и голосования, депутаты третьего сословия объявили себя Национальным собранием — представителем всей французской нации, а 9 июля — Учредительным собранием, призванным учредить новый общественный строй и выработать конституцию. Меры, принятые королем к разгрому непокорного собрания, и начавшиеся в Париже продовольственные затруднения, вызвали волнения городской бедноты и мелкой буржуазии. Они были подавлены вооруженной силой. Ответом был штурм и взятие парижанами королевской крепости-тюрьмы Бастилии (14 июля 1789 г.). Революция началась со времени вступления на политическую арену народных масс, именно народное вооруженное восстание 13-14 июля 1789 г. ознаменовало начало революции. Важными центрами политической жизни стали клубы, игравшие роль партий. Крупную роль играло «Общество друзей конституции», более известное под име-

нем Якобинского клуба (так оно называлось по имени библиотеки монахов-якобинцев, где они собирались). Вся страна следила за развитием событий в Версале. Именно в эту пору возникло новое для Франции явление — рождение множества газет, листовок, брошюр. Поток политической литературы затопил страну. Подъем революционного движения породил «великий страх» имущих классов, декреты Учредительного собрания об отмене привилегий дворянства и духовенства, принятие Учредительным собранием Декларации прав человека и гражданина.

В конце 1789 г. Национальное собрание конфискует имущество аббатства Сан Бенуа и распускает его. Фурье не был большим приверженцем религии, но и не участвовал пока в революционном движении. Покинув аббатство, он направился в Париж, чтобы познакомиться с методами решения алгебраических уравнений, которые разработали Лежандр и Монж. В присутствии Лагранжа представляет в академию наук записку о новом методе решения алгебраических уравнений. Это была работа об общем методе решения уравнений 4-й степени (ранее были известны лишь приближенные методы).

В 1790 г. он становится преподавателем математики в колледже (школе) бенедиктинцев, той военной школы в Оксере, где ранее учился сам. До этого времени внутри него постоянно назревал конфликт, связанный с жизненным выбором — религия или математика? Вместе с друзьями он создает литературное и художественное общество, где сначала был президентом. Общество просуществовало всего 2 года. В 1792 г. военная школа в Оксере была закрыта, бенедиктинцы уехали, денег нет, помещения пришли в упадок. Фурье переходит в аббатство Сен Жермен в Оксере, составляет учебные планы новой школы, вводит новые предметы (французский, историю, географию, космологию) за счет сокращения латинского языка. Он сам преподает многие предметы, несмотря на скудное жалование.

В 1792-93 гг. жизнь заставляет его участвовать в революционном движении, политике. В эти годы во Франции происходят бурные события, развитие которых можно понять, лишь возвратившись на 4 года назад. События 1790 – 1795 годов во Франции развивались стремительно – отмена дворянских титулов, закрытие Учредительного собрания, казнь короля Людовика XVI, якобинская диктатура, контрреволюция, образование Директории война с Австрией, Англией, Голландией, Испанией.

Фурье приветствует правительство, свободное от королей и священников, участвует в революционном местном комитете Оксера (из 12 патриотов). Он пишет: *«Естественные идеи развития равенства стали возможными, чтобы дать величайшую из надежд на учреждение свободного правительства, освобожденного от королей и священнослужителей, чтобы освободиться от этого двойного ига, давно узурпировавшего почву Европы. Я влюблен в эту задачу, и, по моему мнению, это величайшая и прекраснейшая задача, которая когда-либо вставала пред любой нацией».*

Фурье отдался революции со всей горячностью своего возраста. Однажды, когда революции потребовался набор армии в 300 тысяч человек,

он так пламенно говорил о необходимости защиты родины и революции, что наплыв добровольцев в Аннеси, где он выступал, сделал ненужной жеребьевку. Однако, ослепленный бурными событиями этих лет, он не замечает вырождения идей революции. Вероятно, Фурье не был сторонником террора, который явился результатом революции, и поэтому попытался уйти из комитета. Это ему не удалось, и он прочно связал себя с революцией, которая была сложным делом многих групп и фракций, открыто влюбленных в нее, но настроенных враждебно по отношению друг к другу. В конце 1793 г. Фурье направляют с военной миссией в Орлеан, где поднялся мятеж санкюлотов против террора якобинцев. Он попытался смягчить репрессии, но его отстранили и вынесли постановление об его аресте за недостаточную жесткость против мятежников. В это время его характеризуют так:

«Гражданин Фурье, весьма смышленый молодой человек, красноречивый и усердный, был послан в Луару. Кажется, что Фурье получил солидную народную поддержку. Он может хорошо говорить и если он войдет в Общество Оксера, то не сделает ничего недостойного».

Это было время, когда ученые, выступившие против революции, всходили на эшафот, многих других охватил порыв, который объял всю Францию, когда над ней в 1793 г. нависла угроза интервенции. Всякая война не является войной только одних армий. В конце XVIII столетия наука во Франции стояла на высоте, недосягаемой для других стран тогдашней Европы. Популярность науки только выросла после того, как она отдала себя служению идеалам демократии. «Усиливайте, совершенствуйте французскую промышленность, и вы сделаете жителей страны самыми сильными, самыми богатыми и благоденствующими в Европе. Страна становится сильной в такой же мере благодаря промышленности и ее гражданам, как и благодаря их мужеству, и степень ее силы измеряется силою ее богатств. Но поскольку промышленное богатство все более и более становится результатом практического приложения научных знаний, в конечном счете, именно наука определяет живую силу нации,» — это был призыв к ученым.

Победа четырнадцати революционных армий, руководимых Лазарем Карно, была в огромной степени обеспечена содействием ученых, прежде всего французских химиков. Для производства пороха нужна была селитра, но ее привозили из Индии, находившейся в руках англичан. Но где же все-таки добыть 17 миллионов фунтов селитры? «Во французской почве, — ответил академик Монж, — в конюшнях, в погребах и на кладбищах. Вы даже не представляете себе, как ее там много. Добудем вдоволь и через три дня зарядим все пушки». Были составлены простые и понятные инструкции, и вскоре неустанно днем и ночью дети и женщины рылись в земле, в хлевах, конюшнях. Селитра стала поступать в огромном количестве. Химики изобрели способы ее быстрой и простой очистки, и скоро все пушки действительно были заряжены. Также было с производством поташа, поскольку Испания, ранее снабжавшая Францию, закрыла свои источники. Специальность Фурье, более далекая от непосредственных практических примене-

ний, не позволила ему успешно помогать обороне, как это посчастливилось сделать химикам, но при желании и он мог бы внести свою лепту в общее дело. Ведь математик Лагранж, еще более далекий от практики, чем Фурье, вычислял методами механики траектории снарядов. К лету 1794 г. угроза интервенции была снята и враги революционной диктатуры якобинцев побеждены. Диктатура спасла Францию от иностранного вторжения и дала пример победы над внутренней контрреволюцией при помощи революционного террора. Она окончательно разделалась с абсолютизмом и феодализмом, но, признавая частную собственность, не принимала никаких мер по защите рабочих, крестьян от эксплуатации их капиталистами и помещиками. Укрепление могущества крупной буржуазии сделало неотвратимым контрреволюционный переворот 9 термидора (27 июля) 1794 г., и явилось началом термидорианской реакции. Еще в апреле-мае 1794 года в Революционном правительстве стала складываться группировка, враждебная Робеспьеру. Хотя на словах она боролась против «тирании Робеспьера», на деле — против революционно-демократической диктатуры. 9-е Термидора был последним днем якобинской диктатуры. Не поддержанная крестьянскими и рабочими массами, ненавидимая буржуазией, остатками дворянства и духовенства, якобинская диктатура была свергнута.

Утром 10-го Робеспьер и его сподвижники — 22 человека — без суда были гильотинированы. На следующий день еще 71 деятель якобинцев последовали на гильотину. Это была буржуазная контрреволюция, которая потом перешла в реакцию Директории, к буржуазной диктатуре консульства и империи, а затем к реставрации Бурбонов. Аресты начались по всей стране; преследования коснулись и генерала Бонапарта, который ранее пользовался поддержкой брата Робеспьера – Огюстена. Конец 1794 и начало 1795 гг. сопровождались многочисленными выступлениями санкюлотов и парижских предместий, требовавших «хлеба и конституции 1793 года». Все они были подавлены армией. Мятежи продолжались, пока не была принята конституция (22 августа 1795 г), но в ней уже не было знаменитой статьи: «Все люди рождаются и остаются свободными и равными в правах». Вычеркнута была статья о том, что «целью общества является общее благосостояние». Конституция 1795 года обеспечила безраздельное господство собственников.

Участие Фурье в якобинской фракции в Орлеане имело серьезные последствия, хотя и не сразу. Когда он вернулся из Орлеана в Оксер, он продолжал работать в революционном комитете, преподавать в колледже, принимал участие в спасении церковных книг, некоторое время работал библиотекарем. Только попав в тюрьму в июле 1794 г. за недостаток революционной решительности в Орлеане по наветам сторонников Сен-Жюста*, испытывает разочарование в идеях якобинцев. Фурье ожидал, что не-

* Сен-Жюст — якобинец, друг и сподвижник Робеспьера, член Комитета Общественного спасения, в 26 лет совместно с Л.Карно руководил организацией обороны республики (1794). Был гильотинирован после переворота в июле 1794 г.

минуемо будет гильотинирован. Жители Оксера требовали его освобождения. Спасло его изменение политической ситуации в стране, произошедшая казнь Робеспьера и его сторонников-якобинцев. Тюрьмы опустошаются, Фурье был освобожден и возвратился в Оксер.

Наступившая внешняя безопасность позволила Директории провести ряд мероприятий в области народного просвещения, которые были намечены еще в эпоху революционного Конвента, но не могли быть осуществлены из-за борьбы с интервентами. Был создан ряд замечательнейших учреждений, порожденных революцией и донесших свою славу до наших дней. Этими учреждениями были Нормальная и Политехническая школы, Национальный институт и учрежденные еще ранее Бюро долгот и Палата мер и весов. Была принята Метрическая система мер, которую позже внедрили почти все страны.

Осенью 1794 г. Конвент решил организовать учебные заведения, которые обеспечивали бы страну преданной и многочисленной интеллигенцией. Но откуда было взять преподавателей для этих училищ, если до революции очаги просвещения находились главным образом в руках духовенства. Для создания новых педагогических кадров и была создана в Париже декретом от 30 октября 1794 г. Нормальная школа (Эколь Нормаль), в которую для повышения квалификации преподавателей главные города округов выделили полторы тысячи учащихся. В их числе был и Фурье, которого в его родном округе не пожелали послать в Нормальную школу как законченного якобинца; Фурье был послан другим округом. Эта школа служила моделью для других учительских школ и вузов Франции. Преподавателями Нормальной школы были приглашены крупнейшие ученые Франции: Лагранж, Лаплас, Монж, Бертолле и другие. Чтобы понять подлинную революцию в методах воспитания кадров с учреждением Нормальной школы, надо представить, как велось преподавание во Франции и почти во всей Европе до конца XVIII столетия.

Раньше крупные ученые, двигавшие науку вперед, были совершенно оторваны от преподавания. Элементарные курсы математики и механики в тесных рамках программ военно-учебных заведений, читавшиеся иногда молодыми учеными, в счет не идут. Профессорами во многих случаях были либо представители духовенства, либо лица низкой научной квалификации. Пригласив к преподаванию в Нормальной школе выдающихся ученых с мировым именем, Конвент сделал звание профессора необычайно почетным в глазах широкой публики. Это также приблизило подлинную науку к широким кругам молодежи. Преподавание математики Лаплас и Лагранж преобразовали в корне, излагая новые доказательства, знакомя с теориями и методами. Ранее преподаватели отгораживались от слушателей пожелтевшими тетрадями, где были много лет тому назад записанные лекции. Лаплас читал свои лекции импровизируя, следя за восприятием слушателей, тоном и жестами подчеркивая важные места, возвращаясь назад, увлекая аудиторию. Лекции Лапласа подробно записывались, издавались и служили незаме-

нимым пособием для учащихся. Так же читали свои лекции и другие новые профессора.

Последствия нового метода преподавания быстро дали себя знать. Огонь любви к науке в живом слове разбудил не один талант, и из Нормальной школы, а затем и из Политехнической, десятками выходили талантливые ученые, получившие мировую известность. Фурье, Араго, Коши, Гей-Люссак, Пуассон и другие.

С января 1795 г. Фурье начинает преподавать математику в Эколь Нормаль. 27-летнего преподавателя замечают три знаменитых ученых. Во-первых, Лагранж, которого Фурье считал «*первым среди европейских людей науки*». Второй — Лаплас, которого Фурье уважал, но ставил менее высоко. Третий — Монж, которого Фурье характеризовал как «*громогласного, активного, изобретательного, остроумного и очень ученого*».

Фурье начал преподавать также и в Колледж де Франс. Параллельно с преподаванием он ведет математические исследования. У него прекрасные отношения с Лагранжем, Лапласом и Монжем. Он приглашен в Эколь Централь — Центральную школу общественных работ, где директорами были Лазарь Карно и Гаспар Монж. Позже она была переименована в Политехническую школу.

При наступившей Реставрации Фурье вспомнили его пребывание в Орлеане. Если ранее его упрекали за недостаток революционной решительности, то теперь — за участие в репрессиях. Он снова был отправлен в тюрьму. Его освобождению помогла целая серия неясных причин: то ли желание народа, то ли требования ученых — Лагранжа, Лапласа, Монжа, или изменение политического климата, а возможно все эти факторы вместе.

В столице усилилась деятельность монархических элементов, 5 октября 1795 г. вспыхнул мятеж монархистов. Правительству пришлось поставить во главе вооруженных сил генералов-республиканцев, в том числе и Бонапарта, который до того был отстранен от военной деятельности и работал в картографическом бюро генштаба. 26 октября 1795 г. термидорианский Конвент закончил существование, и была провозглашена амнистия по всем делам, «связанным с революцией». Десятки тысяч «террористов» были освобождены. Наступила власть Директории.

1 сентября 1795 г. 27-летний Фурье вернулся к преподаванию в Политехнической школе. Через два года по предложению Лагранжа он получает кафедру анализа и механики, преподает алгебраический анализ, дифференциальное и интегральное исчисление, позже механику. Его курсы считаются превосходными, лекции отличаются отточенностью и изяществом стиля. «*Они не были собраны*, — с сожалением отмечает Франсуа Араго. — *Тайна его преподавания состояла в искусном сочетании отвлеченных истин с любопытными приложениями, малоизвестными историческими подробностями из оригинальных источников*».

Период 1796-98 гг. во Франции характеризуется постепенным креном Директории вправо. Экономическая и социальная политика правительства

определялась целиком интересами новой буржуазии – финансистов, банкиров, приобретателей национального имущества, спекулянтов. Усиленная инфляция, выгодная буржуазии, проводилась чрезвычайно последовательно. Это вызывало страшную дороговизну и обостряло нужду масс, особенно в столице. Директория вынуждена была сохранить выдачу хлеба по пониженным ценам, но крестьяне отказывались продавать зерно за постоянно обесценивающиеся бумажные деньги. «*Царит ужасающий голод, трудящийся, рабочий народ разорен спекулянтами и плутами,*» – писал Бабёф. Была создана новая система бумажных денег — «территориальные мандаты», типа «ваучеров», и установлен чрезвычайно выгодный обменный курс для спекулянтов. Эта операция оказалась источником огромного обогащения для буржуазии. Инфляция, бешеная дороговизна захватывали все большие слои населения, армию, даже ее офицерский состав. Назревал «Заговор во имя равенства», руководимый Бабёфом. Но большинство Директории, руководимое Карно, держалось твердой позиции. Был принят закон, угрожавший смертной казнью за призывы к восстановлению монархии или конституции 1793 г., к грабежу или «разделу собственности под именем аграрного закона». Бабёф и его сподвижники были арестованы, он был казнен, многие расстреляны, сосланы на каторгу.

После заключения мира с Пруссией и Испанией в составе антифранцузской коалиции остались только две державы — Англия и Австрия. Нанести удар Англии республика была не в состоянии; чтобы добиться мира, надо было сокрушить Австрию. Начались действия французской армии в Италии под руководством Бонапарта. В эпоху Директории войны начали менять свой характер. Они были прогрессивными, поскольку содействовали ломке феодальных отношений в захваченных странах, но они облагали населения этих стран непомерными контрибуциями и реквизициями, в которых остро нуждалась Директория. Итальянский поход принес Наполеону огромную популярность, Директории — большие средства. Армия начала играть в республике новую роль. Во главе армии стали новые генералы, выходцы из демократических слоев населения, связавшие свою жизнь с делом революции. Директория все более начала попадать в зависимость от них и попыталась снизить их роль посылкой в полки комиссаров, которые чаще оказывались бессильными. Директория, испытывавшая острую финансовую нужду, вынуждена была прибегать к услугам банкиров для получения займов на неотложные нужды. Но взамен она должна была идти на все большие уступки. Началась передача кредиторам права рубки в государственных лесах, распродажа им конфискованных материалов, льготное для них налогообложение. В этой обстановке сделок, взаимных услуг, спекуляции подавляющее большинство деятелей оказались охваченными страстью обогащения. Недаром Талейран при своем назначении министром воскликнул: «Нужно составить состояние, огромное состояние!»

Бонапарт вернулся из Италии в декабре 1797 г. На приеме, устроенном ему Директорией, держал себя сухо и надменно, сказав загадочную фразу:

«Когда благосостояние французского народа будет утверждено на основе наилучших законов, вся Европа будет свободной». Директория, встревоженная поведением Бонапарта, поддержала план египетского похода, не без задней мысли отделаться от слишком популярного и честолюбивого генерала.

Решение об экспедиции было принято в середине марта 1798 г., и преподаватели Политехнического института получают приглашение на поездку в Египет. Вербовкой ученых занимался Бертолле: «Мы не знаем, куда отправится армия, но знаем, что ею будет командовать Бонапарт, а мы будем заниматься исследованием стран, по мере покорения их нашими легионами». Кроме крупных ученых в экспедицию, несмотря на неопределенность целей, напросилось сорок шесть человек молодежи из Политехнической школы. Фурье едет в Лион, запасается книгами, спускается по Роне к Тулону, где начинает собираться флот под командованием Бонапарта. Вся Европа знала, что готовится какая-то морская экспедиция. Бонапарт искусно распространил слух, что намерен пройти через Гибралтар и сделать высадку в Ирландии.

Во всех южно-французских портах шла кипучая работа. Около 350 больших и малых судов и барок, на которых разместилась армия в 35 тысяч человек с артиллерией, должны были пройти почти все Средиземное море и избежать встречи с английской эскадрой адмирала Нельсона. На корабле «Франклин» вместе с генералом Клебером Фурье 19 мая 1798 г. отправляется к Мальте, где собирается весь флот. Мальта была оккупирована 10 июня, а 19-го флот уже продолжал путь. Этой эскадре удается ускользнуть от английского флота под командованием адмирала Нельсона. 30 июня 1798 г. Наполеон со своей армией причалил к берегу Египта и немедленно начал высадку. Положение было опасное: он узнал, что ровно за 48 часов до его появления к Александрии подходила английская эскадра и спрашивала о Бонапарте (о котором, конечно, там не имели ни малейшего представления). Оказалось, что Нельсон, прослышав о взятии Мальты французами и убедившись, что Бонапарт его обманул, помчался на всех парусах в Египет, чтобы не допустить высадки и потопить французов еще в море. Но ему повредила его излишняя поспешность и большая быстроходность британского флота. Правильно сообразив, что Бонапарт пошел от Мальты к Египту, он снова сбился с толку, когда ему сказали, что о Бонапарте там не слышали, и тогда Нельсон помчался в Константинополь, решив, что французам плыть больше некуда. Эта цепь ошибок и случайностей спасла французскую экспедицию.

Фурье в качестве научного советника вместе со 167 учеными (Монжем, Малусом и другими)*, пока не подозревает об истинных целях «великого

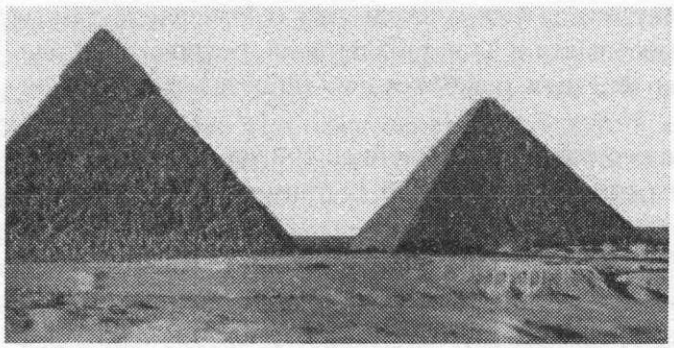
* Интересен состав 167 ученых, принявших участие в египетском походе. Среди них было 15 географов, 21 механик, 18 инженеров по мостам, 5 судостроителей, 8 инженеров других специальностей, 15 геометров, 4 астронома, 4 архитектора, 5 ботаников, 8 физиков и химиков, 5 зоологов, 9 художников, 15 литераторов, 12 врачей, 3 фармацевта. 32 человека не вернулись во Францию — скончались во время похода.

похода». Их миссия, как зафиксировано в поручении Директории, состоит в том, чтобы собрать как можно больше информации о прошлом, настоящем Египта, завоевать и модернизировать («колонизировать») страну. Сначала эта экспедиция развивалась успешно: Александрия сдалась, также как и вся дельта Нила. Прибытие ученых в Александрию началось с потери: на корабле «Патриот», который не нашел вход в порт и затонул, пропали точные инструменты и многие необходимые материалы.

Прибывшие в Египет французы пережили потрясение. Ученые и солдаты были ошеломлены увиденным. Они ожидали попасть в богатую страну. Долина Нила всегда славилась плодородием. Но население, особенно в деревнях, бедствовало. Людей, воспитанных в духе идей Просвещения, любознательных, амбициозных и предприимчивых, египтяне поражали пассивностью и апатией. «У этого народа нет ни любопытства, ни духа соперничества. Самое удивительное в образе жизни египтянина — это полная индифферентность ко всему, что не относится к его общественному положению, его профессии, привычкам. Ничто их не удивляет, так как они не обращают внимания на то, чего они не знают». Французы старались быть терпимыми. Таково было предписание главнокомандующего: «С самого начала не должно быть никаких конфликтов на религиозной почве или в связи с местными обычаями». Бонапарт публиковал воззвания на арабском, некоторые ученые изучали этот язык до экспедиции, другие пытались освоить диалекты. Все же контакты с местным населением налаживались не без трудностей. Ведь все было разное: религия, менталитет, традиции.

Египет считался владением турецкого султана, но фактически им владели беи-мамелюки — верхушка феодальной конницы. 29 июля 1798 г. ввиду пирамид Бонапарт встретился с главными силами мамелюков. «Солдаты! Сорок веков смотрят на вас сегодня с высоты этих пирамид!» — сказал Наполеон, обращаясь к армии перед началом сражения.

Мамелюки потерпели полное поражение и бежали на юг. После этой победы Бонапарт направился в Каир. Напуганное население молча встретило завоевателя, оно ничего не слышало о Бонапарте. Непонятно было, кто он такой, зачем явился и с кем воюет. Устроившись в Каире, он приступил к организации управления Египтом.



Пирамиды и сфинкс в Египте

Бонапарт великолепно сознавал, какую огромную пользу может принести ученый, если его направить на выполнение конкретных задач. Он с большим сочувствием и вниманием относился к своим ученым, которых взял в эту экспедицию. Даже его знаменитая команда перед началом одного из сражений с мамелюками: «Ослов и ученых на середину!» — означала именно желание обезопасить, прежде всего, наряду с драгоценнейшими в походе вьючными животными, также и представителей науки. Неожиданное, несколько комедийное сочетание слов получилось вследствие обычного военного лаконизма и краткости командной фразы. В истории египтологии поход Бонапарта сыграл колоссальную роль. С ним приехали ученые, которые впервые, можно сказать, открыли для науки эту древнейшую страну человеческой цивилизации. Лишь через много лет египтяне восприняли и оценили все, что принесли в Египет ученые, сопровождавшие Бонапарта.

1 августа 1798 французский флот был полностью разбит Нельсоном в битве у Абукира, так что Наполеон и его армия оказались пленниками в стране, которую оккупировали. В битве при Абукире погибла и большая часть научного оборудования, взятого для исследований.

Фурье действует как администратор политических институтов Франции, он исполняет дипломатические поручения, ведет военные переговоры, налаживает в Египте образование и археологические изыскания. Отношение египтян к ученым сначала было настороженным, иногда враждебным или безразличным, но постепенно менялось. Большинство арабов – современников экспедиции – готовы были поверить, что ученые занимаются поисками и изготовлением золота. После прибытия в Каир ученые рассеялись по египетской территории. Дипломатический дар Фурье и умение ладить с местным населением помогли в ряде случаев избежать кровопролития.

Продолжалась интеллектуальная деятельность. Ему поручено организовать выпуск газеты «Курьер Египта», где должны были сообщаться военные и научные факты (всего было выпущено 116 номеров).

Для учеников Политехнического института организовали чтение курсов. Фурье преподавал и играл роль инспектора. Человеческие отношения среди членов экспедиции складывались не бесконфликтно. Были разногласия между знаменитыми учеными, которым покровительствовали высшие военные чины, и молодыми энтузиастами, которым приходилось самостоятельно заботиться о крове и пропитании. Военные пренебрежительно относились к «нестроевым», воспринимая их как лишнюю обузу.

20 августа 1798 г. в Каире Наполеон подписал распоряжение о создании Египетского института по образцу Национального института в Париже для изучения истории Египта, природных запасов, экономики, развития образования, литературы, искусства. Устав института был написан Гаспаром Монжем, который стал его президентом, но за все управление отвечает 30-летний Фурье, являющийся постоянным секретарем. Членов Института всего 36, и среди них очень мало военных. Они собираются регулярно 2 раза в месяц. Цель — изучение Египта и распространение европейской

цивилизации. Заседания открытые. Фурье становится одним из 12 членов математического отделения, среди которых были Монж (председатель) и друзья Лапласа — Фурье (секретарь) и Бертолле. Себя Бонапарт тоже не забыл и назначил товарищем председателя отделения математики. От президентства он отказался, якобы говоря: «Главою института надо сделать не меня, а Монжа; это сообразнее со здравым смыслом». Уважение Наполеона к Институту было так велико, что, как говорит историк: «Уже в Египте победитель ставил в заголовке своих прокламаций «Бонапарт, главнокомандующий, член Института», будучи уверен, что это будет понятно последнему барабанщику». Институт создал ряд комиссий и определил каждой свою задачу. Были выполнены топографические съемки Суэцкого перешейка, чтобы оценить разницу в уровнях воды между Красным и Средиземным морями. Храмы были освобождены от песков, восстановлен акведук в Каире, расчищены каналы, приведены в порядок резервуары воды.

Комиссия по изучению современного состояния Египта была разделена на ряд подкомиссий. Вооружившись вопросниками и таблицами, они объезжали провинции, где систематически фиксировали сведения, касающиеся топонимики, демографии, культуры, коммерции, промышленности, зоологии, изучали состояние путей сообщения, качество воды, воздуха и т.д. Подробное изучение собранных образцов и работа по их классификации привели к удивительным результатам. В Египте были сделаны многие важные открытия, сформулированы интересные гипотезы. Монж дал объяснение эффекту миражей, установил, что древние египтяне использовали для мумификации каустическую соду. Савиньи обосновал новый вариант систематического описания насекомых. Загадка иероглифов оставалась тайной. Большая часть иероглифических записей была скопирована учеными от руки и впоследствии распространена по Европе. Работа проходила в нелегких условиях. Как научный секретарь Египетского института, Фурье ведет регистрацию научных и литературных открытий, сделанных во время пребывания в Египте. На заседаниях членов института присутствовали и египтяне. Они вели себя сначала подозрительно из-за религиозных проблем. Однако вскоре ученые завоевали расположение образованной части населения. С 23 августа 1798 г. по 21 мая 1801 г. было проведено 62 заседания института.

Фурье выступал на заседаниях с докладами по самым разным темам, начиная с решения алгебраических уравнений, кончая практическими задачами (восстановление акведука крепости Каира, создание ветряного колеса и т. д.). Его считали за «человека, который за все берется». Когда генерал Мену захотел восстановить замечательную библиотеку Александрии, именно Фурье стал отвечать за организацию работ.

Политическая деятельность Фурье в Египте

Турецкое правительство решило не поддерживать вымысел Бонапарта, будто он вовсе не воюет с Оттоманской Портой, а только наказывает мамелюков за обиды, чинимые французским купцам, и за угнетение арабов. В Сирию была послана турецкая армия.

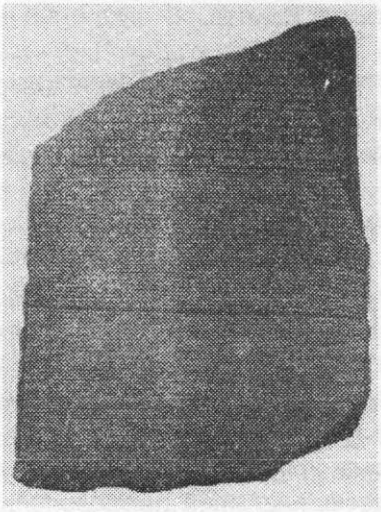
Бонапарт двинулся навстречу туркам и хотел продолжить преследование мамелюков до Сирии и Палестины, но операция развивалась не очень успешно. Осада крепости Акра длилась два месяца и окончилась неудачей, армия потеряла 3000 человек, началась чума. В это время из-за несогласия с французскими реформами о земельной собственности и распределением налогов члены богатых классов в конце октября 1798 г. подняли восстание в Каире. Несколько человек из оккупационной армии было убито. Усмирение было беспощадное. Кроме массы перебитых арабов и феллахов при подавлении восстания, уже после усмирения несколько дней происходили казни; казнили по 12 - 20 человек в день.

В отсутствие Бонапарта Фурье отвечал за отношения с Диваном (Высшим Советом улемов) и за связи с почетными гражданами. Это были фактически функции префекта или губернатора Египта. Так как он стал неоспоримым руководителем всех специалистов, он координировал практически всю политическую, юридическую и интеллектуальную деятельность, за исключением военной. Он умело вел переговоры, успокаивал враждующих, старался уважать местную религию, как и предписал Бонапарт. Когда возвратился Бонапарт и спросил, что он делал, Фурье ответил: «Я собирал колосья здравого смысла!».

Многие его друзья хотели бы привнести в египетское общество все завоевания европейской цивилизации и методы борьбы против мракобесия. Но он понимает, что на Востоке почти нет грани между политикой и религией, и успокаивает и своих друзей и египетских уважаемых лиц, обещая, что французы не навяжут правила светского общества Египту.

14 июня 1799 г. армия Бонапарта вернулась в Каир после тяжкого обратного пути из Сирии. Чума наседала все более и более, жара усиливалась до невыносимой степени. Пришла весть, что при Абукире высадилась турецкая армия. Наполеон 25 июля напал на турецкую армию и разгромил ее, он приказал в плен не брать, а истребить всех. Почти все 15 тысяч турок были перебиты на месте, ничтожная часть спаслась на английских судах. Французское завоевание этим казалось вполне упроченным на ближайшие годы. Хотя море было по-прежнему в руках англичан, но Египет прочнее, чем когда-либо, был в руках Бонапарта.

Фурье принимал участие в различных научных исследованиях: в раскопках могил, в измерениях пирамид. Он пытался понять роль проходов и шахт внутри пирамид. В течение двух месяцев в конце 1799 он руководил экспедицией в Верхний Египет, где обнаружил древние произведения искусства, интересовался иероглифами. По его указанию в Каирский инсти-



Розетский камень — плита из черного гранита 1,2×0,9 м и 0,3 м толщиной. Был отрыт при постройке форта в 1799 г. и обнаружен лейтенантом Бушаром. Черная базальтовая плита содержала три надписи на различных языках – древнеегипетские иероглифы, египетское скорописное письмо, греческий. Предположение, что три надписи несут одинаковое содержание, составилось сразу, и ученые-языковеды углубились в изучение. Одним из них был солдат Франсуа Шампольон, который и раскрыл позже (через 25 лет) секрет египетских иероглифов. Кстати, Фурье каким-то чутьем в 20-летнем солдате почувствовал будущую знаменитость и, обратившись к военному министру, описывает достоинства Шампольона и добивается его освобождения от солдатской службы.

тут 19 августа 1799 г. поступает Розетский камень. Он отлично сознавал его значимость для будущего.

Долгое время отрезанный от всякого сообщения с Европой, Бонапарт случайно из газеты узнает, что пока он завоевывал Египет, Австрия, Англия, Россия возобновили войну с Францией. Суворов появился в Италии, разбил французов, движется к Альпам, угрожает вторжением во Францию. В самой Франции — разбои, смуты, полное расстройство,

Директория слаба и растерянна. «Негодяи! Все плоды моих побед потеряны! Мне нужно ехать!» — решил Наполеон, как только прочел газету.

Египетский поход закончился неудачей. После заседания Египетского института 23 августа 1799 г. Бонапарт покидает армию в Египте, оставив своим преемником генерала Клебера. В приказе, назначающим Клебера главнокомандующим, Наполеон написал: «Правительство вызвало меня в свое распоряжение». Это была заведомая неправда. В строжайшей тайне были снаряжены четыре судна с 500 отобранными им людьми, и он 47 суток плыл ночами по Средиземному морю, опасаясь кораблей Нельсона. Только 9 октября корабли достигли Франции. Через неделю Наполеон возвратился в Париж под страхом, что его арестуют за то, что покинул армию без приказа. Но был с рукоплесканиями встречен в Париже и через три недели законным, почти конституционным, путем получает командование над всеми вооруженными силами Парижа. Был общий восторг и надежда, что Бонапарт установит в стране «прочный порядок» и создаст «твердую власть». Именно поэтому он затем становится первым консулом — практически единоличным властителем Франции.

Лично и хорошо знакомый с будущим диктатором, Лаплас более других радовался возвращению Бонапарта во Францию. Они были чуть ли не друзьями. Замкнутый когда-то юноша, в котором никто еще не мог заподозрить будущего беспощадного диктатора, в 1784 г. поступил в Парижскую

военную школу. Избрав своей специальностью артиллерию, Бонапарт слушал лекции Лапласа и Монжа. Лапласу он сдавал выпускные экзамены по математике как экзаменатору королевского корпуса артиллеристов. Лапласу запомнился начитанный и талантливый юноша, в котором были скрыты присущие им обоим честолюбие и настойчивость.

После стремительного возвращения во Францию Наполеон сразу же обратился к членам Национального института. Он заранее хотел заручиться поддержкой при предстоящем перевороте. Закрепить за собой симпатии членов Института, являвшихся представителями и вождями интеллигенции, Наполеон старался лестью и обещаниями. За семнадцать дней до переворота 1 брюмера (23 октября) 1799 г. Бонапарт отправился в Институт на обычное заседание. Он вошел в зал, на правах рядового члена занял свое место и внимательно слушал доклады. На следующем заседании, через четыре дня, ему по его просьбе предоставили слово для доклада. Бонапарт подробно рассказал о Египте и его памятниках древности. Он утверждал, что канал, соединявший Средиземное море с Красным, действительно существовал и что по сохранившимся останкам его можно восстановить.

Оставшийся в Египте Фурье помогает Клеберу в контактах с вражеской армией. Положение армии и специалистов с каждым месяцем становится хуже. Даже в этих условиях научная работа продолжается, готовится обширный отчет об исследованиях Египта. Фурье избран главным координатором и редактором предисловия. Специалисты собираются покинуть Александрию на корабле «Птица» 24 января 1800 г., но англичане блокируют порт. Клебер выигрывает сражение при Гелиополе и вновь захватывает Каир. Ему предлагают оставить Египет, Фурье ведет переговоры с беями. Но Клебера убивают, и именно Фурье произносит надгробное слово, отмечая все достоинства этого незаурядного человека, делая это весьма эмоционально. Клебера сменяет воинственный генерал Мену.

В начале 1801 г. англичане переходят в наступление и высаживаются в Абукире. После сражения в Канопе 22 марта 1801 положение французов становится критическим. На следующий день происходит последнее заседание Египетского института. Половина математиков отсутствует на перекличке: они уже умерли или покинули Египет. Чума подтачивает Каир. Фурье убежден, что надо уезжать, он ведет переговоры с Мену и англичанами о репатриации специалистов, которые находятся на «Птице» в Александрии. Переговоры оказываются трудными, потому что Мену не хочет позволить специалистам увозить что бы то ни было, справедливо полагая, что англичане могут захватить эти вещи в качестве трофеев. В конечном счете, Мену все-таки принял все условия англичан (передача всех собранных материалов, в том числе Розетского камня). «Птица» снялась с якоря 11 июля 1801 г. незадолго до военной капитуляции. Французские ученые с остатками экспедиционного корпуса отправились морем во Францию и были захвачены, несмотря на предварительные соглашения, со всеми их документами Сидневем Смитом, капитаном британского флота. Однако «в соответствии с

джентльменским духом тех дней» (как пишут английские источники), Смит высадил людей на берег, задержав документы и коллекции, якобы для безопасности, но потом все отправил в Париж, за исключением Розетского камня. С тех пор камень находится в Британском музее «как память о начале Египтологии, стимулированной Наполеоном, и о его военном поражении». Шампольон-Фижак* напишет по поводу этого невиданного доселе факта: «Англичане захватили груз ученых!».

Фурье задерживался в качестве заложника. Экспедиционный корпус или то, что от него осталось (40%), выгружается в Тулоне 19 ноября 1801 года. Из 167 ученых 32 не вернулись во Францию.

Занятие Египта Францией длилось немного более 3-х лет. Египет не стал французской колонией, английское влияние там даже усилилось. Но результаты научных исследований получили значительный резонанс. Европа смогла познакомиться с произведениями древнего искусства египетской цивилизации.

Пребывание в Египте оказало влияние на всю последующую жизнь Фурье. Там он подхватил хроническую болезнь, которой страдал до конца жизни.

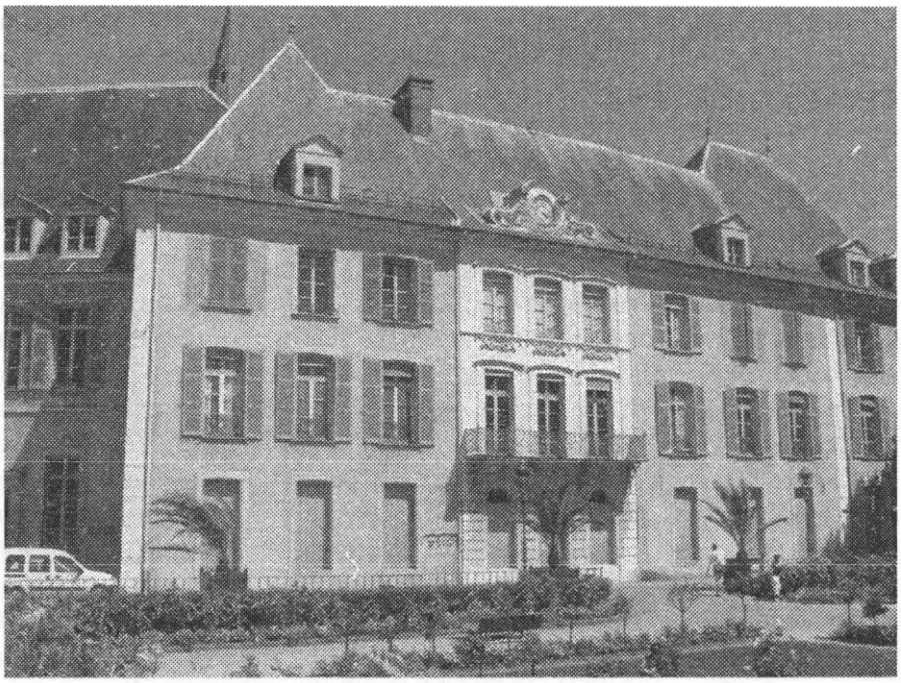
Жозеф Фурье — префект

После возвращения во Францию Фурье хотел остаться профессором в Политехнической школе. В начале 1802 г. он возобновляет чтение своего курса. Гражданин Фурье, иногда называемый «Директором Египта», теперь полный профессор. Однако Наполеон, который в конце 1799 г. стал первым консулом Франции, имел другие намерения по поводу его использования и направил ему вежливое письмо:

«Префект департамента Изер недавно скончался, я хотел бы выразить свою признательность гражданину Фурье, если он займет это место».

Бонапарт стремился привлечь к государственному управлению ученых. Он всегда питал к науке и людям науки глубокое уважение. Он его сохранил на всю жизнь. В отношении его к таким людям, как Карно, Монж, Лаплас, Фурье, Шапталь проступало не только его уважение к науке, но большее — уважение к талантам, умение ценить талантливых людей. При огромной личной одаренности, энергии, потрясающей работоспособности Бонапарт не боялся соперников и окружал себя талантливыми людьми, проявлял своего рода жадность к талантам, он их разыскивал, у него был зоркий глаз. Он

* Жак Жозеф Шампольон (позже назвался Шампольон Фижак, чтобы его отличали от брата) – старший брат Жана Франсуа Шампольона, открывшего тайну иероглифов. Братья родились в семье, в которой было семь детей, из них пять выжили. Жак Жозеф был четвертым. Он приобрел репутацию библиофила, гуманиста, либерала и вольнодумца, стал другом гренобльских эрудитов. Был главным редактором официальной газеты «Летописи отдела Изер», хранителем библиотеки Гренобля, профессором греческой литературы.



Дом префекта в Гренобле

хотел, чтобы весь правительственный аппарат состоял из высокоодаренных людей. Неосведомленность, некомпетентность в научных вопросах, тем более невежество были в его глазах непростительным пороком.

Однажды прославленный писатель того времени, автор «Поля и Вирджинии» Бернарден де Сен-Пьер, чей талант Наполеон высоко ценил, пожаловался Бонапарту на то, что в Институте, членами которого они оба состояли, к нему относятся без должного уважения. Наполеон на минуту задумался. «Скажите, — спросил он после недолгой паузы, — вы знакомы с дифференциальным исчислением?» «Нет!» — чистосердечно признался писатель. «Так что же вы жалуетесь!» Член Института, не знающий дифференциального исчисления, по его мнению, действительно не заслуживал уважения.

Конечно, Фурье не хотел покидать академический мир и Париж, но не смог отказать Наполеону, хотя это явно противоречило его стремлению к занятиям только научной работой. Для окончания и оформления исследований по Египту ему необходимо было часто бывать в Париже, но он повинуется Бонапарту. В феврале 1802 г. Бонапарт назначает его префектом департамента Изер (столица департамента Гренобль). Фурье прибывает в Гренобль в апреле; для него это ссылка. Он считает такое назначение немилостью и не понимает оснований. Возможно, это результат или отголосок его дружбы с Клебером (после бегства Наполеона из Египта) или та хвалебная надгробная речь, которую он произнес на его похоронах.

Префект имеет большую власть. Он назначает мэров городов и районов, которые проводят в жизнь правительственные декреты. Гренобль тог-

да был средний город с 20 тыс. жителей, присоединенный к Франции в 1349 году. В городе было в 13 раз больше адвокатов, чем врачей. Город пограничный, требует сильного военного гарнизона. Промышленность слабая — кожевенный завод, перчаточная фабрика. Фурье всерьез принимается за дело. Он организует большие работы по улучшению благосостояния, безопасности и здоровья жителей. Ему приходится заниматься массой административных дел (надзор за строительством дороги Гренобль — Турин, надзор за осушением малярийных болот, площадь которых насчитывала 80000 км^2, помощь монастырям и проч.). Он регламентирует рабочее время кабачков, размеры лодки, плавающей по р. Изер, предписывает посадки деревьев, организует облавы на волков, лис, устанавливает освещение улиц вечером, рекомендует замену соломенных крыш черепицей или шифером, внедряет метрическую систему мер. Он посещает школы, заводы, мастерские, больницы, тюрьмы и шахты, следит за гигиеной и безопасностью работ. В 1804 за заслуги Наполеон награждает его только что учрежденным орденом Почетного легиона, а в 1809 г. присваивает титул «Барона Империи» с окладом 4000 франков. Фурье жил скромной жизнью, в его характере не было ничего княжеского, и он не накопил богатства. В 1814 г. его капитал оценивался не более 20 тыс. франков.

Занимаясь промышленностью и бытом людей, Фурье интересовался методами стирки белья, которая выполнялась по-старому, требовала много дров, которых не было, рабочей силы, времени. Он стремился внедрить отопление углем, стирку в жавели с использованием соды, что уже было обнаружено и опробовано Бертолле. Другой пример его деятельности — совершенствование ткацкого производства, приглашение квалифицированных рабочих из других областей Франции. В шахтах он интересуется не только условиями работы и безопасности, качеством оборудования, но и ростом температуры с глубиной, проводит необходимые измерения.

Наиболее близкая для него область деятельности — образование. В ноябре 1804 в Гренобле открывается лицей. Там начинает преподавать знаменитый ботаник Доменик Виллар, который позже становится деканом факультета в Страсбурге. Префект сам устраивает экзамены в лицее, где обучение бесплатное, дисциплина почти военная. Он умеет обнаружить среди учеников талантливых (Жан Франсуа Шампольон, Луи Вика и др.) и помогает им. В 1808-10 гг. Фурье открывает в Гренобле университет, сам исполняет роль ректора, заботится о приобретениях библиотеки, чтобы она располагала последними изданиями книг. Кафедру греческой литературы возглавляет Шампольон–Фижак. Фурье, человек большой культуры, заботится об исторических свидетельствах, старается сохранить материалы и недвижимость Большого картезианского монастыря после ухода монахов.

В августе 1803 г. в Гренобле проходила церемония присяги духовных лиц префекту. Фурье произнес речь, в которой говорил о справедливости, умеренности... Эта речь впоследствии обошлась ему дорого. Он два раза должен был встречать папу Пия VII: первый раз в Гренобле, но он уклонил-

Фурье в мундире префекта

ся, и папа вынужден был проехать в Шамбери; второй — при проезде ссыльного папы в Париж (папа жил в префектуре в течение двух недель, пока Наполеон не заставил его отправиться в Савону).

Другое более трудное мероприятие — это организация призыва на военную службу. До 1807 это было не очень трудно, область Изер поставляла в два раза больше, чем требовалось, но с 1813 г. большинство молодых людей стали уклоняться от призыва, объявляя себя неспособными, и их следовало наказывать, что он, по-видимому, не делал. Народное ополчение 1813-14 гг. было особенно непопулярно. Именно из-за этого отношения Фурье с Бонапартом охладели.

Два больших дела Бонапарт поручил Фурье: постройку дороги в Италию и осушение Бургонских болот. Ранее дорога из Гренобля в Италию была только пешеходной или для мулов. Бонапарту нужна была военная дорога для переброски армии и артиллерии. Три разных проекта были изучены Фурье с выездом на места. Строительство было трудным, дорога врезалась в скалы, приходилось делать многочисленные туннели и открытые галереи. Работали на стройке более 400 рабочих. Фурье внимательно следил за всеми работами. Вторая работа — осушение Бургонских болот.

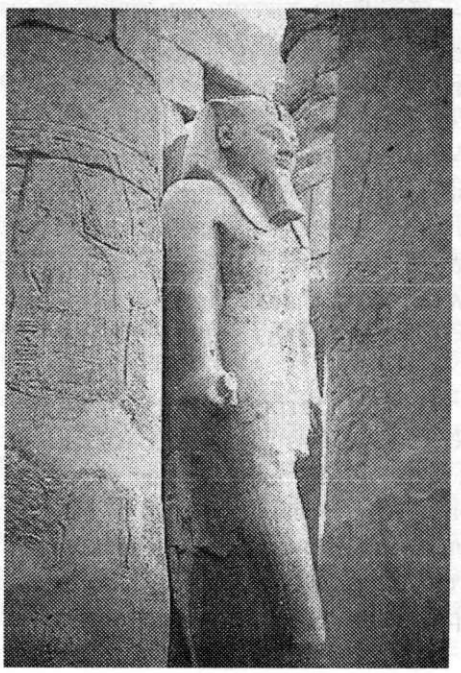
Жители враждебно отнеслись к этому, несмотря на то, что болота создавали нездоровые условия жизни. Многочисленные попытки осушения болот ранее всегда проваливались. Эта стройка на 1500 гектарах потребовала 11 лет и постоянно занимала 600 рабочих. Осушение было закончено лишь к 1812 году, и вместо болот появились богатые пахотные земли. Попутно археологи нашли несколько галло-римских поселений, которые были детально исследованы.

Отчет по Египту

Будучи префектом, он много времени проводит и за работой «Описание Египта», которая была закончена до 1810 г.

Фурье прочитал все, что можно было найти о Египте на греческом и латинском языках, а также в 35 томах Энциклопедии. Его особенно интересовали вопросы хронологии и знания египтян об астрономии. С большой ответственностью он составляет предисловие к отчету по Египту, начиная с его древнейшей истории. Он цитирует большинство путешественников, которые посещали Египет, и подчеркивает значение древнеегипетской цивилизации, избегая датирования памятников. Он расхваливает «просвещенный колониализм» в угоду Бонапарту, льстя, таким образом, последнему.

В 1809 г. он представил свою работу на 42 страницах Наполеону. Последний внес некоторые изменения: сократил хвалебные мысли в отношении Клебера и католической церкви. Когда положение Наполеона изменилось, перед публикацией пришлось переписывать отдельные места. В появившемся втором издании все ссылки на Наполеона были удалены. Фурье отвечал за координацию и редакцию научного отчета по результатам исследования Египта французской экспедицией. Должность префекта Изер и пребывание в Гренобле, вдалеке от основных исполнителей, которые были в Париже, создавали для него определенные трудности. В Гренобле жили лишь немногие участники египетской экспедиции, которые создали местное научное общество. Один из участников экспедиции уже в 1802 г. опубликовал «Отчет о поездке в Египет», который сразу же стал бестселлером и выдержал 40 изданий. Проф. Мананкурт, побывавший в Египте в 1777 году, опубликовал книгу «Путешествие в Верхний и Нижний Египет». Он стал полезным собеседником для Фурье. Другой преподаватель — аббат



Гатэль, возвратившись из Египта, преподавал в Париже арабский язык в школе восточных языков. Фурье встречал этих специалистов на культурных вечерах, которые он организовывал в префектуре для обсуждения литературных произведений и научных достижений. Двумя главными собеседниками у Фурье были братья Шампольоны: старший Жак Жозеф (Фижак) и младший Жан Франсуа*. Фурье часто в конце недели уходил пешком в замок Борегар, где отдыхал и работал над отчетом о Египте и теорией распространения тепла. Туда приглашались только несколько его друзей, среди которых наиболее часто бывал старший Шампольон.

«Египтяне», как называли участников научной экспедиции по возвращении во Францию, сохраняли свое содружество и проводили ежегодные встречи. Их работа продолжалась в течение многих лет и завершилась публикацией труда «Описание Египта». Это солидное издание, увидевшее свет в 1809-1828 гг., дает представление о масштабе научной работы, выполненной на Востоке. Девять томов, включающих 126 научных исследований, делятся на три части: «Древность», «Современное государство» и «Естествознание». Текст сопровождается иллюстрациями (в десяти томах), а также атласом и топографическими картами. Полностью отчет был закончен при Людовике XVIII под названием: «Описание Египта или сборник наблюдений и исследований, которые были сделаны в Египте во время экспедиции французской армии, опубликованное по приказу Его Величества Императора Наполеона с историческим предисловием господина Фурье».

Отчет имел огромный успех у исследователей и публики. Экспедиция способствовала превращению поверхностного интереса и любопытства в интерес научный. Она дала обширный материал исследователям. Один из наиболее ярких примеров — расшифровка розетской надписи Шампольоном.

После экспедиции европейские музеи и многие коллекционеры стали проявлять повышенный интерес к египетской культуре. Оборотной стороной этого интереса стало разграбление достояния страны.

---

* Жан Франсуа Шампольон родился в 1790 г. в Гренобле и с детства интересовался древними языками. Когда ему было еще 15 лет, он признался: «Я хочу написать глубокое и подробное исследование об этом древнем народе. Из всех народов, мною горячо любимых, ни один не перевешивает египтян в моем сердце». В Париже, в Школе живых восточных языков, он изучал арабский, коптский, познакомился с санскритом, с китайской системой письма. В 1808 г. его старший брат, Жан Жозеф, показал будущему автору важнейшего в египтологии открытия собранные экспедицией папирусы и другие древности. Позднее Шампильону-младшему удалось прочесть иероглифическую часть розетской надписи. Он же составил первую грамматику и словарь древнеегипетского языка. Высеченная на базальтовой плите надпись содержала постановление жрецов в честь Птолемея Епифата и его жены Клеопатры. Надписи были выполнены на трех языках и тремя шрифтами; это и дало ключ к разгадке. В 1828 г. Жан Франсуа Шампольон совершил поездку в Египет и на основании собранных там материалов издал труды «Памятники Египта и Нубии» и «Очерк иероглифических систем».

Немилость

Разгром армии Наполеона в России явился началом конца его владычества. Создалась коалиция Англии, Австрии, Пруссии, России против Наполеона. В начале 1814 г. австрийская армия захватила Женеву, затем Аннеси, стала угрожать Греноблю, в котором было только 2000 солдат. Правительство послало для отпора австрийской армии в Гренобль комиссара Сен-Валлье, у которого помощником служил Стендаль. Это был единственный случай, когда Фурье и Стендаль встретились. Австрийцы берут один город за другим и 11 апреля подступают к Греноблю. Однако 12 апреля Наполеон отрекается, и войска входят в Гренобль без боя. Оккупация Гренобля длится только 38 дней. Союзные войска Англии, Австрии, Пруссии, России вступили в Париж.

Фурье в 1814 открыто присоединяется к Бурбонам и направляет мэрам городов инструкцию о необходимости поддержать новую власть. Народ устал от постоянных войн и предпочитает мир. После отречения от престола Наполеон был отправлен на остров Эльба. Один из друзей Фурье остается верным Наполеону и советует Фурье сопровождать его на остров Эльбу. Фурье не прислушался к этим советам и остался префектом. Путь его (Наполеона) пролегал через Гренобль. Фурье постарался избежать конфронтации со стороны разных роялистских группировок в Гренобле и предупредил Наполеона письмом о том, что его проезд через Гренобль может быть опасным.

Во Франции наступил период реставрации, но скоро все изменилось. Практически через год всю Европу облетела неожиданная весть. В первых числах марта 1815 г. Бонапарт оставляет Эльбу, выгружается в Провансе с отрядом из 900 солдат и направляется к Парижу. Многие французы сначала полагали, что это авантюра, обреченная на провал. На деле получилось иное. Ненависть к Бурбонам, ставленникам иностранцев и защитникам привилегий аристократов, была столь велика, что целые полки переходят на сторону Бонапарта. Наступают «сто дней» Наполеона.

Когда Фурье узнал, что Наполеон покинул Эльбу и триумфальным маршем идет к Парижу, он сначала был в ужасе, потому что Наполеон направлялся через Гренобль. Войско, посланное под командованием генерала Лаффера, чтобы его остановить, присоединяется к нему. Фурье пытается склонить людей Гренобля к оппозиции Наполеону и сохранить верность королю. Даже выпускает воззвание: «Граждане, помните, что первый долг состоит в том, чтобы повиноваться властям. Кто не будет следовать этому, будет арестован на месте и строго наказан. Любое скопление народа будет рассеяно вооруженной силой». Однако это не мешает ему дать указание приготовить апартаменты для Бонапарта в отеле «Три дельфина». Сам же уезжает в Лион, оставив для Наполеона письмо, в котором объясняет, что повинуется прежним властям. 7 марта 1815 г. рабочие Гренобля вместе с солдатами местного гарнизона открывают ворота Наполеону.

Наполеон был недоволен тем, что префект Фурье, которого он назначил и хорошо знал и которого хотел видеть приветствующим его,не верит в него. Он надеялся, что Фурье все-таки вернется к нему. Друг Фурье, Шампольон Фижак (старший), служит секретарем при Наполеоне, старается примирить Фурье и Наполеона и готовит их встречу. Несмотря на ряд трудностей, примирение состоялось. При встрече с Наполеоном, на его вопрос, что он думает о ситуации, глядя прямо в глаза Бонапарту, Фурье говорит: «Государь, я думаю, что Вы потерпите неудачу».

20 марта Наполеон вступает в Париж. Людовик XVIII едва успел скрыться в Бельгии. Позже Наполеон присваивает Фурье титул графа и хочет назначить его префектом департамента Роны. Это не было реализовано, возможно, из-за роли Лазаря Карно, который сразу же удалил всех администраторов за симпатии к королю и роялистам. Во Франции идет подъем демократического и патриотического движения, создаются союзы добровольцев из рабочих, ремесленников, мелких буржуа для защиты родины от внутренних и внешних врагов. Одновременно начинаются и выступления против Наполеона, руководимые местными помещиками.

Решающую роль в восстановлении империи сыграла антифранцузская интервенция. 25 марта Англия, Россия, Австрия и Пруссия заключили союзный договор о военных действиях против Франции. Общая численность их войск превысила 700 тыс. человек, Наполеон мог противопоставить им только 125 тыс. солдат. В первых схватках войска союзников терпели поражения. Наполеон неизменно переигрывал генералов союзных войск, несмотря на численное превосходство, но 18 июня при Ватерлоо французская армия все-таки была разбита превосходящими по численности английскими и прусскими войсками. Это был удар, от которого Наполеон уже не смог оправиться, хотя его правление продолжалось.

10 июня 1815 г. Наполеон установил для Фурье пенсию 6000 франков, а 22 июня он вынужден был отречься от престола, сдался англичанам и был отправлен на далекий остров Святой Елены. Не желая встречаться с Бонапартом, который ехал в новую ссылку, Фурье старается направить его свиту долиной Роны, а не через Гренобль. Фурье ни пенсии, ни денег, конечно, не получил и возвратился в Париж. Так окончились для него сто дней вторичного правления Наполеона.

Летом 1815 года после того как был расстрелян маршал Ней — расстреляна слава Франции! — все поняли, что наступает пора беспощадной, не останавливающейся ни перед чем реакции. Были убиты без суда ряд генералов, по всей Франции начались аресты по малейшему подозрению в республиканских настроениях, в симпатиях к Наполеону. За участие в революционных событиях конца XVIII века, было арестовано более 70 тысяч человек. Среди арестованных, расстрелянных было много офицеров и генералов, верно служивших родине. Военные суды и трибуналы вынесли более 10 тыс. обвинительных приговоров. «Чистка» была проведена и в гражданской администрации, число уволенных со службы чиновников достигло 100 ты-

сяч. «Чистка» коснулась и научных учреждений. Знаменитый художник Давид, выдающийся математик Монж и 19 других деятелей науки были исключены по политическим мотивам из Академии.

После Ватерлоо король Людовик XVIII лишает Фурье всех чинов, должностей и грубо отклоняет его прошение о пенсии. Фурье нищенствует, зарабатывает уроками, подумывает об эмиграции в Англию. Друг Шампольон Фижак под домашним арестом. С Фурье только верный слуга Жозеф, который останется с ним до своей смерти. К счастью один из его бывших учеников Политехнического института, префект Сены предлагает Фурье работу директором бюро статистики префектуры. Фурье собирает статистические данные о смертности в зажиточных и бедных классах, в тюрьмах, о влиянии оспы и нездоровых условий жизни на смертность, а также о распределении числа рождений в зависимости от месяца года и другие.

Собрав социологические факты и обработав их, он публикует эти данные в 4-х томах (1821, 22, 23 и 24 гг.) под названием «Статистические исследования, касающиеся Парижа и префектуры Сены». Он не прекращает и научную деятельность. В 1816 публикует в «Летописях физики и химии» статью «Теория тепла» на 26 страницах. Эта публикация вызывает полемику с Пуассоном, который работает над этой же темой и использует неопубликованные предшествующие работы Фурье без ссылки на них. Фурье обращается к Лапласу, но конфликта не затевает, зная, что правда не сегодня завтра восторжествует.

Признание

Бурбоны, водворенные во Франции силой иностранных штыков, не рисковали покуситься на те социальные завоевания революции, которые не сумела задушить империя Наполеона. Людовику XVIII пришлось пойти на установление умеренно-конституционной монархии. В создавшейся ситуации власть была не прочь привлечь к себе выдающихся людей страны. Лаплас получил большой крест Почетного Легиона, титул маркиза и звание пэра Франции; Бертолле, Гей-Люссак и Фурье — титулы баронов. Покорность Института Наполеону дала королю основание в порядке административного произвола исключать из академий людей, неугодных новому режиму. Восстанавливается Академия наук, король сам назначает членов, среди которых есть и бывшие члены, но Монж и Карно (друзья Наполеона и его сподвижники) не входят в их число. Остаются два вакантных места. Фурье избирается 38 голосами против 17, но Людовик XVIII не утверждает это решение. Фурье не опротестовывает, но на следующий год избирается уже 47 голосами из 50. Король вынужден согласиться. Араго по этому поводу замечает: «В нашей стране абсурд длится недолго». В мае 1817 года Фурье исполняется 49 лет, пост академика приносит ему пенсию.

Фурье избран членом математического общества, публикует в журнале этого общества за 1817 и 1818 гг. работы по теории теплоты и алгебраичес-

Фурье в 20-х годах XIX века

ким уравнениям, выполненные в Гренобле. В 1820 г. выходит его статья по теплопроводности земного шара и оценке возраста Земли. Декарт и Лейбниц полагали, что Земля ранее имела такую же температуру, как и Солнце, и медленно охлаждалась. Бюффон оценил, что тепло, попадающее на Землю от Солнца, недостаточно для поддержания жизни, и надо полагать, что внутри Земли есть достаточное количество теплоты. Он исследует скорость охлаждения нагретых сфер и заключает, что возраст Земли 75 тыс. лет. Фурье повторяет эти расчеты и, полагая, что в центре Земли температура 500°С, приводит другую оценку — 150 тыс. лет. Оба этих расчета, как показали дальнейшие исследования, весьма далеки от действительности. Сейчас ясно, что все эти оценки (Бюффона и Фурье) неверны из-за неверных предпосылок.

С 1818 г. Фурье занимался проблемой параллельных прямых и постулатом Эвклида. Наконец, в 1822 году публикуется окончательная версия теории теплоты. После смерти Деламбера освобождается пост секретаря Академии. Были выставлены кандидатуры Араго, Био и Фурье. После того, как Араго снял свою кандидатуру, баллотировались на этот пост двое — Фурье и Био. Фурье получил 38 голосов против 10 у Био. В 1823 г. он избирается в Академию медицины, затем в Королевское общество в Лондоне.

Именно в этот год датский физик Эрстед предлагает ему сотрудничество по проблемам термоэлектричества. Исследования идут только у Эрстеда, который располагает лабораторией. Фурье нехотя подписывает совместную публикацию (кажется, это единственная его публикация в соавторстве!).

Являясь секретарем Академии, он каждый раз вынужден произносить надгробное слово, но он превосходный оратор и этим гордится. В своих речах он осуждает эпоху «ужаса» — эпоху революции.

В 1829 г. Санкт-Петербургская Академия избирает его ассоциированным членом. Будучи секретарем Академии, он поощряет таких математиков, как Эварист Галуа (1811 – 1832) и Софи Жермен (1786 – 1831), единственную женщину-математика. Фурье интересуется такими молодыми учеными, как Дирихле и Остроградский. Однако учеников у него не было. До конца жизни он работает над методами измерений коэффициентов теплопроводности.

Личная жизнь

Фурье.
Рисунок неизвестного художника.
Около 1820 г.

Фурье не сочетался браком и неизвестны какие-либо его сентиментальные приключения. У него была красивая голова, тонкие черты лица, красивые глаза. Он не был романтиком и не заводил множество знакомых, его знали лишь некоторые близкие друзья (профессор Боннар из Оксера, Шампольон-старший, его секретарь и сподвижник по Египту). Говорят, что он был весьма вежлив, но его вежливость была для других холодноватой, как будто между ним и другими был экран. Даже враги Франции уважали и ценили его как арбитра при спорах или при трудных переговорах. В Гренобле он вызывал уважение генералов. Жители Гренобля его любили и часто аплодировали при встречах с ним. В то время как многие чиновники были коррумпированы, он никогда не использовал своей власти для обогащения. Научные инструменты, в которых он нуждался, приобретал из своего кармана, то есть из жалования префекта.

Он был глубоко светским, неверующим человеком, но к религии относился уважительно. С женщинами был ироничен, но никто из современников даже не дал намека на какие-либо его связи. Он много раз переписывался с математичкой Софи Жермен, которая была на восемь лет моложе его, но всегда подписывал письма: «Ваш скромный и послушный слуга».

Он был весьма трудолюбив. В Гренобле, будучи префектом, хотя и должен был постоянно следить за тремя большими работами, находил время для научных занятий. Для этого укрывался в замке Борегар. Часто ездил в Париж, даже подсчитали, что за 13 лет он отсутствовал в Гренобле 941 день, т. е. 3 года. Может быть, именно это способствовало успеху во всех его предприятиях. Он работал много ночью по привычке, выработанной еще в военной школе; работал также по воскресеньям.

Вероятно, брак был несовместим с таким ритмом жизни. Это был большой отшельник, как сказали бы теперь — индивидуалист. Он никогда не проводил свои исследования с кем-либо (за исключением случая с Эрстедом и по просьбе последнего), не любил дискуссий на собраниях ни научных, ни политических, в том числе и на муниципальных собраниях в Гренобле.

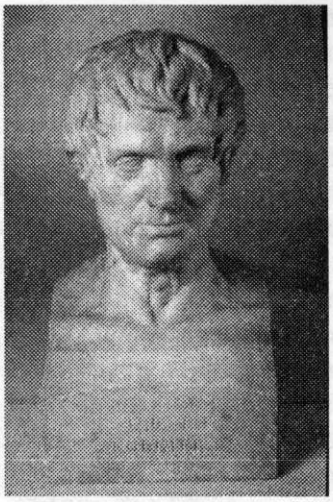
Пожалуй, главная его черта — это лояльность и уважение закона. Он честно сотрудничал со всеми властями, с коллегами. Если режим или обстоятельства оказывались слишком бесчеловечными, противоположными его убеждениям, он не примыкал к ним. Так надо понимать его запоздалое вступление в революцию, отставку из революционных комитетов, выезд из Египта в 1801 году, отход от Наполеона в 1814, нежелание встречи с ним в 1815, свой отказ от организации репрессий в Лионе. Из этой лояльности вытекает его высокая профессиональная добросовестность — пример для своих коллег-префектов. Все доступные источники о Фурье единогласны: это был видный префект, большой ученый, египтолог первого плана, скромный, прямой, справедливый и приветливый человек.

Только одно отрицательное мнение о нем исходит от Стендаля. Они встречались всего один раз в 1814 г. Комиссар Де Валлье был послан для организации защиты Гренобля, а Стендаль был у него помощником. Стендаль не оценил работ Фурье по защите Гренобля от австрийской угрозы.

«*Этот маленький префект арестовывал всех противников власти. Я удивлен, что г-н Де Валлье не замечал этого произвола и беспрестанно хвалил этого Фурье... Он был одним из моих источников неприятностей в Гренобле — этот маленький ученый с низкой вежливостью слуги*». По-видимому, они были слишком разные люди. Конечно, одно мнение, основанное на единственной встрече, даже если это мнение Стендаля, не может перевесить мнений многих людей, неоднократно встречавшихся с Фурье.

5 марта 1827 г. в своем доме в Аркойле умер Лаплас. Весть о его смерти быстро дошла до Парижа и в тот же день достигла Академии наук, занятой очередным заседанием. Когда председатель объявил о случившимся, глаза всех присутствующих обратились к пустому креслу, которое еще совсем недавно занимал Лаплас. Воцарилось мертвое молчание. Каждый почувствовал, что с Лапласом отошла в прошлое одна из величайших эпох в истории науки, охватившая более полстолетия. После нескольких минут молчания все разом встали и молча, как по уговору, вышли из помещения. Через два дня состоялись похороны. Фурье, непременный секретарь математической секции Академии, прислал извинение, что по нездоровью не может присутствовать на похоронах и сказать надгробное слово, которого от него все ждали.

Фурье высоко ценил Лапласа как ученого, хотя и был несколько обижен на него за то, что тот вместе с Лагранжем посчитал неправильными некоторые выводы Фурье в теории тепла. Двумя годами позже, произнося «похвальное» слово Лапласу на заседании Академии, Фурье неожиданно стал восхвалять нравственные качества Лагранжа, который часто соперничал с



Лапласом. Фурье охарактеризовал Лапласа только как ученого, но не как человека: *«Лаплас был одарен от природы гением, заключавшем в себе все необходимое для совершения громадного научного предприятия»*.

В конце своей жизни Фурье обращал на себя внимание окружающих тем, что даже в жаркую погоду старался укутываться в теплую одежду, как бы постоянно мерз.

Эта потребность была связана либо с ревматическими болями, либо с какой-то вирусной болезнью, которую он мог подхватить в Египте. Все соглашаются, что это обнаружилось в нем уже в Гренобле, после возвращения из Египта.

Он скончался на 63 году жизни в Париже 16 мая 1830 года. Официальная причина его смерти — аневризма аорты. Так или нет, теперь трудно сказать. Возможно, какую-то роль в этом сыграла болезнь, подхваченная им в Египте, то ли малярия, то ли инфекция. Он был похоронен в Париже на кладбище Пер-Лашез.

Теория теплоты

С середины XVIII века не только интеллектуальная общественность, но и многие обычные люди в Европе проявляли большой интерес к достижениям науки и техники. В 1784 г. в Гренобле был запущен один из первых воздушных шаров.

Основная область научных занятий Фурье — математическая физика. Во время пребывания в Гренобле Фурье сделал важную математическую работу по теории распространения тепла. Она была начата в 1804 и закончена в 1807 году под названием «О распространении тепла в твердых телах». Работа была представлена в Парижский институт 21 декабря 1807 г. в виде монографии на 234 страницах. Рецензентом был комитет из известных математиков: Лагранжа, Лапласа, Монжа и Лакруа. Теперь эта работа оценивается очень высоко, но в то время она вызвала полемику. Комитет отклонил эту работу по двум причинам. Первая была указана Лагранжем и Лапласом в 1808 году и состояла в том, что Фурье использовал представление функций в виде тригонометрических рядов, что не является, по их мнению, общим методом. Теперь эти ряды называются рядами Фурье. Они нашли ошибки в его усовершенствованном подходе к решению задач, выполненных Даниилом Бернулли в XVIII столетии. Объяснения Фурье показались им неубедительными. Последующая история их рассудила, и как было отмечено одним ученым:

«Все это было записано с такой образцовой ясностью по логике, в противоположность каллиграфической точки зрения, что неспособность убе-

дить Лагранжа и Лапласа в этом дает хорошее доказательство оригинальности взглядов Фурье».

Вторая причина была отмечена Био, возражавшего против интегрирования уравнений переноса тепла. Дело в том, что Фурье не сделал ссылки на статью Био, опубликованную в 1804 г. по этой теме, так как статья Био была некорректной. Лаплас и позднее Пуассон указали на подобную причину.

Институт, тем не менее, присудил Фурье за работу по распространению тепла в твердых телах премию в конкурсе работ по математике за 1811 год. Он представлял на конкурс свою работу 1807 года вместе с работами по охлаждению неограниченных тел, Земли и по излучению. Почему-то только вторая часть была получена комитетом, и за решение о присуждении премии голосовали Лагранж, Лаплас и др. Однако отзыв о работе был не очень благоприятным, и в нем указывалось:

«Способ, которым автор получает эти уравнения, не избавлен от трудностей и его метод интегрирования оставляет желать большей общности, и даже строгости».

При таком, скорее отрицательном, заключении не было возможности опубликовать эту работу. Отрицательная рецензия на эту работу от знаменитых уже тогда ученых задержала публикацию монографии на 15 лет (!).

В 1817 году Фурье избирают членом Французской академии. В 1822 г. Даламбер, который был секретарем математического отделения академии, умер, и вместо него на этот пост баллотировались Фурье, Био и Араго. Араго снял свою кандидатуру и Фурье победил. Фурье стал секретарем отделения академии в 1822 г., и после 15 летней задержки выходит его книга «Аналитическая теория тепла»*. Но это не было результатом какого-либо проталкивания публикации с его стороны, поскольку Даламбер согласовал разрешение на публикацию этой книги еще до смерти.

Во время последних восьми лет в Париже Фурье продолжает исследования в области чистой математики и прикладных задач. В житейском плане у него нет проблем, однако его теория переноса тепла не принимается современниками. Био оспаривает приоритет перед Фурье, считает, что возражения Фурье ошибочны. Пуассон возражает против математической техники, использованной Фурье, и также пытается создать альтернативную теорию. Его упрекают за недостаточную строгость выводов. Ситуация, по образному выражению Хевисайда, была такова: «Станете ли Вы отказываться от обеда только потому, что Вам не полностью понятен процесс пищеварения?» Фурье пишет в ответ на эти возражения «Исторические заметки». Хотя эту его работу просмотрели различные математики, она не публикуется. Ответ Фурье на возражения Био и Пуассона звучит так:

«Я теперь признаю, что полученные и Био и Пуассоном результаты точны, но они протестуют, поскольку изобрели другой метод изложения результатов и утверждают, что их метод превосходен и справедлив. Если

* Theorie Analitique de la Chaleur

бы они изложили этот раздел физики с упором на важность и общность и представили более совершенный анализ частных дифференциальных уравнений, если бы они установили принципиальные положения в теории тепла какими-либо тонкими экспериментами, они имели бы право судить мою работу и исправить ее. Я с большим удовольствием согласился бы. Но представление или моих же результатов в другой форме и более ранняя их публикация не расширяет наших знаний в науке».

Работа Фурье дала большой толчок развитию исследований по тригонометрическим рядам и теории функций реальных переменных. Эта книга сыграла большую роль в истории математики. Считается, что это одна из наиболее важных книг, опубликованных в XIX столетии. В ней он вывел дифференциальное уравнение теплопроводности и развил идеи, намеченные ранее Даниилом Бернулли. Многие положения работы стали началом целых разделов математической физики.

Был разработан метод разделения переменных (метод Фурье), который применим к ряду частных случаев. В основе метода лежит представление функций тригонометрическими рядами (ряды Фурье). Этот метод позже получил развитие в работах Пуассона, М.В. Остроградского и др. Книга Фурье вышла в Париже в 1822 г., а уже в 1825 году Н.И.Лобачевский (1792 – 1856), профессор физики Казанского университета, в своих лекциях основывался на этой работе при изложении теории теплоты. Если учесть удаленность Казани и слабо развитую транспортную связь того времени, то это достойно восхищения. Таким образом, «Аналитическая теория тепла» — отправной пункт создания теории тригонометрических рядов и разработки некоторых общих проблем математического анализа.

Хотя его попытка доказать возможность разложения любой произвольной функции в тригонометрический ряд оказалась неудачной, она положила начало большому циклу исследований о представимости функций тригонометрическими рядами (П.Дирихле, Н.И.Лобачевский, Б.Риман и др.). Дальнейшие разработки привели к возникновению теории множеств и теории функций действительного переменного.

Одной из новых областей физики в XVIII веке стала акустика — математическое описание и анализ музыкальных звуков. Акустика началась с исследования звуков, издаваемых колеблющейся струной (Д.Бернулли, Даламбер, Эйлер, Лагранж). Наши современные представления о том, что каждый музыкальный звук состоит из основного тона (первой гармоники) и обертонов (высших гармоник) с частотами, кратными частоте первой гармоники были созданы именно их трудами. Но их мнения расходились по вопросам математического анализа. Спор удалось разрешить не сразу и только после появления трудов Фурье в XIX веке. Этот век начался для математики удачно. В расцвете сил работали Лагранж, Лаплас. Гаусс (1801) опубликовал свои «Арифметические исследования», был на пороге новых достижений, которые снискали ему титул «короля математики». В начале века развилась дискуссия по поводу главной задачи математики: должна ли

она решать практические задачи или быть математикой ради математики. Хотя критику чистой математики можно найти еще в сочинении Ф.Бекона «О достоинстве и приумножении наук» (1620), где он возражал против чистой и самодовольной математики, «полностью абстрагированной от материи и от физических аксиом». Характерны в этом отношении взгляды Фурье на математический подход к решению физических проблем, отраженные в классическом труде «Аналитическая теория тепла»:

«Глубокое изучение природы — наиболее плодотворный источник математических открытий. Такое изучение не только обладает преимуществами хорошо намеченной цели, но и исключает возможность неясной постановки задач и бесполезных выкладок. Главная отличительная особенность математического подхода — его ясность, в нем нет символов, которые выражали бы смутные идеи. Он сводит вместе самые различные явления и обнаруживает объединяющие их скрытые аналогии. ...Математический анализ позволяет постичь законы явлений. Он делает их как бы видимыми и измеримыми и, должно быть, является способностью человеческого разума, призванной возместить кратковременность жизни и несовершенство наших чувств. Он переводит все явления на один и тот же язык, как бы подчеркивая единство и простоту структуры мира и делая еще более заметным порядок, правящий в природе всей материей».

Очень странно, что после смерти Фурье знаменитый ученый Карл Густав Якоби, которому принадлежат первоклассные результаты в области астрономии и механики, счел возможным выступить с критическими замечаниями: «Фурье усматривает главное назначение математики в общественной пользе и объяснении явлений природы. Но такому ученому, как он, следовало бы знать, что единственная цель науки состоит в прославлении человеческого разума». Специалисты по математической физике не разделяли таких взглядов. Лорд Кельвин (Уильям Томсон, 1824 – 1907) и другие провозглашали, что лучшая математика та, которую подсказывают приложения.

Имя Фурье в математике, физике, теории теплообмена

С именем Фурье в математике и теории теплообмена связаны многие методы, термины, разделы науки

Метод Фурье — метод решения задач математической физики, основанный на разделении переменных.

Ряд Фурье — тригонометрический ряд для разложения периодической функции на гармонические коэффициенты. Считается, что самый первый тригонометрический ряд был написан Эйлером. В его «Дифференциальном исчислении» 1755 года в главе «О представлении функций» можно найти равенство:

$$\frac{\pi - x}{2} = \mathrm{Sin}\, x + \frac{\mathrm{Sin}2x}{2} + \frac{\mathrm{Sin}3x}{3} .....$$

Приблизительно в то же время Даниил Бернулли, в связи с задачей о колебании струны, высказывает уверенность о возможности аналитического выражения «любой линии» на отрезке (0 – 2π) рядом из синусов и косинусов. Однако положение оставалось невыясненным до 1805 года, когда Фурье представил формулы для коэффициентов разложения функции.

Если функция f(x) имеет период 2T, то ряд имеет вид:

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n \cos\frac{\pi n x}{T} + b_n \sin\frac{\pi n x}{T}\right).$$

Коэффициенты Фурье — коэффициенты разложения функции f(x), имеющей период 2T:

$$a_n = \frac{1}{T}\int_{-T}^{T} f(x)\cos\frac{\pi n x}{T}dx\,,\ n = 0,\ 1...$$

$$b_n = \frac{1}{T}\int_{-T}^{T} f(x)\sin\frac{\pi n x}{T}dx\,,\ n = 1,\ 2...$$

Коэффициенты стремятся к нулю при $n \to \infty$.

Преобразование Фурье. В основе преобразования Фурье лежит чрезвычайно простая, но исключительно плодотворная идея: почти любую периодическую функцию можно представить суммой отдельных гармонических составляющих (синусоид и косинусоид с различными амплитудами, периодами и, следовательно, частотами). Преобразование Фурье часто применяется в теории автоматического регулирования, в теории фильтрации и при решении других задач.

Фурье-образ (Фурье спектр) — частотная характеристика функции f(x), выражающаяся формулой:

$$F(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\, e^{-iux} dx .$$

Если функция f(x) суммируема, то ее Фурье-образ F(u) — ограниченная функция, равномерно непрерывная на оси u и F (u)→ 0 при $|u| \to \infty$.

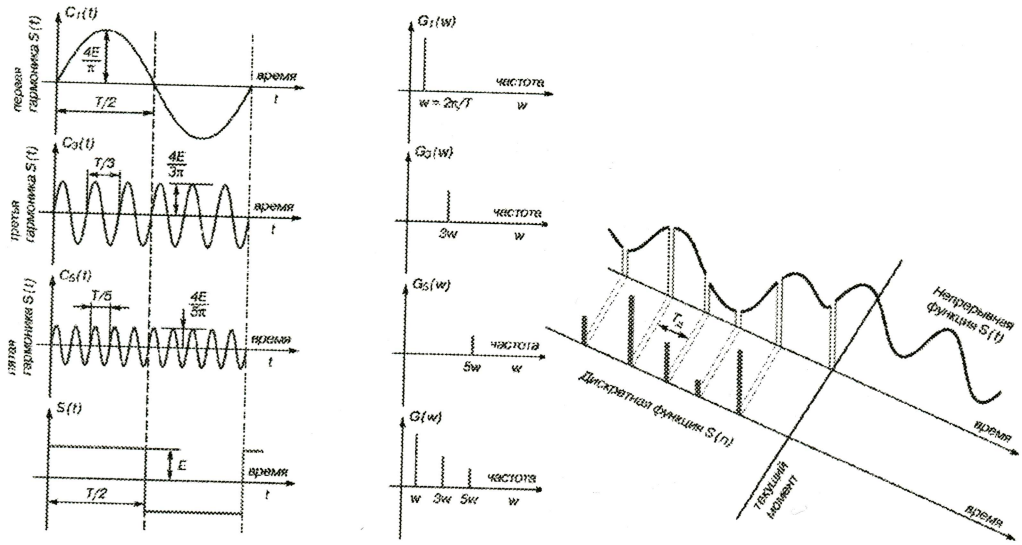
Фурье-спектрометрия — метод, в котором получение спектров происходит в два приема: сначала регистрируется интерферограмма (например, излучения), а затем путем преобразования Фурье вычисляется спектр. Таким образом исследуются спектры в инфракрасном субмиллиметровом и других диапазонах длин волн. Внешний вид спектра говорит о многом. Узкий спектр, сконцентрированный на небольшом участке частот, всегда соответствует процессу протяженному во времени и, в общем случае, колебательному.

Широкий спектр указывает на действия мгновенные, резкие, в виде импульсов. Сплошной спектр с бесконечным числом гармоник принадлежит единичному сигналу, а появление в спектре отдельных полос говорит о периодической повторяемости сигналов. Современные приборы — Фурье-спектрометры — позволяют работать в широком спектральном интервале от 5 $см^{-1}$ до $5 \cdot 10^4$ $см^{-1}$, то есть от субмиллиметрового до ультрафиолетового диапазона, хотя наибольшее распространение получили приборы, работающие в инфракрасном диапазоне, где их преимущества наибольшие.

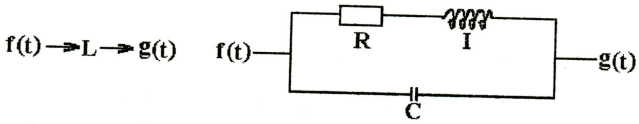
Дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Дискретные преобразования были известны давно. Еще в 1600 годы астрономы, рассчитывая положение небесных светил, вводили в свои алгоритмы данные предыдущих наблюдений. Выяснилось, что обычное преобразование Фурье не удовлетворяет принципам дискретной фильтрации, что привело к существенной модификации этого преобразования, которое получило название дискретного. Вычислительные электронные цифровые машины требуют дискретных входных сигналов. Вместо непрерывных функций следует вводить набор их дискретных значений. В 1965 году был опубликован новый метод вычисления дискретного преобразования Фурье, позволяющий резко сократить время вычислений — быстрое преобразование Фурье (Д.Кули, Д.Тьюки).

«*Человеческая мысль выводит аппарат Фурье на все новые и новые орбиты*» [А.Карташкин, 2004].

Возникают идеи почти фантастические: «*Информация во вселенной может быть организована не так, как мы привыкли считать, в терминах пространства и времени, предполагает Роберт Джан, физик, специалист по газодинамике, а как частотно-амплитудная структура, над которой человеческое сознание производит, по сути дела, преобразование Фурье...*»



Фурье–оптика — раздел оптики, в котором преобразование световых полей оптическими системами исследуется с помощью Фурье-анализа (спектрального разложения) и теории линейной фильтрации. В радиоэлектронике систему, преобразующую сигналы, принято изображать в виде схемы, где внешнее воздействие f(t) – входной сигнал фильтра, g(t) – выходной (отклик) фильтра. Примером временного фильтра является колебательный контур.



Волновые (оптические) явления могут характеризоваться как временной, так и пространственной зависимостью (то есть от координат). В Фурье-оптике рассматривается именно пространственная структура волны.

Интеграл Фурье — формула для разложения непериодической функции на гармонические коэффициенты

$$f(\mathrm{x}) = \int_0^{\infty} \left[a(\mathrm{u})\cos \mathrm{ux} + b(\mathrm{u})\sin \mathrm{ux}\right] \mathrm{du},$$

где $a(\mathrm{u}) = \dfrac{1}{\pi}\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} f(\mathrm{t})\cos \mathrm{ut}\,\mathrm{dt}$, $\quad b(\mathrm{u}) = \dfrac{1}{\pi}\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} f(\mathrm{t})\sin \mathrm{ut}\,\mathrm{dt}$.

Часто употребляется представление интеграла Фурье в комплексной форме:

$$f(\mathrm{x}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \mathrm{F(u)}\, \mathrm{e}^{-\mathrm{ix}} \mathrm{du};$$

F(u) — см. выше.

Гипотеза Фурье (закон Фурье) — пропорциональность плотности теплового потока в твердом теле градиенту температуры:

$$\vec{q} = -\lambda \left.\frac{\partial t}{\partial n}\right|_n, \qquad (1)$$

где $\vec{q}$ – вектор плотности теплового потока, Вт/м^2; λ - теплопроводность, Вт/(м·К); n – нормаль к изотерме.

Этот закон является определением теплопроводности и дает возможность экспериментального определения λ.

Несмотря на то, что здесь молчаливо предполагается бесконечная скорость переноса тепла, эта гипотеза дает хорошие результаты в большинстве практически важных случаев, за исключением тех, где плотность теплового потока сильно изменяется во времени. В последнем случае, как было выяснено позже, выражение (1) дополняется еще одним членом:

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} + \frac{a}{w_q^2}\frac{\partial q}{\partial \tau},$$

где $\alpha = \lambda/c\rho$ – температуропроводность, м^2/с; w_q – скорость распространения тепла.

Число Фурье — безразмерный комплекс в теории подобия (безразмерное время), получающийся из приведения уравнения теплопроводности к безразмерному виду. Это число широко используется при описании нестационарных процессов теплопроводности (нагрев, охлаждение).

Поле температуры при охлаждении пластины с начальной температурой T_0 и изоляцией с одной стороны описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}.$$

Приводя уравнение к безразмерному виду при использовании $\Theta = \frac{t}{t_0}$; $x = \frac{x}{\ell}$, получаем

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = \frac{\ell^2}{a}\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} \quad \text{или} \quad \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = \frac{\partial \Theta}{\partial (Fo)};$$

$$Fo = \frac{a\tau}{\ell^2} = \frac{\tau}{\ell^2/a};$$ где ℓ^2/a - масштаб времени.

Парниковый эффект. В 1824 г. Фурье на основании наблюдений и расчетов впервые указал на то, что Земля теплее, чем ей следовало быть, только благодаря Солнцу. По его мнению, Землю окружает своего рода воздушный компресс — явление, ныне называемое «парниковым эффектом». Его открытие дополнил в 1861 г. английский физик Джон Тиндаль (1820 – 1893). Физический смысл этого явления можно понять из баланса энергии для планеты. Энергия, получаемая планетой от Солнца за единицу времени, равна энергии, излучаемой планетой в космическое пространство.

Уравнение энергетического баланса может быть представлено в виде

$$4\pi r^2 \sigma T_e^4 = \pi r^2 E_0 (1 - A)/ R^2 ,$$

где r – радиус планеты, σ - постоянная Стефана – Больцмана, E_0 – солнечная постоянная (плотность теплового потока, излучаемая Солнцем), R – расстояние от планеты до Солнца, A – сферическое альбедо планеты. При наличии атмосферы средняя температура поверхности планеты T_s не равна T_e. Разность (T_s - T_e) является мерой парникового эффекта. Излучение Солнца в основном сконцентрировано в коротковолновой части спектра, а не в области теплового излучения: 75% энергии приходится на диапазон длин волн 0,4 – 1,5 мкм, а 25% энергии теплового излучения Земли при 300 K приходится на диапазон 8 – 28 мкм. Парниковый эффект повышает температуру поверхности Земли примерно на 40 K (T_s = 288 K, T_e = 249 K) и играет первостепеную роль в формировании ее климата. Важнейшие поглощающие газы – H_2O (~ 10^{-2}), CO_2 (~$3\cdot10^{-4}$), SO_2 и NO_x .

Для современной цивилизации опасен «необратимо развивающийся» парниковый эффект, когда рост температуры может приводить к поступлению в атмосферу все большего количества поглощающих газов, а это, в свою очередь, может привести к росту температуры и т. д.

Имя Фурье увековечено не только в математических терминах, его имя носят учебные заведения. На его родине в Оксере есть **лицей имени Фурье**. В 1339 году в Гренобле был организован один из старейших университетов Европы. В нем теперь есть **Институт Фурье**, где преподается алгебра, геометрия, вероятностный анализ, гармонический анализ, теория чисел, дифференциальная геометрия, топология и многие другие математические предметы. В Гренобле есть также Национальный Центр научных исследований (Centre National de la Recherche Scientifique – CNRS), в котором есть **университет**, с 1987 г. носящий имя **Жозефа Фурье** (Universite Joseph Fourier – Science, Technologie, Medicine).

На Луне есть кратер его имени — **кратер Фурье**.

Основные публикации Фурье

1. «Extrait d`un Memoire sur le refrodissement du globe terrestre». Bull. Sci. par la Societe philomatique de Paris, 1820. (Памятная записка об охлаждении земного шара. Бюллетень научн. философ. общества, Париж, 1820).
2. «Theorie analytique de la chaleur», Gauthier-Villars, Paris, 1822; англ. перевод - Freeman Cambridge, 1878; нем. перевод - Weinstein, Springer, Berlin, 1884; англ. перевод - Analitical Theory of Heat, New York Dover Publication (transl. by A Free man), Inc. 1955. (Аналитическая теория теплоты, Готье-Виллар, Париж, 1822).
3. «Oeuvres complets», Tome I, II, Paris, 1888. (Полное собрание сочинений, т. I, II, Париж, 1888).

Основные публикации о Фурье

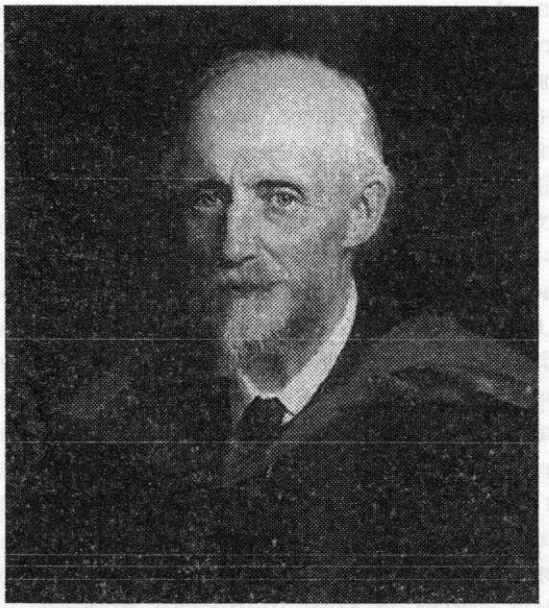
1. Араго Ф. Биографии знаменитых астрономов, физиков и геометров. Т.1. — Ижевск, РХД, 2000.
2. Воронцов-Вельяминова Б.А. Лаплас. Изд. 2-е. — М.: Наука, 1965.
3. История Франции в 3-х томах / Под ред. А.З.Манфреда и др. Т. 2. — М.: Наука, 1973.
4. Стройк Д.Я. Краткий очерк истории математики / Пер с нем. Изд. 3-е. — М.: Наука, 1976.
5. Голованов Я. Этюды об ученых. Изд. 2-е. — М.: Молодая гвардия, 1976.
6. Манфред А.З. Наполеон Бонапарт. 3-е изд. М.: Мысль, 1980.
7. Клайн М. Математика. Утрата неопределенности. М.: Мир, пер. с англ. 1984.
8. Керам К. Боги, гробницы и ученые: роман археологии. М.: Терра, 2001.
9. Никифоровский В.А. Математик, государственный деятель, гражданин (к 225-летию со дня рождения Ж.Б. Ж. Фурье // Вестник Российской АН. — 1993. — Т. 63. — № 8. — С. 743-746.
10. Arago F. Joseph Fourier, Biographies of Distinguished Scientific Men (London, 1957), 242-286.
11. Joseph Fourier. Savant et Prefect (1768 - 1830), Grenoble: Bibliotheque Municipales, 1989.
12. Карташкин А. Уйти, чтобы вернуться. — М.: Техника молодежи, 2004. http://zink0000.narod.ru/txt/furie/furie.htm

Даты биографии

21.03.1768	Родился в Оксер (Auxerre), Франция.
1780	Поступает в военную школу.
1783	В 15 лет получает первую премию за реферат по книге «Общая механика».
1789	В королевской Академии наук читает доклад по алгебраическим уравнениям
1790	Учитель в колледже бенедиктинцев
1793	Участвует в революционном движении
1794	Арестован, помещен в тюрьму. Выпущен после казни Робеспьера.
1795	Поступает в Эколь Нормаль, где учителями работают Лагранж, Лаплас, Монж. 27-летний Жозеф приглашен в Эколь Централь (позже знаменитая Политехническая школа). По политическим убеждениям опять попадает в тюрьму. Усилиями ученых и друзей его скоро выпускают.
1798 - 1801	Вместе с 165 учеными Франции участвует в Египетском походе Наполеона.
1801 - 1807	По настоятельной просьбе Наполеона работает префектом департамента Изер (центр Гренобль). Пишет свою основную научную работу «О распространении тепла в твердых телах».
21.12.1807	Докладывает эту работу в Парижском институте.
1816	Переезжает в Париж.
1817	Избран постоянным секретарем Академии наук.
1822	После 15-летней задержки выходит его книга «Аналитическая теория теплоты».
1826	Избран членом Французской Академии.
16.05.1830	Скончался на 63 году жизни в Париже от хронической болезни. Похоронен на кладбище Пер Лашез.

Осборн Рейнольдс

23.08.1842 – 21.02.1912



Осборн Рейнольдс — английский инженер и физик, хорошо известный работами в области гидравлики и гидродинамики. Его отец, Реверенд Осборн Рейнольдс, был священником в англиканской церкви, окончил Кембридж в 1837 году, был принят стажером в Королевский колледж, затем был директором первой коллегиальной школы в Белфасте, позже школы в графстве Эссекс, а затем ректором колледжа в Дебахе. Это была семья с церковными традициями и три поколения мужчин (прадед, дед и отец) были ректорами университета в Дебахе.

Осборн родился в Белфасте, когда его отец был там директором школы, в школу начал ходить уже в Эссексе. После школы, в 1861 году, он поступил учеником в техническую фирму Эдварда Хейса (в Стратфорде), хорошо известного изобретателя и инженера-механика. Воспитанием Рейнольдса в основном занимался отец, который обладал математическими способностями, интересовался механикой, разными механическими устройствами, имел несколько патентов по совершенствованию сельскохозяйственной техники. Молодой Рейнольдс рано обнаружил интерес к изучению механики и в 19 лет выступил на семинаре у м-ра Хейса. Позже он писал, что в отрочестве постоянно находился под влиянием отца, который хотя и любил механику, но не понимал до конца роль математики в механике и физике. Во время этого периода, по его собственным словам, «мое внимание сосредоточилось на различных механических явлениях для объяснения которых, как я открыл, нужно было хорошо знать математику».

Приобретя некоторый производственно-технический опыт, Осборн решил прослушать курс математики. Поэтому решает поступить в Кембридж. Уже в то время университет в Кембридже имел богатую историю. Это был один из старейших университетов мира и один из крупных в Соединенном Королевстве. Его репутация основывалась на научных достижениях, широко известных в мире, отражала интеллектуальный уровень профессуры, студенчества. Университетская карьера его была в высшей степени успешной. Он окончил Кембридж в 1867 году, тот же класс, что и Релей годом раньше. Это был год, когда первым изданием вышел труд Клаузиуса «Механическая теория теплоты». Сразу же Осборна избрали претендентом на стипендию в королевском колледже, но он прежде решил год поработать штатным инженером в конторе м-ра Джона Лаусона в Лондоне.

В 1868 году (20 лет) он был приглашен в Оуэнс колледж, а затем избран заведующим кафедрой техники — этот колледж превратился позже в университет Виктории в Манчестере. Он признавался: «С малых лет я обнаружил любовь к механике и интерес к законам физики, на которых основана механика. В детстве я постоянно руководствовался примером отца, любовью к механике и понимал, что нет другого средства как математика в ее приложении к физике для того, чтобы хорошо понимать механику». Он оставался профессором механики в Манчестерском университете 37 лет до 1905 года. Он был женат на Анне-Шарлотте, которая была моложе его на 17 лет. Подробных сведений о его семейной жизни не сохранилось.

С начала деятельности в Манчестерском университете Рейнольдс начал серию оригинальных исследований, которые проводил в течение следующих 35 лет. Ранние работы его связаны с магнетизмом и электричеством. Он изучал электромагнитные свойства Солнца и комет, приливные течения в реках. Постепенно в своих интересах он концентрируется на задачах гидродинамики. Они покрывают феноменально широкий круг физических проблем и технических приложений и лежат в основе большинства работ по турбулентным потокам, моделированию гидравлики, гидродинамическим уравнениям, трению, теплоотдаче и многим другим областям науки.

Рейнольдс был прекрасным экспериментатором и одновременно отличным математиком. Его эксперименты по турбулентности, моделированию, определению механического эквивалента тепла остаются классическими. Им предложены дифференциальные уравнения для осредненного течения вязкой жидкости, учитывающие дополнительные (турбулентные) напряжения (уравнения Рейнольдса).

Часто упоминаются в работах по гидромеханике и теплоотдаче такие термины, как число Рейнольдса, уравнение Рейнольдса, напряжение Рейнольдса, аналогия Рейнольдса.

Наиболее известные исследования Рейнольдса:

1) экспериментальное исследование перехода ламинарного течения в турбулентное;

2) закон сопротивления в параллельных каналах.

Оригинальный эксперимент Рейнольдса, который он провел в Манчестерском университете — один из ключевых в гидромеханике для студентов. Этот эксперимент стал настолько классическим, что описание его входит во все школьные и вузовские учебники физики. В Манчестерском университете сохраняется все оборудование этой экспериментальной установки. Теперь это важный объект демонстрации для посетителей и туристов Манчестерского университета.

Кафедра техники в Оуэн колледже была создана для того, чтобы выпускаемые инженеры и бизнесмены получили хорошее воспитание и образование в науке и технике. Во вступительной лекции Рейнольдс (1868 год) под названием «Прогресс техники в связи с социальными условиями в стране» были такие слова: «...Результаты усилий труда и изобретений настоящего столетия заключаются не только в сети железных дорог, современных мостов, громадных орудий или в непрерывных коммуникациях. Мы должны сравнивать социальное состояние населения в стране с тем, что было прежде. Изменения очевидны. Население возросло вдвое по сравнению с концом предыдущего столетия: народ живет в лучших домах и с большим комфортом... и даже в роскоши, улучшается здоровье. ...Но эти преимущества имеют и обратную сторону. Во многих случаях различные области техники приводят к неизлечимым болезням». Далее Рейнольдс говорит о том, что надо сделать.

В ноябре 1869 года Рейнольдс становится членом Литературного и Философского общества, президентом которого в то время был выдающийся ученый Джеймс Прескотт Джоуль, человек, от которого Рейнольдс заслужил большую похвалу после представления Рейнольдсом (1870) доклада «О стабильности (устойчивости) шара в струе воды». Это была скорее чисто академическая задача.

Между 1871 и 1874 годами Рейнольдс в этом обществе выступил с серией важных результатов для практической техники:

- об упругости и хрупкости материалов;
- использование пара высокого давления;
- некоторые свойства сталей как конструкционных материалов.

А также опубликовал статьи общего плана: о будущем прогрессе; инженере, как профессии и успехах механики.

После 1873 года Рейнольдс в основном занимался только гидродинамикой и стал в этой области признанным мировым авторитетом. В 1886 году он сформулировал теорию смазки, три года спустя построил теоретическую модель турбулентного потока, что позволило создать математический подход к изучению турбулентности. Его исследования конденсации и теплообмена между твердыми телами и жидкостями привели к радикальной перестройке конструкций паровых котлов и конденсаторов, а работы в области турбонасосов привели к их быстрому распространению.

Большое значение имели работы Рейнольдса по гидродинамической стабильности, опубликованные в 1883 – 1895 годах. В 1883 году появилась ра-

бота «Экспериментальные исследования условий, которые определяют, будет ли движение воды в параллельных каналах постоянным или колебательным, и о законе сопротивления в параллельных каналах». Именно в этой работе было впервые использовано при моделировании течения жидкости число, которое носит теперь его имя — число Рейнольдса.

В 1877 году Рейнольдс становится членом Королевского общества и 11 лет спустя награждается его медалью. В 1884 году ему присуждается почетная степень доктора университета Глазго. Осборн Рейнольдс был одним из наиболее оригинальных и независимых людей своего времени и имел свой взгляд на характер применения новых дисциплин. Он организовал трехгодичный курс лекций, в котором излагались основы гражданской техники и механики.

Важны не только исследования Рейнольдса, но также и тот курс прикладной математики, который он читал в Манчестерском университете. Рейнольдс был ученым высокого класса. Инженерное (техническое) образование было новостью в английских университетах того времени, и Рейнольдс определил его идеи и формы. Он полагал, что все студенты, независимо от их специальности, должны иметь фундаментальное образование, основанное на математике, физике и, в частности, на классической механике. Но, несмотря на его большой интерес к образованию, он не был хорошим лектором. За его лекцией было трудно следить, он часто отклонялся от темы или его мысли теряли связь с ней.

Ламб, который хорошо знал Рейнольдса как человека и как специалиста-гидромеханика, писал: «Характер Рейнольдса был подобен его почерку, который был весьма индивидуален. Он сознавал ценность своих трудов, но не был удовлетворен мнением научного сообщества. Сам он не любил рекламы и на чрезмерные претензии в работах других только вежливо улыбался. К своим ученикам он был более великодушен». Рейнольдс обладал «странными манерами и пренеприятной привычкой видеть за всеми действиями других исключительно корыстные мотивы».

Странное поведение Рейнольдса отчасти вызывалось болезнью, которая ухудшилась с 1900 года и с годами прогрессировала. В последние годы это было ухудшение не только физическое, но и умственное. Он с трудом подбирал слова, не мог контролировать своих высказываний, произносил слова, по смыслу обратные тому, что он хотел в них вложить. Эта болезнь – афазия (полная или частичная утрата способности к устной речи), связанная с поражениями головного мозга, заставила его уйти на пенсию в 1905 году и позже привела к смерти.

Краткий обзор некоторых публикаций Рейнольдса

I. Перечень статей по общей физике

- О материи Солнца и комет.
- О солнечной короне.
- О действии Солнца на электрические свойства облаков.
- О возгорании дерева и других объектов при ударе молнии (здесь идет речь о взрывном эффекте и быстром испарении влаги и превращении ее в пар).
- О поглощении звука туманом за счет присутствия в нем капель.
- О рефракции звука в атмосфере за счет разной скорости ветра и температуры по высоте.
- О действии дождя на успокоение моря.
- О влиянии нефти на разрушение волн на поверхности моря.

II. Статьи о движении жидкости и турбулентности (1872 – 1894)

Без сомнения наиболее известные статьи О. Рейнольдса касаются движения жидкости и вопросов турбулентности, которые находятся в 1 и 2 томах собрания его трудов. Тематика их охватывает: движение групп волн, движение вихрей, ламинарное и турбулентное движение в трубах, динамическая теория потоков жидкости, гидродинамические уплотнения.

Движение групп волн. Первая статья (1877) касается движения в глубине воды групп волн, рассеивающихся на поверхности, и скорости передачи энергии от них. В ней Рейнольдс показал, что скорость группы волн в 2 раза меньше, чем одной волны. Это было известно ранее, но он установил, что скорость группы волн равна скорости переноса энергии.

Движение вихрей. Рейнольдс описал метод получения изображения вихрей внутри жидкости путем использования краски, техника которого была использована им в экспериментах по исследованию перехода ламинарного течения в турбулентное. Это позволило ему наблюдать движение вихрей, вихревых линий за волной, вихрей за наклонным диском, кольцевых вихрей, образующихся при движении капель другой жидкости внутри воды и при всплывании их.

Ламинарное и турбулентное движение в трубах. В 1883 году Рейнольдс публикует знаменитую статью под названием: «Экспериментальное исследование обстоятельств, которые определяют, будет ли движение воды прямолинейным или синусоидальным и закон сопротивления в параллельных каналах». Эта статья, опубликованная в Phil. Trans. of the Royal Society стала классической в науке о движении жидкости и оказала важное влияние на разработку гидромеханики в самом широком смысле. Она содержала также безразмерный комплекс, позже названный числом Рейнольдса.

Он обнаружил, что тенденция к образованию вихревого движения становится более значительной по мере повышения температуры жидкости. Он понимал, что это связано с уменьшением вязкости при увеличении тем-

пературы жидкости, и, более того, что такое свойство как кинематическая вязкость оказывает такое же влияние, как и скорость.

Классическим опытом, который обессмертил его имя в науке, является опыт по определению условий, определяющих режим течения жидкостей (1876 - 1883). В результате этих опытов был установлен критерий перехода ламинарного течения в турбулентное (критическое число Рейнольдса).

У Рейнольдса были предшественники. В 1839 году немецкий ученый Хаген провел весьма тщательные измерения течения воды в трубах малого диаметра, используя температуру воды в качестве параметра (вместо вязкости). Несколько лет спустя французский физик Пуазейль независимо от Хагена повторил эти эксперименты, моделируя течение крови с водой, маслом и ртутью. В 1854 году в своей статье Хаген отметил, что течение не всегда было ламинарным и частички суспензий в воде двигались не по прямым линиям, а очень нерегулярно. Однако только Рейнольдс догадался использовать вязкость в качестве параметра.

Он рассмотрел уравнение движения и установил, что силы на единицу массы бывают двух типов, индивидуальные и вязкостные, и отношение этих сил определяется безразмерным комплексом DU_m / ν, в котором U_m – средняя скорость потока, D - диаметр трубы, ν - кинематическая вязкость. В своей статье он писал: «Это определенное соотношение, точный вид которого я нашел. Без интегрирования уравнений можно установить, что только от величины данного соотношения зависит характер движения. Однако, чтобы быть точным, укажем, если образование вихрей происходит по одной причине, то интегрирование покажет, что образование вихрей происходит только при определенной величине комплекса DU_m / ν».

История эксперимента с использованием краски в стеклянной трубе хорошо известна. Эксперименты были сделаны в 1880 году. Для определения критической скорости, при которой начинается образование вихрей, Рейнольдс использовал три трубы разного диаметра и, используя разную температуру, нашел, что $Re_{кр} \approx 13000$ в каждом случае. Эти опыты были сделаны при плавном входе и спокойном (без вихрей!) состоянии жидкости, поступающей из бака. Затем он исследовал обратный переход (турбулентный $\rightarrow$ ламинарный) на двух разных трубах и одновременно измерял перепад давления на трубе длиной 1,5 м. Было найдено, что $Re_{кр} \approx 2000$.

Интересно отметить, что благодаря использованию гладкого входа в его оригинальном эксперименте критическое число Рейнольдса оказалось в диапазоне от 11800 до 14300. Теперь это считается верхним значением. Позднее Рейнольдс показал, что, если вход жидкости в трубу обеспечивает возмущения, то критическое число Re оказывается равным 2000 (нижнее критическое число Рейнольдса).

В своей короткой статье «О двух способах движения жидкости» (1883) Рейнольдс сравнивал характеристики течения в сужающихся и расширяющихся каналах, а также условия для возникновения стационарного течения и перехода его к турбулентному и нестационарному.

Визуализация внутренних движений в жидкости. В 1898 году Рейнольдс уже имеет заслуженную репутацию и авторитет в Королевском институте. Он публикует статью «Изучение движений жидкости посредством окрашенных струй». В ней он демонстрирует многие примеры из своих прежних работ, а также показывает, как образуются вихревые кольца в воздухе с помощью красок и дыма. Все это выглядит очень изящно и наглядно при демонстрациях на лекции. Для демонстрации малейших движений воздуха в помещении он использовал воздушные шары, а иногда и мыльные пузыри. «Теперь я прошу вас взглянуть на эти шары. Они вам достаточно хорошо известны, и они более чувствительны, чем анемометры, более чувствительны, чем любые другие приборы: но даже они не обнаруживают какого-либо движения; каждый из них связан с поведением состояния воздуха. Когда я посылаю воздушную метку к ним, то малое, но энергичное движение обнаруживается при каждой посылке, и то же самое происходит, когда метка проходит через них периодически. Другим методом этого заметить невозможно».

Динамическая теория течения жидкости. Прошло 11 лет, прежде чем произошел прорыв в понимании турбулентных течений, обнаруженных лордом Релеем. Статья Рейнольдса «О динамической теории несжимаемых вязких жидкостей и критериях, ее определяющих», была опубликована в юбилейном сотом томе трудов Королевского общества (Royal Society) и оказала большое влияние на дальнейшее развитие гидромеханики. В ней он пишет: «...необходим наиболее общий подход к нахождению законов сопротивления при движении жидкости, универсальных законов диссипации энергии с учетом второго закона термодинамики».

Это было кульминацией 25-летних исследований, что и привело Рейнольдса к заключению о необходимости более строгого и точного подхода к определению представлений, на которых основываются различия между молекулярным движением и переносом тепла в кинетической теории. Применение того же метода возможно для определения различий между осредненным и относительным движением частиц при рассмотрении осредненного (среднего) турбулентного движения вдоль трубы. Это было для Рейнольдса возвратом к его прежним исследованиям по кинетической теории газов.

Он начинал эти работы с рассмотрения общих уравнений Навье-Стокса, которые описывают движения жидкости. Сравнивая теоретические решения уравнений с надежными экспериментальными результатами, опубликованными в 1857 году Стоксом, он доказал, что предположения, сделанные при выводе уравнений, правильны. Это было сделано на основании измерений сопротивлений медленно движущихся тел малого размера и сопротивлений течения жидкости при малых скоростях в длинных трубах малого размера. Однако обнаружились противоречия для случаев движения тел больших размеров, течений при высоких скоростях и течений жидкости через большие трубы с высокими скоростями. Он обратил внимание на тот факт, что Стокс понимал — это расхождение есть результат присут-

ствия вихрей, которые не учитываются в теоретических решениях. Рейнольдс обсуждал это в 1883 году с использованием числа Re, величина которого отражает факт: будет ли течение ламинарным или турбулентным, и установил нижний предел, выше которого и происходит переход ламинарного течения в турбулентное.

Выражаясь современным научным языком, Рейнольдс далее пишет о компонентах скорости в турбулентном течении в терминах средней и флюктуационной (пульсационной) составляющих и предлагает метод осреднения уравнений движения. Он показал, что эти уравнения содержат добавочные члены, которые должны отражать дополнительные напряжения за счет турбулентности. Затем он разделяет уравнения для кинетической энергии среднего движения и отдельно турбулентного (пульсационного) движения и замечает, что они содержат члены для энергии производства турбулентности, которые выражают обмен энергией между средним движением и кинетической энергией турбулентности.

Чтобы объяснить наблюдаемый переход ламинарного течения в турбулентное в каналах, Рейнольдс рассматривает случай, когда турбулентная энергия должна поддерживаться. Используя уравнение для турбулентной энергии и рассматривая контрольный объем, для которого производство и диссипация турбулентной энергии одинаковы, он приходит к условию для $Re_{кр}$. Им рассмотрен частный случай для течения между параллельными пластинами при заданном градиенте давления. В этом случае $Re_{кр}$ =1035, если использовать среднюю скорость и гидравлический диаметр (двойное расстояние между пластинами).

Историческая статья Рейнольдса содержит современные основы моделирования турбулентности. Концепция турбулентных напряжений, роль производства турбулентности и обмен энергией между средним движением и пульсациями и диссипация турбулентности — все это остается и сейчас центральными проблемами турбулентности.

В сущности, он предвосхитил идею о каскадном переносе энергии в турбулентных потоках. Его уравнения для кинетической энергии среднего движения и турбулентной энергии с небольшими изменениями и сегодня используются в расчетах. Столетием позднее основные идеи статьи Рейнольдса используются в расчетах турбулентных потоков и многих задачах техники.

III. Инженерные приложения гидродинамики и гидравлики в статьях 1872 – 1894 годов

Осборн Рейнольдс проявил интерес к проблемам, связанным с динамикой кораблей, в частности, к винтам, приводимым в движение паром. Многие работы были заказаны специальным комитетом Британской Ассоциации Перспективных Наук (British Association for the Advancement of Science), в котором принимали участие Кельвин, Фруд, Рэлей и для которого Рейнольдс представил серию важных обстоятельных отчетов.

Его внимание позже обратилось к теории волн, течений в реках, эстуариях и прибрежных потоках и моделированию течений в них.

Тематика его работ охватывала:

- механику винта;
- течения в многоступенчатых гидравлических машинах;
- насосы, турбины.

Рейнольдс смоделировал течение реки Мэрсей и влияние приливов океана в области между Ливерпульским каналом и точкой на некотором расстоянии от Ранкорна. Горизонтальный масштаб 1/31800, а вертикальный 1/960, то есть, соотношение масштабов примерно 33:1. Рейнольдс установил правило, что если горизонтальный масштаб 1/x, а вертикальный 1/y, то масштаб скорости должен быть $1/\sqrt{y}$ и временной масштаб периода приливов $\sqrt{y/x}$. Это открыло возможность моделирования течений в реках и эстуариях.

Кавитация. В 1894 году Рейнольдс представил короткий доклад на собрании Британской Ассоциации в Оксфорде «Эксперименты, связанные с кипением воды в открытой трубе при обычной температуре». Хотя Рейнольдс нигде не упомянул термин «кавитация», но ясно, что он отчетливо понимал физические явления в этом процессе.

IV. Статьи по теплоотдаче и теплоэнергетике (1873 - 1897)

Эта область деятельности особенно интересна в разрезе карьеры О. Рейнольдса. Без сомнения, присутствие в Манчестере знаменитого ученого Джоуля оказало на него большое влияние. То же можно сказать о Рэнкине, на которого часты ссылки в текстах Рейнольдса. Ранняя работа Рейнольдса о влиянии наличия воздуха на скорость конденсации водяного пара положила начало серии исследований парогенераторов и паровых машин.

В статье 1873 года Рейнольдс описывает опыт по конденсации чистого водяного пара на поверхности медной трубы, внутри которой протекала охлаждающая вода. Он заметил, что мощность, отводимая водой, снижается при наличии в паре даже небольших количеств воздуха.

Аналогия между передачей тепла и количества движения. В 1874 году (за 9 лет перед публикацией его знаменитой статьи о ламинарном и турбулентном течениях) Рейнольдс представил короткую и предвосхищающую статью «О существующих и усовершенствованных поверхностях нагрева в парогенераторах», в которой установил, что тепло от поверхности нагрева отводится не только молекулярными процессами, но также турбулентными вихрями, присутствующими в потоке, которые, в свою очередь, перемешивают нагретую жидкость с холодной. Он доказал и продемонстрировал экспериментально, что если горячий газ течет с достаточно высокой скоростью через трубу, температура которой постоянна, температура газа на выходе из конца трубы будет нечувствительна к увеличению скорости. Этот эффект он отнес к тому факту, что при таких условиях сопротивление потоку примерно пропорционально квадрату

скорости, откуда он вывел заключение об аналогии между теплопереносом и трением. Прошло полстолетия с тех пор, пока эта основополагающая идея овладела умами ученых и получила дальнейшее развитие в трудах Тейлора, Прандтля, Кармана.

Среди других работ необходимо отметить объяснение принципа действия радиометра. О. Рейнольдс предложил правильное объяснение действию радиометра — эффекту, открытому в 1873 г. английским химиком В. Круксом, построившем крутильные весы в вакууме, которые реагировали на потоки тепла излучением. Хотя его громоздкая теория этого эффекта не позволяла правильно вычислить усилия, но идея была правильной. Точная теория была построена позже Дж. Максвеллом.

Другие работы Рейнольдса:

- В статье «Об общей теории термодинамики», речь идет о превращении тепла в работу (1883).
- Статья «Термодинамика газового потока» (1885) рассматривает скорость вытекания газа из одного сосуда в другой, предполагая, что давление P_0 в первом сосуде остается постоянным, а во втором постепенно снижается (P_1), при $P_1/P_0 \sim 0{,}5$ достигается критическое течение, так как в узком сечении трубы (диафрагмы) достигается скорость звука.
- «Паровая машина тройного расширения» описана в статье 1889 года.
- В результате работы по определению механического эквивалента тепла Рейнольдс создал крупномасштабную аппаратуру, позволяющую более точно определить механический эквивалент тепла. Эта аппаратура позволяла также определять количество тепла, которое необходимо затратить для нагревания известной массы воды от точки замерзания до точки кипения. Достигалось это путем использования тормоза, который за счет внутреннего трения в воде при 0°С доводил ее до точки кипения. Это классическое исследование было представлено Королевскому обществу в мае 1897 года.

Отдавая дань Джоулю, Рейнольдс в 1892 году опубликовал статью «Памяти Джеймса Прескотта Джоуля». Видимо, эта статья и натолкнула О. Рейнольдса на более точное определение механического эквивалента тепла.

Менее известны другие работы Рейнольдса: о пластичности и хрупкости материалов, о свойствах сталей, о концентрации напряжений, о трении, скольжении, вибрациях, о разрушении материалов при переменных нагрузках.

Много статей Рейнольдса было опубликовано в журнале «The Engineer».

За 37 лет пребывания Рейнольдса в Оуэнс Колледж в научном мире произошли большие изменения, а также и в самом «джентльмене-ученом», как характеризовал его Джоуль, имея в виду его университетское воспитание и способности к руководству другими выдающимися учеными, такими как Резерфорд, который работал в Манчестере в 1907 году и другими. Широкий кругозор Рейнольдса во многих областях физики не может не удивлять нас. В 1903 году на склоне лет он публикует довольно амбициоз-

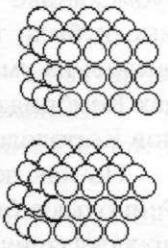
ную статью «О субмеханике Вселенной», в которой он использовал свои идеи по механической теории эфира.

V. Статьи по физике газов, жидкостей и гранулированных материалов

Изучая процессы в газах, О. Рейнольдс рассматривал силы, развивающиеся при испарении или конденсации жидкости на поверхности (опыты показали, что при испарении поверхность отталкивается, при конденсации притягивается; объяснение этому эффекту было дано на основе кинетической теории газов). Им обсуждались принципиальные вопросы о силах, действующих на нагретую поверхность, помещенную в полость с разреженным газом. В 1879 году Рейнольдс, по-видимому, первый провел опыты по термодиффузии через пористую пластинку в зависимости от давления.

Статья «О внутреннем сцеплении в воде и ртути» (1877) затрагивает фундаментальные свойства жидкого состояния.

Обсуждая свойства гранулированных материалов, Рейнольдс рассматривает удлинение (расширение) сложных сред, состоящих из твердых частиц между которыми находится жидкость. Эта статья была опубликована в 1885 году в Philosofical Magazine и вызвала большой интерес. Другая версия была опубликована в Nature. Рассматривались два разных расположения сфер в кубической и плотной упаковках. Было найдено объяснение общеизвестному факту: когда вы наступаете на мокрый песок на берегу моря, то у подошвы песок становится сухим, но когда вы поднимаете ногу, это место становится вновь влажным. Давление ноги (ступни) увеличивает объем между частицами песка внизу его и вода уходит в этот добавочный объем.



Геометрически ясно, что набор сфер, расположенных в кубической упаковке, занимает объем в $\sqrt{2}$ раз больше, чем те же сферы в плотной упаковке. Именно иллюстрацию эффекта сжатия и расширения можно видеть вокруг следов на мокром песке. При давлении мокрый песок осушается, но, когда ступня отнимается от песка, то след заполняется водой. Это происходит благодаря изменению структуры пор, приводящих к переносу воды в режимах сжатия и осушения окружающей области.

К этим опытам Рейнольдс возвращается еще много раз с совершенно другой точки зрения, когда он упоминает, что, возможно, здесь есть связь с гравитацией. В феврале 1902 года он об этом напишет в статье, представленной Королевскому обществу, под названием «О субмеханике Вселенной».

Профессор О. Рейнольдс был силен в прикладных, инженерных науках, но его познания в теоретической физике современники считали наивными по сравнению с теми, которыми обладали, например, Дж. К. Максвелл и др.

Будучи по складу ума инженером, Рейнольдс одно время занялся теорией Вселенной, пытался построить теорию гравитации. Это его стремление нашло отражение в портрете кисти Джона Коллиера, где он изображен с чашкой в руках, заполненной шарами (1904).

Рассматривая последнюю работу Рейнольдса, надо вспомнить ее в контексте науки Викторианской эпохи. Все это имеет отношение к объяснению распространения света. Если свет имеет волновую природу, то, казалось, что совершенно необходимо иметь какую-либо среду (эфир), через которую он проходит. Гравитация должна быть также свойством эфира. В Максвелловской теории электромагнитных волн необходимо было постулировать такую среду, и родилась концепция «действия на расстоянии».

В дальнейшем идея переноса фотонов, как маленьких порций энергии, нашла удовлетворительное объяснение в том, как переносится свет. Однако Рейнольдс (подобно многим другим ученым Викторианской эпохи) считал необходимым обозначить среду, через которую могли бы переноситься свет и гравитация.

Основная статья Рейнольдса («Magnus opus») по этому поводу была представлена к публикации в 1902 году в конце его научной деятельности. Отношение членов Королевского общества к его статье под названием «О субмеханике Вселенной» было явно критическим и было мнение, что эти мысли были началом его умственного угасания, что по-русски называют «выжил из ума». В конце концов, статья все-таки была опубликована в трудах Кембриджского университета, копии были распространены среди членов Королевского общества и в «Philosophical Transactions».

Но как понять то обстоятельство или казус, если действительно мысли Рейнольдса были абсурдны, то почему современные взгляды согласуются с предсказаниями Рейнольдса. Он предположил, что природа состоит из частиц среды, находящихся под давлением $1{,}172 \cdot 10^{8}$ бар. Диаметр гранул (частиц среды) $5{,}534 \cdot 10^{-20}$ м, и они имеют среднюю относительную скорость 0,677 м/с. Вычисленная средняя величина свободного пробега $8{,}612 \cdot 10^{-26}$ м. Рейнольдс постулировал, что материя в основном (как мы теперь уже знаем) просто зазор между этими гранулами-частицами. На основе таких представлений о среде он объяснял гравитацию и перенос света. Этот вопрос занимал его несколько десятилетий перед публикацией статьи.

Профессор Г. Ширес (G. Shires) указывает, что «размер гранул», постулированный Рейнольдсом имеет такой же порядок, что и «струны» в свете современной теории струн. Может быть, настанет время, и физики-теоретики вернутся к этой статье?

Фундаментальное значение в современной теории струн (этих, как предполагают сейчас, мельчайших элементов материи) имеет то обстоятельство, что на достаточном расстоянии от струны ее колебания воспринимаются

как частицы. Пока мы не рассматриваем струну вблизи, эти частицы выглядят как кванты известных полей, включая гравитационные и электромагнитные. Масса этих частиц возрастает по мере увеличения частоты породивших их колебаний, причем все частицы, кроме нескольких, имеют огромную массу (в 10^{19} раз более массы протона!).

Осборн Рейнольдс умер 21 февраля 1912 года в возрасте 69 лет. Он похоронен на кладбище Уотчет в Сомерсете вместе с женой и двумя внуками, которые родились уже после его смерти и погибли во время Второй мировой войны. На могиле есть плита с надписью, которая в переводе выглядит так:

Светлой памяти
Осборна Рейнольдса (23.08.1842 – 21.02.1912)
его жены Анны Шарлотты (11.12.1859 – 27.05.1942)
Осборна Рейнольдса убитого во Франции (29.04.1917 – 27.05.1940)
Ричарда Генри Рейнольдса умершего от ран в Италии (16.06.1920 – 2.04.1944)

Современные толкования числа Рейнольдса и некоторых его теорий

Число Рейнольдса – число подобия, характеризующее переход от ламинарного течения к турбулентному:

$$\mathrm{Re} = \frac{\bar{w}\ell\rho}{\mu} = \frac{\bar{w}\ell}{\nu},$$

где $\bar{w}$ - средняя скорость; ρ - плотность; μ - вязкость; ℓ - характерная длина (для круглой трубы $\ell = d$); $\nu = \mu/\rho$ - кинематическая вязкость.

Число Рейнольдса можно представить как меру отношения сил инерции (ρw^2) к силам вязкостного трения ($\mu w/\ell$).

Альтернативное толкование числа Re дано Лайтхиллом (1970) – отношение производства турбулентной энергии в единице объема ($\rho w^3/\ell$) к скорости вязкостной диссипации ($\mu w^2/\ell^2$).

При $\mathrm{Re}<\mathrm{Re}_{кр}$ – течение ламинарное, при $\mathrm{Re}>\mathrm{Re}_{кр}$ – течение турбулентное. $\mathrm{Re}_{кр}$ сильно зависит от условий на входе. Сам Рейнольдс получал для воды значения $\mathrm{Re}_{кр}$=11800÷14300 из-за условий плавного входа. Низшее значения $\mathrm{Re}_{кр}$ для труб принято около 2000.

Интересное толкование числа Рейнольдса было дано Карманом. Согласно кинетической теории $\nu \sim cL$, где c – средняя скорость молекул, L – длина свободного пробега. В таком случае с точностью до постоянного множителя $\mathrm{Re} = \frac{\bar{w}}{c}\cdot\frac{\ell}{L}$; в обычных задачах гидродинамики $\frac{\ell}{L}$ – велико, а $\frac{\bar{w}}{c}$ – мало. Если это условие не соблюдается, то характер течения будет зависеть не только от Re, но и отдельно от $\frac{\bar{w}}{c}$ и $\frac{\ell}{L}$. Если $\frac{\bar{w}}{c}$ не мало как обычно, то

приходится учитывать сжимаемость газа. Заметим, что $\frac{\overline{w}}{c}$ с точностью до постоянного множителя равно числу Маха $M = w / a$, где $a = \sqrt{gkRT}$ – скорость звука, $c = 1{,}4\sqrt{RT}$.

Осреднение Рейнольдса – в турбулентном потоке мгновенные (действительные или актуальные) скорости в каждой точке изменяются во времени и по направлению. Изменения мгновенных скоростей в турбулентном потоке подчиняются статистическим закономерностям, которые в общем случае пока не установлены до сих пор. Для того, чтобы задачу сделать разрешимой по предложению Рейнольдса мгновенную скорость записывают в виде суммы средней скорости и ее пульсации:

$$w_x = \overline{w}_x + w'_x \qquad (а)$$

и аналогично для w_y, w_z.

Простейшее уравнение движения в пренебрежении силой тяжести имеет вид:

$$\rho \frac{Dw}{d\tau} = -\frac{dp}{dx} + \mu \nabla^2 w \qquad (б)$$

после подстановки (а) в последнее выражение и после ряда преобразований, получим

$$\rho \frac{D\overline{w}}{d\tau} = -\frac{d\overline{p}}{dx} + \mu \nabla^2 \overline{w} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}\left(-\rho \overline{w'^2_x}\right)}_{(1)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y}\left(-\rho \overline{w'_x w'_y}\right)}_{(2)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z}\left(-\rho \overline{w'_x w'_z}\right)}_{(3)}$$

Последние три числа отражают: турбулентные нормальные напряжения (1); турбулентные касательные напряжения (2, 3). Если представить турбулентные напряжения в виде, аналогичном закону Ньютона для молекулярных касательных напряжений вязкости $\tau_м = \mu \frac{dw_x}{dy}$, как $\tau_т = \left(-\rho \overline{w'_x w'_y}\right) = \mu_т \frac{dw_x}{dy}$, то полное касательное напряжение можно представить в виде суммы $\tau = \tau_м + \tau_т = (\mu + \mu_т)\frac{dw_x}{dy}$, где все неизвестные характеристики пульсационного движения отражаются $\mu_т$ – турбулентной вязкостью.

Аналогия Рейнольдса (тройная аналогия) – аналогия между переносом тепла, массы и количества движения.

В турбулентном течении в трубе или вдоль плоской пластины обмен количеством движения, теплом или массой в потоке осуществляется в основном турбулентными вихрями. Однако вблизи поверхности этот обмен происходит за счет молекулярных процессов в пограничном слое. Если $Pr = Sc \approx 1$ толщины пограничных слоев (гидродинамического, теплового, концентрационного) примерно равны.

В общем случае имеем:

$$Nu = \frac{\xi}{8} Re\,Pr; \quad Sh \equiv Nu_D = \frac{\xi}{8} Re\,Sc \text{ или } \frac{\xi}{8} = \frac{\alpha}{w\rho c_p} = \frac{\beta}{w},$$

где $Nu = \alpha\ell/\lambda$; $Re = w\ell/\nu$; $Pr = \nu/a$; $Sh = \beta\ell/D$; $Sc = \nu/D$; ξ – коэффициент сопротивления, α, β – коэффициенты теплообмена, массообмена.

Основываясь на аналогии, существующей между явлениями теплообмена и массообмена, оказывается возможным перенести закономерности одного физического явления (теплообмен) на другое (массообмен) и обратно:

$$Nu = f(Re, Pr) \rightarrow Nu_D \equiv Sh = f(Re, Sc).$$

Рейнольдс [1] предположил, что в турбулентном потоке количество движения и тепло переносятся одинаковым образом. Если течение параллельно оси x, а перенос тепла происходит в направлении положительных y, то это утверждение требует, чтобы пульсации скорости параллельные осредненному течению (w'_x) были пропорциональны пульсациям температуры (T'), и аналитически выражается уравнением:

$$\frac{\overline{(w'_y T')}}{(\overline{w} - w_1)(\overline{T} - T_1)} = \frac{\overline{(w'_x w'_y)}}{(\overline{w} - w_1)^2},$$

где $\overline{w}, \overline{T}$ – осредненные скорость и температура; w_1, T_1 – скорость и температура в некоторой плоскости отсчета; w'_x, w'_y – пульсации скорости по осям x и y; T' – пульсации температуры.

Отсюда следует, что тепловой поток через площадку, нормальную к оси y, равен

$$q = \rho c\overline{(w'_y T')}$$

и связан с касательным напряжением $\tau = -\rho(w'_x w'_y)$ таким образом, что

$$\frac{q}{\rho c(\overline{w} - w_1)(\overline{T} - T_1)} \approx \frac{\tau}{\rho(\overline{w} - w_1)^2}.$$

Отсюда при y = 0, где $w_1 = 0$, $\tau = \tau_0 = \frac{\xi}{8}\rho\overline{w}^2$ получаем

$$\frac{q}{\rho c_p \overline{w}\left(T_1 - \overline{T}\right)} \approx \frac{\alpha}{\rho c_p \overline{w}} \neq \frac{\tau_0}{\rho \overline{w}^2} = \frac{\xi}{8}.$$

Следовательно

$$\frac{\alpha}{\rho c_p \overline{w}} = \frac{\xi}{8}.$$

Теория Рейнольдса справедлива только при Pr=1, когда имеется область в которой вязкие напряжения и молекулярная теплопроводность сравнимы с напряжениями Рейнольдса и теплопереносом в турбулентном потоке. Дальнейшее развитие этой Теории осуществлялось за рубежом Тейлором, Прандтлем, Карманом, Лайоном, а в России — Б.С. Петуховым, С.С. Кутателадзе и другими.

Основные публикации О. Рейнольдса

1. Reynolds O. The progress of engineering considered with respect to the social conditions of this country. Cambridge, Macmillan, 1868.
2. Reynolds O. Papers on mechanical and physical subjects. Collected Works, v.1 (1870-1880), 1900; v.2 (1881-1900), 1901.
3. Reynolds O. Papers on mechanical and physical subjects – the sub-mechanics of the Universe. Collected Works, V.3. 1903.
4. Reynolds O. On the two manners of motion of water. Proc. of the Royal Inst. of Great Britain. 1884. Перепечатку этой работы см. в Intern. Jour. Heat and Mass Transfer. V.12, №2, pp.129-136. 1969.
5. Полный перечень трудов О. Рейнольдса см. ниже в статье J.D. Jackson (1995).

Основные публикации об О. Рейнольдсе

1. Gibson A.H. Osborn Reynolds and his work in hydraulics and hydrodynamics. Publ, Longmans Green, 1946.
2. Allen J. The life and work of Osborn Reynolds. In Coll. Papers «O. Reynolds and engineering science today» (Ed. D.M. McDowell, J.D. Jackson). Manchester University Press, 1969.
3. Rosenberg B.L. Osborn Reynolds' Sub mechanics of the Universe: A bridge between Classical and Modern Physics. Join Anglo-American Conf. on the History of Science, Manchester. 11-14 July, 1988.
4. Jackson J.D. Osborn Reynolds: scientist, engineer and pioneer. Proc. of the Royal Soc. Lond., A, v.451, pp.49-86, 1995. (В этой работе имеется полный список трудов О. Рейнольдса).

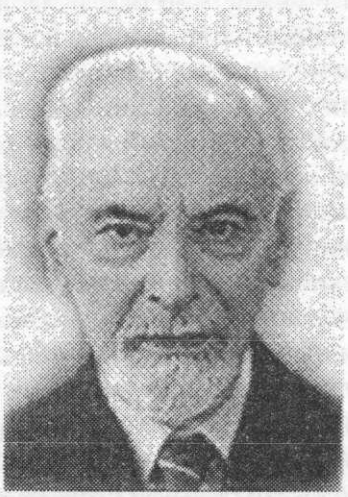
Даты биографии

23.08.1842	Родился в Белфасте, Ирландия.
1861	Работает учеником в технической фирме Эдварда Хейса.
1867	Окончил королевский колледж в Кембридже.
1867 - 1868	Работает инженером в фирме Джона Лоусона.
1868	Получает должность профессора техники в Оуэнс колледже, Манчестер (позже Манчестерский университет). Вступительная лекция: «Прогресс техники в связи с социальными условиями в стране».
1869, ноябрь	Становится членом Манчестерского литературного и философского общества.
1873	Статья о конденсации пара в смеси с воздухом.
1874	Статьи: - о кинетической теории газов; - об аналогии между переносом тепла и количества движения.
1876 - 1883	Работы по режимам течения жидкости в трубе.
1877	Избрание членом Королевского общества.
1879	Первые в мире опыты по термодиффузии.
1880	Присуждена степень магистра искусств Кембриджского университета.
1881 - 82	Публикации о пределах скорости в «The Engineer».
1882	Избрание почетным членом Королевского общества в Кембридже.
1883	Избрание членом института гражданских инженеров. Устанавливает закон сопротивления в параллельных каналах. Публикация об уравнениях движения всякой жидкости и граничных условиях. Публикация о двух способах движения жидкости в Proc. Roy. Inst.
1884	Присуждение степени почетного доктора университета Глазго. Публикация « Эксперименты, связанные с кипением воды в открытой трубе при обычной температуре» (о кавитации).
1885	Статья о свойствах гранулированных материалов. Награждение премией Тельфорда.
1886	Сформулирована теория смазки. Публикация «О теории уплотнения и ее приложениях» (Phil. Trans. Roy. Soc.).
1887	Избрание членом Королевского общества.
1888	Избрание президентом Манчестерского литературного и философского общества. Награждение медалью Королевского общества.

1889	Статья «Паровая машина тройного расширения».
1893	Обобщенная статья «Изучение движения жидкости посредством окрашивания струй».
1895	Публикация «О динамической теории движения несжимаемой вязкой жидкости и определяющих критериях».
1897	Статья «О механическом эквиваленте тепла» (Phil. Trans. Roy. Soc.).
1900 - 03	Издание полного собрания трудов издательством Кембриджского университета в 3-х томах под названием «Статьи по механическим и физическим объектам» (I - 1900; II - 1901; III - 1903).
1903	Награждение медалью Дальтона от Манчестерского литературного и философского общества. Публикация статьи «О субмеханике Вселенной».
1905	Уход на пенсию.
21.02.1912	Скончался в возрасте 69 лет. Похоронен на кладбище Уотчет в Сомерсете.

Людвиг Прандтль

04.02.1875 - 15.08.1953



Людвиг Прандтль — знаменитый немецкий физик, известный своими работами в области аэрогидродинамики и механики прочности родился в Баварии в Вайхенстефене, вблизи г. Фрайзинга, в 30 км к северо-востоку от Мюнхена, в семье профессора сельскохозяйственных наук. Он был первым ребенком Александра Прандтля и его жены Магдалины, урожденной Остерманн. Родильный дом, в котором он родился, более ста лет принадлежал семейству Остерманн и управлялся его бабушкой.

Его отец провел школьные и студенческие годы в Мюнхене. С 29 лет работал в высшей школе сельскохозяйственных наук, где преподавал прикладную математику. В этой школе читались курсы химии сельского хозяйства, растениеводство, анатомия и физиология домашних животных, прогрессивные методы ведения хозяйства. В 1870 – 1875 гг. он разработал непрерывно работающую центрифугу оригинальной конструкции для обработки молока. Она была представлена на ярмарке во Франкфурте-на-Майне, ее модель находится теперь в музее молочной промышленности.

Когда Людвиг родился, его матери было 19, а отцу 35 лет. В апреле 1876 г., как полагается по католическим обычаям, состоялось его первое святое причастие. Мать, несколько окрепнув, дарит жизнь второму ребенку, который через неделю умирает. Через год такая же судьба была уготовлена и третьему ребенку – девочке. Отец повез Магдалину в монастырь Альтоттин, чтобы в молитвах найти утешение, но безрезультатно. Четвертый ребенок рождается в 1881 г. недоношенным и погибает. То же самое происходит еще раз в 1883 г. Затем случилось еще два выкидыша. У 29-летней матери развивается глубокое душевное расстройство, и наступает сердечная недостаточность. Нельзя не удивляться мужеству женщины, упорно

стремящейся при таких обстоятельствах рожать детей. К сожалению, ни родители, ни врачи в то время не знали истинного положения вещей. Сегодня медицина классифицирует подобные случаи как «резус отрицательный фактор», конфликт между матерью и плодом, когда первая беременность чаще всего заканчивается благополучно, а последующие трагически.

Все эта обстановка не могла не омрачить детство Людвига, но отец как мог, ограждал его, способствовал рано появившемуся интересу сына к физике. Рассказывал ему про оборудование и различные инструменты, побуждал его к наблюдениям над природой. В пять лет он научился читать, шести лет пошел в школу и скоро стал первым учеником среди 82 учащихся. Молодой Людвиг постоянно проводил время с отцом, переняв от него интерес к физике и технике. Отец заметил эти наклонности сына и всячески поддерживал его увлечения. Постепенно такое воспитание укрепило в юноше интерес к научным исследованиям и постановке экспериментов.

Большое значение отец придавал развитию музыкальных способностей сына, он сам хорошо играл на пианино по вечерам и в свободное время. С 9 лет Людвиг начал брать уроки у учителя музыки. Сестра Магдалины много времени проводила у кровати больной и также занималась с Людвигом. Она научила его играть на пианино вместе в 4 руки и разучивала с ним народные немецкие песни. На воспитание Людвига повлияло также то обстоятельство, что отец не был догматиком в религии, также как и другие профессора в Мюнхене, и он перестал посещать церковь.

Гимназия, университет

Осенью 1888 г. Людвиг поступает в Мюнхенскую гимназию, изредка приезжая в Фрайзинг из-за болезни матери, но когда она бывает в больнице, то он возвращается в Мюнхен, где у него было много друзей, которые вспоминали его даже спустя 60 – 70 лет. После окончания гимназии в 1894 году, Людвиг поступает в Высшую техническую школу Мюнхена. Обучение началось с трехмесячной учебной практики. Он работает в Нюрнберге в литейном цехе фирмы MAN, в отделе изготовления моделей. Осенью приступает к слушанию теоретических курсов, изучает машиностроение (1894 – 1898).

Семейные несчастья сломили отца, и он скончался в марте 1896 года от сердечной недостаточности, когда ему было всего 52 года. Мать умерла спустя два года в 1898 году. Людвиг остался один и полностью углубился в науку.

Годы учебы в Мюнхене расширили его кругозор. Он вступил в Мюнхенское певческое общество, участвовал в хоре, у него был красивый бас. Он не только пел в хоре, но и играл на валторне и пианино. Играл сонаты Бетховена, Моцарта, Гайдна, пел романсы Шуберта, аккомпанируя себе на фортепьяно. Иногда в деревенской церкви играл на органе, этот инструмент он любил особенно. Позднее, в Геттингенском университете, он вспоминал свои молодые увлечения и играл в зале института. Его общитель-

ность собирала вокруг него широкий круг друзей. На праздниках, карнавалах его фантазия была неистощима.

В 1898 году с отметкой «очень хорошо» выдержал выпускной экзамен в Высшей технической школе. После ее окончания знаменитый профессор Август Феппель предложил ему место помощника ассистента в той же Высшей школе, где он учился и которое он с радостью принял. Поскольку он обязан был служить в армии, профессор написал обстоятельное письмо к командованию о целесообразности оставления его на научной работе за своей подписью: «Доктор Феппель, Королевский Профессор». Просьба была удовлетворена, и Людвигу Прандтлю дали отсрочку. Август Феппель на всю жизнь остался для него близким и почитаемым учителем. В те времена профессора иногда приглашали к себе домой для тесного общения своих студентов и ассистентов. У Феппеля было два сына и две дочери, с которыми Людвиг подружился, часто бывая в кругу этой семьи, чувствуя себя свободным, так как эта семья не была требовательна к педантичному следованию немецкого этикета. Позже оба сына Феппеля написали «Воспоминания о Л. Прандтле».

Под руководством Феппеля он начал работу по расчету изгиба бруса большой кривизны и изгиба круглых пластин. Для случая чистого изгиба стержня, поперечное сечение которого узкий прямоугольник, он дал точное решение задачи. В экспериментах по изгибу круглых пластин, Прандтль установил, что их прогибы пропорциональны приложенным силам только в том случае, когда прогибы малы. С увеличением прогибов жесткость пластин увеличивается. В 1899 г. Прандтль представил докторскую диссертацию по проблеме изгиба и упругости балок [1]. Поскольку в Высшей технической школе Мюнхена Прандтль не мог получить ученую степень доктора, он направил диссертацию на факультет философии Мюнхенского университета. Защита диссертации состоялась 29.01.1900 г. Председательствовал на ученом совете и принимал экзамен известный ученый Лео Гретц, а оппонентом был знаменитый математик Ф. Линдеманн. Защита прошла успешно, время учебы закончилось, начались трудности с устройством на работу, профессиональная карьера.

Во время кратковременной работе в фирме MAN он занимался совершенствованием пневматического устройства для механического удаления древесной стружки и улавливания ее в циклонах. Здесь впервые он встретился с проблемами течений газа. Судьбе было угодно, чтобы эти проблемы определили весь его жизненный путь и направление деятельности в науке.

В 1901 г. в Высшей технической школе Ганновера освободилось место профессора, и по представлению А.Феппеля Прандтлю была предложена эта должность. Так Людвиг Прандтль в 26 лет становится самым молодым ординарным (т. е. штатным) профессором в Пруссии. В университете г. Ганновера он продолжает работу по теоретическим основам механики, возглавляет кафедру инженерной механики, читает лекции по механике, принимает экзамены. В 1903 г. им был предложен новый метод решения задачи о кручении стержня.

Несмотря на загруженность преподавательской работой, он находил достаточно времени для исследований режимов течения. В Высшей технической школе Ганновера был водный канал, в котором вода циркулировала с помощью лопаточной машины. Прандтль наблюдал течения, вводя в поток блестящие частички слюды, чтобы сделать поток видимым. Эта идея пришла к нему, как рассказывал его бывший ученик д-р. В. Тилльманн, во время работы в фирме MAN. Однажды к нему пришли мастера и принесли комочки глины, из которых при растворении в воде появлялись блестящие частицы окиси меди, отражающие свет. С их помощью течения можно было сделать видимыми. В Ганновере Прандтль запас большое количество частиц слюды. Его хватило на следующие 50 лет исследований и в Ганновере, и позже в Геттингене.

В сентябре 1903 г. Прандтль участвовал в Касселе на собрании врачей и естествоиспытателей. Его доклад имел успех, несмотря на то, что ему предоставили лишь послеобеденное время в последний день мероприятия. Здесь он завязал полезные знакомства с будущими знаменитыми учеными – Шварцшильдом, Нернстом, Рамзаем.

Аэродинамика

После полетов братьев Райт аэродинамика стала не только модной, но и одной из важнейших наук. Ключевую роль на первом этапе ее развития в Европе сыграл знаменитый немецкий математик, профессор Геттингенского университета тайный советник Феликс Клайн (25.04.1849 – 22.06.1925). Феппель настоятельно рекомендовал Прандтлю обратиться к Ф. Клайну с предложением организовать новое отделение механики в Геттингенском университете. Ф. Клайн всегда стремился к творческому содружеству математики и инженерных наук, поэтому в ответ на это предложение спрашивает, может ли Л. Прандтль занять место руководителя института технической физики в Геттингене, которое ранее занимал Г. Лоренц, и через некоторое время приглашает Прандтля для преподавания в университете на должность внештатного профессора. Хотя переход из Ганновера был шагом назад в карьере, Прандтля привлекло наличие собственной лаборатории, большее количество свободного времени, возможность общения и погружение в научную среду.

12 августа 1904 г. до переезда в Геттинген Прандтль участвовал на 3-м Международном конгрессе математиков в Гейдельберге. Он выступил с докладом «О движении жидкостей при очень малом трении» [3]. Это была новая научная теория, названная теорией пограничного слоя, — результат теоретической и экспериментальной работы в Ганновере. В этой работе он показал, что у покоящегося тела, обтекаемого жидкостью, или у поверхности тела, движущегося в жидкости (газе), находится заторможенный пограничный слой («Grenzschicht»), который в значительной мере определяет гидродинамическое сопротивление тела. Знание свойств этого слоя позволяет

найти пути снижения сопротивления движущихся тел, в том числе и крыльев самолетов. Его доклад произвел сенсацию среди присутствующих математиков, которые с интересом следили за новыми идеями о течениях жидкости и газа.

В сущности, это была концепция течения при больших числах Рейнольдса ($Re \to \infty$). В этом же докладе был продемонстрирован эффект отсоса жидкости через проницаемую поверхность. Это был основополагающий шаг, который вскоре стал весьма важным для развития авиации. Помимо теории пограничного слоя Прандтль на конгрессе представил и работу в области теории упругости. С этого момента Прандтль стал известным в кругу естествоиспытателей. Доклад Прандтля сразу поднял его престиж как специалиста-аэродинамика.

Профессор Феппель в своих воспоминаниях приводит комментарии к теории Прандтля: «*...До этого времени не удавалось теоретически объяснить сопротивление тела в текущей жидкости или воздушном потоке, также как и подъемную силу самолета. Классическая механика исходила из течения без трения, либо учитывала трение, но при этом математические трудности становились такими большими, что не удавалось найти практического решения. Мысль Прандтля заключалась в предположении течения без трения во всей области, за исключением области потока около твердых поверхностей. Этот слой около стенки называют пограничным слоем. С помощью такого упрощения математические трудности можно преодолеть...*»

С 1 сентября 1904 г. Прандтля назначают на должность экстраординарного профессора Геттингенского университета. В его обязанности входило чтение лекций и проведение семинарских занятий по технической физике и машиноведению. Одновременно он стал руководителем отдела технической физики в физическом институте.

После 1906 г. он занимается в основном аэродинамикой. Ему было поручено разработать проект исследовательской лаборатории. Осенью 1907 г. в исследовательской лаборатории Геттингена была построена закрытая аэродинамическая труба с поперечным сечением 2×2 м и мощным вентилятором для создания потока воздуха. Одновременно в Париже инженер Александр Густав Эйфель построил открытую аэродинамическую трубу. Таким образом, появилась возможность сравнивать результаты измерений, полученных на двух разных трубах. Первые же измерения показали, что результаты по непонятным причинам различаются. Прандтль нашел объяснение этим различиям с помощью теории пограничного слоя. Они были связаны с разной степенью турбулентности в трубах, имеющих успокоительную решетку и не имеющих ее. За объяснение этого факта Прандтлю была присуждена премия Беннета. В 1907 г. он стал основателем Исследовательского центра по аэродинамике (Aerodynamische Versuch-Anstalt, AVA).

В январе 1908 г. профессор Прандтль и доценты Геттингенского университета Линке, Пюттер, Бестельмайер совершили полет на аэростате из

Геттингена до Берлина. Сам Прандтль после нескольких испытательных полетов с инструктором получил разрешение на самостоятельное управление аэростатом. В январе 1909 г. он начинает читать курс лекций по аэродинамике на только что созданной первой кафедре по воздухоплаванию.

Жизнь Прандтля в эти годы была безыскусственна, и сам он был довольно простодушен. Когда ему исполнилось 34, он решил, что пришло время жениться, и на Пасху письменно обратился к своему старому профессору и попросил руки его дочери Гертруды, отправив ей письмо во время путешествия по Германии. Она быстро ответила ему «ДА!» в тот курортный городок, где он был проездом и откуда пришло его письмо, но он видимо забыл указать, куда он уезжает. Долго он ждал ответа, ходил на почту, но ответа не было. Недоразумение разрешилось, когда Прандтль вернулся в Геттинген, и состоялось венчание. Так как Людвиг был католиком, а Гертруда была приписана к протестантской церкви, то они венчались в евангельской церкви Мюнхена (в сентябре 1909 г). Свадьбу справили в доме Феппелей. После свадебного путешествия молодая семья приехала в Геттинген, где Прандтль уже снял шести комнатную квартиру и обставил ее мебелью, которая была частично выполнена по его личным чертежам. Гертруда помогала мужу в качестве секретаря, взяв на себя переписку и оформление научных работ. Они хорошо дополняли друг друга. В ноябре 1914 родилась первая дочь Хильда, а через два с половиной года — вторая, Ханна.

Вскоре Клайн и Прандтль организуют при университете институт прикладной математики и механики, в котором главными задачами сначала были определены проблемы прочности. В Геттингене работал Степан Прокофьевич Тимошенко (1878 – 1972), будущий крупнейший специалист по теории прочности, в 1906 – 1907 гг. исследовавший устойчивость двутавровых балок и другие проблемы прочности. Параллельно с проблемами прочности в институте начинают развиваться аэродинамические исследования. Именно

Людвиг и Гертруда Прандтль. Свадебная фотография

Гертруда Прандтль с дочерьми Хильдой и Ханной

здесь Прандтль начинает развивать теорию пограничного слоя и изучает сверхзвуковые течения в соплах. Он становится одним из основателей немецкого общества воздушных и космических исследований (Deutsche Geselschaft fur Luft- und Raumfahrt, DGLR, 1912; теперь DLR) и общества прикладной математики и механики (Geselschaft fur Angewandte Matematik und Mechanik – GAMM, 1922). Последнее общество было создано для содействия научным разработкам во всех прикладных областях математики и механики. С этой целью оно:

- образовало несколько рабочих групп по отдельным областям математики и механики, где обсуждались научные результаты с участием молодых ученых;
- способствовало представлению научных результатов на ежегодные международные семинары;
- издавало отдельные публикации, научный журнал, сообщения GAMM и распространяло их среди членов общества.

Общество сыграло существенную роль в развитии работ по гидро- и аэромеханике, механике твердого тела, а также в развитии численных методов расчета. В настоящее время общество является международной организацией, включающей 2000 членов.

Около 10 лет Прандтль вместе с А. Бетцем и М. Мунком работал над методами расчета подъемной силы крыла и обнаружил, что она вызывается вихрями, срывающимися с концов крыльев. Мысль о пограничном слое была ценна тем, что создала фундамент под ту систему вихрей, без которой нельзя было объяснить и рассчитать подъемную силу. Эти вихри или вихревое движение среды влияют на распределение давления над крылом, и в результате появляется вертикальная, подъемная сила. Теория была опубликована ими в 1918 – 1919 гг. [6], и позволяет делать точные расчеты сопротивления и подъемной силы. В Англии на теорию подъемной силы ссылаются как на «теорию Ланкастера – Прандтля» в связи с тем, что английский ученый Фредерик Ланкастер опубликовал свою теорию раньше Прандтля. В 1907 году в книге «Аэродинамика» Ланкастер описал свою модель на основании наблюдений за вихрями, которые он наблюдал на крыльях во время полета. Прандтль объяснил, что он не знал о модели Ланкастера, когда в 1911 г. начинал свои работы.

Впервые же теорема о подъемной силе крыла была установлена Н. Е. Жуковским в 1904 г., о чем ни Ланкастер, ни Прандтль не знали. Поэтому позже в своей книге «Путеводитель по гидромеханике» [21] Прандтль отметил заслуги Жуковского: «Теорема Жуковского важна потому, что она дает возможность вычислить по заданной подъемной силе соответствующую циркуляцию, определяющую напряженность вихря позади крыла» (с. 94). «Подъемная сила на единицу длины крыла равна $A = \rho w \Gamma$, где ρ – плотность воздуха, w – относительная скорость, Γ – циркуляция» (с.112). К сожалению, Жуковский и его ученики остались в стороне от новых научных направлений — изучения динамики вязкой жидкости.

Теория подъемной силы крыла, созданная Прандтлем, основывается на системе вихрей — присоединенного вихря на крыле и свободных (подковообразных) вихрей, выходящих с нижней части крыла и несущего вихря — с конца крыла. Обе его работы (теория пограничного слоя и теория подъемной силы при обтекании тел) открыли путь дальнейшим исследованиям. Они содержат исходные положения, которые и сегодня не потеряли актуальности и всегда будут связаны с именем Прандтля. Во время первой мировой войны теория Прандтля позволила рассчитать подъемную силу тонких выпуклых профилей крыла. Дальнейшие работы по дозвуковым течениям и описание эффектов сжимаемости при высоких скоростях привели его к правилу, известному теперь как «Правило Прандтля–Глаубера» [38].

Прандтль сделал важный вклад в развитие теории сверхзвуковых течений и турбулентности. Первая работа о расчетах свойств ударных волн и расширении сверхзвукового потока была выполнена им совместно со своим студентом Теодором Майером в 1908 г. (расширение Прандтля – Майера) [34]. В 1929 г. вместе с Адольфом Буземаном он разрабатывает метод расчета сверхзвуковых сопел [37]. Сегодня все сопла сверхзвуковых аэродинамических труб и сопла ракет рассчитываются по методике, в основу которой положены идеи Прандтля.

Ученики

Теория пограничного слоя свои первые 20 лет (1904 - 1924) развивалась преимущественно в Геттингене учениками Прандтля. В 30-х годах эти работы помогли фирме Фоккер выбрать рациональную форму истребителя, что обеспечило превосходство немецких истребителей на первом этапе второй мировой войны над воздушной армией союзников.

Прандтль был профессором прикладной механики в Геттингенском университете с 1904 по1923 гг., где создал школу аэродинамики и гидродинамики, получившую мировую славу. Среди его сотрудников и студентов были многие хорошо известные впоследствии ученые: Аккерт, Блазиус, Гёртлер, Карман, Никурадзе, Польгаузен, Рейхардт, Шлихтинг, Толлмен и другие. Всего под его руководством было защищено 83 докторских диссертаций.

Один из сотрудников Прандтля, Пауль Рихард Генрих Блазиус (1873 – 1970), не только заложил математические основы расчета сопротивления с учетом пограничного слоя, но также показал в 1911 году, что сопротивление движению потока в гладких трубах может быть выражено в зависимости от числа Рейнольдса как для ламинарного, так и для турбулентного режимов. Он получил простую формулу для расчета коэффициента гидравлического сопротивления в круглых трубах (закон Блазиуса), которая и теперь входит во все учебники и справочники по гидродинамике [33, 35].

Другой аспирант Прандтля — Иван (Вано) Ильич, (позже Иоганн) Никурадзе (1894 – 1979), родившийся в Грузии и приглашенный в Германию, расширил области экспериментальных исследований сопротивления не толь-

ко для гладких, но и шероховатых труб [40-42]. Известны его классические работы по измерению распределения скорости в трубах, позволившие в соответствии с полуэмпирической теорией Прандтля установить универсальный закон распределения скорости в гладких и шероховатых трубах (независимо от диаметра трубы, средней скорости, вязкости, то есть независимо от числа Рейнольдса).

Учеником Прандтля является и известный ученый-аэродинамик Теодор Карман (1881 – 1963), готовивший докторскую диссертацию по устойчивости стержней за пределами упругости. Позже он стал профессором технического института в Аахене в 1913 г. и не терял связи со своим учителем, пока оставался в Германии. Перед первой мировой войной работал над проблемой турбулентности [39] и организовал Аэродинамический институт в Аахене (Германия), который уже к 1920 году заслужил мировую славу. В 1930 году Калифорнийский технологический институт (США) пригласил Кармана директором аэродинамической лаборатории им. Гугенхайма, где обучались многие поколения инженеров по теоретической аэродинамике. Венгр по национальности, он, после прихода к власти Гитлера, уехал в Америку. Здесь Карман продолжает заниматься различными аспектами теории турбулентности, теории теплообмена [43-45]. Позже Карман основал и в США Аэродинамический институт, был консультантом различных фирм и правительства США. С 1941 года Карман занимался ракетной техникой, основал в США первую корпорацию, производящую ракетные двигатели (Aerojet General Co.). В 1944 он был сооснователем ракетной лаборатории (Jet Propulsion Lab.) в Калифорнийском технологическом институте, которая стала частью НАСА (NASA). В 1949 г. вернулся в Германию, где организовал консультативную группу по исследованиям в аэронавтике и до конца своих дней оставался ее председателем. Его деятельность была отмечена правительством США. В 1963 году он был первым, кто получил из рук президента Джона Кеннеди Государственную медаль за научные заслуги.

Из когорты учеников Прандтля, известных российским специалистам, выделяется имя Генриха Шлихтинга, который внес большой вклад в развитие тории пограничного слоя, благодаря капитальному труду «Теория пограничного слоя» [51], изданному впервые в 1951 г. и выдержавшего более семи изданий. Известна также его книга «Возникновение турбулентности» [50].

В 1923 году Прандтль покидает Геттинген и возвращается на свою родину в Мюнхен в институт Кайзера Вильгельма (KWI) для создания Института прикладной гидромеханики.

Сооружение института

В течение 1,5 лет, когда сооружался новый институт, все сотрудники – механики и ассистенты — участвовали в работах по созданию большой аэродинамической лаборатории. Среди сотрудников не было какой-либо специализации, каждый умел делать все, работали вечерами, не считаясь со вре-

менем. Одновременно велись экспериментальные исследования пограничного слоя и разработка теории.

Один из новых проектов был связан с использованием вращающихся цилиндрических парусов (Rotorschifts), которые могли дать кораблю большую движущуюся силу, чем обычный плоский парус. Сооружалась опытная модель такого корабля. Прандтль постоянно следил за строительством и 17.11.1924 г. сделал доклад перед Геттингенским Физическим обществом. Однако надежды на удешевление грузовых перевозок с помощью таких судов в то время на практике не оправдались, так как сложные механизмы вращающихся цилиндров требовали постоянного квалифицированного обслуживания. Много позже (1985) знаменитый океанограф Жак Кусто опробовал такое судно, конечно с более совершенной механикой, в гавани Нью-Йорка, но эта идея не получила в дальнейшем развития на практике.

Другие работы практического характера были связаны с опытами по снижению сопротивления воздуха при движении различных транспортных средств (локомотивов, поездов, самолетов и др.). 16.07.1925 г. состоялось освящение и открытие института. Президент Гарнак, передавая новый институт профессору Прандтлю, сказал:

«Мы тщательно подбирали руководителя. Теперь, когда мы его нашли, все капитальные сооружения и денежные средства передаем ему с тем, чтобы он делал то, что считает нужным и правильным».

Так Прандтль становится директором Института прикладной гидромеханики в Институте Кайзера Вильгельма (позднее этот институт стал носить имя Макса Планка).

Круг задач института был значительно расширен. Если в годы первой мировой войны работы сосредотачивались на аэродинамике самолетов, то теперь исследовались влияние ветровых нагрузок на железнодорожные мосты, линии электропередачи с тем, чтобы обеспечивать их устойчивость при штормах и бурях. Создавались новые инструкции для проектировщиков и строителей. В настоящее время в институте Макса Планка работают 12000 специалистов, из них 9000 докторов наук, пост-докторов, приглашенных исследователей, студентов работают в 80-ти отдельных исследовательских институтах и группах. Сегодня этот институт — один из крупнейших в мире, известный исследованиями в самых разных областях науки и техники.

Новая аэродинамическая труба имела опытный канал 4 метра в диаметре. В ней исследовались мельничные колеса в натуральную величину. Была создана «вращающаяся лаборатория», которая весьма нравилась детям сотрудников института, когда они навещали отцов, и старались прокатиться на моделях этой лаборатории, как на карусели.

В ноябре 1926 г. институт состоял из 55 сотрудников и управлялся двумя директорами — Л. Прандлем и А. Бетцем. Супруга Л. Прандтля Гертруда никогда не звонила ему на работу, так как уважала его труд и не имела привычки отвлекать его от занятий. В институте ежегодно устраивался ве-

чер для коллектива с танцами, разного рода выдумками, которые часто исходили от самого директора института.

В 1924 г. на Первом Международном съезде по теоретической и прикладной механике Прандтль сделал доклад, в котором были сформулированы основы теории пластичности — теории течения для частного случая плоской деформации.

Особенным событием 1927 года была поездка Прандтля в Лондон, где он должен был выступить с мемориальной лекцией о братьях Райт в Королевском Обществе Аэронавтики. За 1,5 года до этого он начал частным образом изучать английский язык и через короткое время мог уже выступить с лекцией. В Англию он полетел первым (!) рейсом компании Люфтганза «Ганновер-Лондон» (12.05.1927). Для него это было особенно острое переживание, во время полета вел записи того, что видел сверху. Все лондонские и немецкие газеты освещали эту поездку. Прандтль был награжден Золотой медалью Общества Воздухоплавателей, как главный авторитет в области аэронавтики и как создатель теории подъемной силы крыла. В Англии этими работами занимался Ланкастер, и эту теорию там называют «Теорией Прандтля-Ланкастера», поскольку они достигли результатов независимо друг от друга.

В Англии он посещал английских коллег, в том числе профессора Тэйлора в Кембридже, с которым его затем связывала сердечная дружба в течение многих лет. Возвращение в Геттинген было триумфальным, студенты встречали его факельным шествием и овацией, звучали «Vivat professor!» и национальные песни. Вернувшись из Лондона, Прандтль обнаружил в институте нового секретаря – фрейлин Элеонору Сеебах. Он устроил ей экзамен – диктант, чтобы убедиться, соответствуют ли способности молодой дамы его требованиям. Она была принята с испытательным сроком, оставалась в институте затем 43 года и после смерти Прандтля у последующих руководителей, как опытный секретарь. Она рассказывала, что Прандтль был очень аккуратным, корреспонденция никогда не задерживалась, он отвечал быстро и по-деловому, не терпел непонятливости, диктовал спокойно, и она скоро приспособилась к его стилю. Книгу «Путеводитель по гидродинамике» Прандтль надиктовывал именно ей. Книга была издана в 1942 году в Брауншвейге. Цель книги, как он сам пишет в предисловии, была в том, чтобы «провести читателя по наиболее легкому и быстрому пути через различные области гидроаэромеханики». В 1944 г. она вышла вторым изданием [21], а затем и третьим.

В 1929 году по приглашению Всемирного инженерного конгресса Прандтль посетил Японию. Путь из Геттингена поездом через Берлин в Москву занял 40 часов. В Москве он осмотрел Кремль, Третьяковскую галерею, Музей Революции, присутствовал на представлении балета в Большом театре. Его принял немецкий посол. Прандтля поразило хорошее оснащение уже существующих и широкое строительство совершенно новых исследовательских институтов. Затем ему пришлось ехать 10 суток желез-

ной дорогой через всю Сибирь. Дорога произвела на него сильное впечатление. Около Новосибирска дорога пересекла Енисей, самую большую реку, когда-либо им виденную. 3 октября он и его спутники могли любоваться Байкалом, вдоль которого поезд шел целых 6 часов. Поразительный ландшафт Байкала при восходящем солнце навсегда остался у него в памяти. Он с удивлением отметил, что, несмотря на такой долгий, длинный путь, поезд пришел во Владивосток с опозданием всего на 3 часа.

В Японии он обратил внимание на то, как быстро идет промышленное развитие всей страны. Каждая деревня имела электрическое снабжение, большие города были отстроены заново после сильнейшего землетрясения в 1923 году. Инженерный конгресс был хорошо организован. В нем приняли участие много специалистов из разных стран (в том числе 200 из США, 60 из Германии). Поразили его доброжелательность и гостеприимство японцев. Это было время, когда в начале 30-х годов европейская цивилизация начала сильно влиять на всю жизнь Японии. Хорошее впечатление произвели научные институты, в том числе аэродинамического профиля. В них он обнаружил большее количество аэродинамических труб, чем в Германии, в том числе одну из самых больших в то время труб диаметром 6 метров.

Из воспоминаний дочери. «Отец выработал привычку: еженедельно во второй половине дня субботы подниматься с женой в горные рощи, бродить по маленьким дорожкам, отыскивать места, откуда открываются красивые виды или места с редкими цветами. После такой экскурсии он всегда возвращался с красивым букетом. Каждый, кто сопровождал его, обогащался и новыми знаниями и душевным зарядом от него.

Его интересовало образование облаков на разных высотах, он восхищался необычными клубами облаков, их разнообразием. По вечерам обычно устраивалось семейное чтение, на котором мать читала своим детям и ему биографии знаменитых людей или новейшие романы (Томаса Манна и др.). На него настолько сильно действовало описание жестоких реалистических сцен, что мать была вынуждена откладывать книгу.

Когда мать умирала в 1940 году, отец очень скучал без этих привычных чтений, и я решила продолжить их. После окончания чтений бывало, что под их впечатлением он больше часа не садился за работу.

Научная работа часто занимала его вечернее время, и до 1.30 свет не гасился в его комнате. Соседи знали, что «господин профессор работает». В его комнате у стены стоял второй стол, заваленный неисполненной личной почтой. В отличие от служебных здесь стопки писем иногда вырастали такой высоты, что могли обвалиться. Его тезисом было: «Никакое почтовое отправление не может быть настолько спешным, чтоб не могло бы полежать еще на столе, и проблема тогда решится самостоятельно».

Летом 1929 года в Кенигсберге состоялось чествование Прандтля на общем собрании Союза немецких инженеров (VDI) в присутствии 800 специалистов, где ему была вручена высшая награда этого Союза — золотая медаль.

1933 год

Наступил 1933 год. Под воздействием национал-социалистов прекратила существование Веймарская республика в Германии. Члены семьи Прандтля состояли в Демократической партии, и им было непонятно, как это Гитлеру удалось захватить власть. Ученые Геттингена, хотя и были далеки от политики, очень скоро ощутили хватку национал-социалистов (фашистов). Профессор Бернстайн, вынужденный эмигрировать, вспоминал, как Прандтль на семинарах ругал нацистов.

Новое правительство проявило особый интерес к развитию исследований по аэродинамике. В институте осуществлялось большое строительство, которое Прандтль возглавлял, как первый директор. Такое развитие доставляло ему большое удовлетворение. Можно было предположить, что Прандтль будет стараться приспособиться к «новому порядку». Однако он не делал ничего такого, отказался входить в партию нацистов, вешать в кабинете директора портрет Гитлера. Тем не менее, нацисты никогда не ставили его перед альтернативой — либо вступишь в партию, либо лишишься должности. Видимо и они, как и его коллеги, были уверены, что он отказался бы от должности, но не пошел бы на компромисс, поскольку известно, что он даже подумывал о вхождении в оппозиционную партию.

Прандтль был поражен травлей его еврейских коллег (Курант, Макс Борн, Джеймс Франк и др.). Он заступился за своего сотрудника, о котором распространились слухи, что он коммунистический агитатор. Один ассистент, который оказался доносчиком национал-социалистов в университете, был незамедлительно изгнан, хотя пытался защищаться: «Вы еще раскаетесь! Вы еще вспомните обо мне!».

В 1953 году, в год празднования 1000-летия города Геттингена, Куранту, Франку и другим было присвоены звания Почетных граждан Геттингена.

В июне 1934 г. Прандтль в сопровождении старшей дочери был приглашен на Конгресс технической механики в Кембридж. Он был в гостях у английского коллеги профессора Тейлора, на Конгрессе сделал доклад. В 1936 году он был снова приглашен в Англию, где университет Кембриджа присвоил ему звание почетного доктора, Конгресс механики избрал его председателем общества прикладной математики и механики. В 1935 г. ему было присвоено звание почетного доктора Тронхеймского университета, но он смог поехать в Норвегию лишь в 1937 г. Встреча с норвежскими коллегами была теплой, и дружба не прекращалась долгие годы. В послевоенные голодные годы профессор Брюн из Тронхейма, который при оккупации Норвегии действовал против немцев, послал ему для поддержки питания несколько бутылок ценного печеночного жира трески.

По инициативе жены Прандтля в 1935 году они приобрели в горах Австрии земельный участок, где построили скромный деревянный дом, хотя имели возможность построить коттедж в Геттингене, как многие коллеги. Прандтль сам составил план дома, по которому и был он построен. Он и

жена намеревались жить в этом доме после ухода на пенсию. Превосходный горный воздух благотворно действовал на всех.

Осенью 1936 г. Прандтль предоставил этот дом на полгода семье философа Георга Миша, который был уволен из университета и лишен жилья в Геттингене, как не ариец. Позже семья Миша эмигрировала в Англию и вернулась в Геттинген лишь после войны в 1946 году.

Борьба между физиками

Между физиками Германии предвоенного времени произошло столкновение группы «арийской физики Альфреда Розенберга» с группой Гейзенберга, придерживающейся квантовой механики и теории относительности Эйнштейна. К первой группе принадлежали Й.Штарк и Ф.Ленард, которые пытались объединить всех физиков под лозунгом более «прагматической физики», отрицающей и квантовую механику, и теорию относительности. В книге «Наука под Гитлером» (авт. А.Бейерхен), в воспоминаниях Гейзенберга и его жены и в ряде других подробно описана эта история. Штарк и Ленард вели интригу против Гейзенберга. Пытаясь отстоять настоящую физику, Прандтль сначала написал письмо руководителю СС Генриху Гиммлеру. Гиммлер дал указание Гейдриху не трогать Гейзенберга. Но это не помогло. Поэтому Прандтль обращается с письмом в защиту Гейзенберга и в защиту теоретической физики непосредственно к Рейхсмаршалу Герману Герингу (Goering) с просьбой показать письмо Гитлеру. К письму была приложена 8-страничная записка о теоретической физике (см. приложение). В конечном счете, Геринг все-таки дал указание оставить Гейзенберга в покое. Во время разгула антисемитизма в Германии такие действия требовали определенного мужества. У Гейзенберга жена была еврейка, что, по мнению «истинных арийцев – физиков», было непростительным для немца. Трудно сказать, сыграли или нет какую-то роль письма Прандтля в судьбе Гейзенберга, но он был реабилитирован. После открытия деления ядра урана Отто Ганом и Штрассманом (декабрь 1938 г.) он был допущен все предвоенные годы к секретнейшим работам германского рейха и стал одним из активных участников немецкого атомного проекта. В конце 1941 г. готовил эксперимент на первом германском ядерном реакторе (подкритической сборке) с тяжелой водой. С лета 1942 года министерство по указанию Геринга перестало поддерживать «арийскую линию» Ленарда.

В 1940 – 41 гг. семью Прандтля постигли тяжелые удары судьбы. В июле 1940 года после родов в 26 лет умирает его дочь Хильда, в декабре – жена Гертруда, в июне 41-го под Ригой погибает зять Вольфганг, муж дочери Хильды. Смерти дочери и жены Прандтль переживал очень тяжело, ему недоставало той жизнерадостности и живости супруги, с которой она принимала участие во всех его делах. В доме стало тихо. Как обычно, каждую субботу, теперь в одиночестве, он совершал длинную прогулку по ближайшим горам. Один из сотрудников института вспоминал, что Прандтль гово-

рил ему: «Знаете, очень тяжело пережить такие потери, но жизнь продолжается, так что будем работать!» Он совершенно погрузился в работу.

В мае 1941 года состоялась поездка в Румынию для чтения лекций, на которые собралось множество специалистов.

Конец войны

Весна 1945 года была еще холодной, и, чтобы сэкономить топливо, семье Прандтля в шести комнатной квартире пришлось перебраться в одну комнату. Приближался фронт. Нацисты хотели взорвать все институты Геттингена. Чтобы не допустить этого, ряд профессоров вместе с Прандтлем обратились к гаулейтеру Лаутербаху. Город был забит ранеными, которых некуда было эвакуировать. Гаулейтер обещал связаться с Имперской канцелярией, но команду на уничтожение все-таки не отменил. 7-8 апреля 1945 г. большинство жителей провели в подвалах. На следующий день в город вошли американские войска.

Все архивы были арестованы, доступ в институты был запрещен. На первой неделе Прандтля забрали из дома и под охраной американских солдат привезли в комендатуру, но потом отпустили. У американцев сложилось мнение, что в Геттингене делались авиационные двигатели, но Прандтль объяснил, что здесь занимались лишь исследованиями их отдельных частей. Наступили голодные дни, очереди за хлебом надо было занимать с 6 часов утра, так как к 8 часам весь хлеб обычно распродавали. Дрова добывали сами, возили их из ближайшего леса. Не было ни газа, ни электричества. Девушка, бывшая домработница, покинула их и уехала к себе в деревню. Вероятно, это были самые трудные дни, но уже в мае снабжение стало налаживаться. Дочь вспоминала, как «неожиданно появился профессор Никурадзе и снабдил всю нашу семью и весь институт дровами».

Поскольку продолжать аэродинамические исследования американцами было строго запрещено, Прандтль занялся на дому метеорологическими проблемами. Важным событием в это время был визит в Геттинген бывшего его ученика, теперь профессора фон Кармана, из Америки. Открылся доступ в институт, стали приезжать американские специалисты, и Прандтль стал ходить в институт под охраной солдата с пистолетом. Он чувствовал себя как служитель музея, который дает объяснения посетителям. Немецкие специалисты поражались неосведомленности американцев о том, какие исследования велись в Геттингене. После восьми недель запрета было, наконец, разрешено приступить к работам, но только по специальным пропускам.

Скоро молодые одаренные ученые покинули Германию, уехали в Англию, Америку, где им обеспечили хорошие возможности для исследовательской работы. Госпожа Лу Син Чен, аспирантка Прандтля, возвратилась в Китай и стала профессором аэродинамики в Пекине.

Каждую неделю сотрудникам института выдавалась одна буханка («институтский хлеб») по символической стоимости. О своей жизни в этот пе-

риод времени Прандтль писал своему коллеге профессору Тейлору в Англию: «Хотя мой институт во время войны не был разрушен, но, занятый солдатами, претерпел много повреждений». Дочь пишет: «Мы хотели делать ремонт, но новые работы проводить не разрешалось, несмотря на неоспоримое международное признание Прандтля».

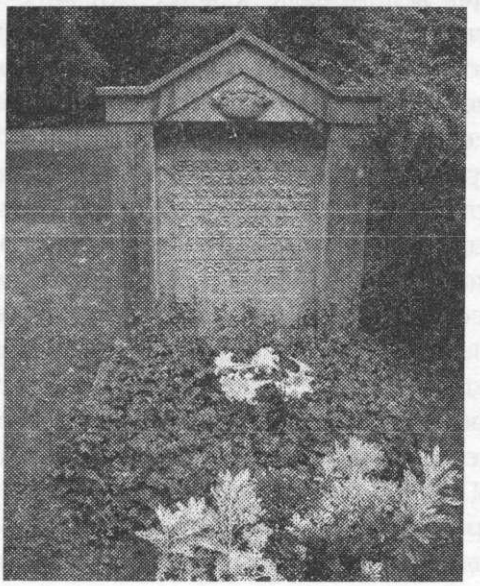
После 70-летнего юбилея Прандтля (4.02.1945) все думали, что он сложит с себя полномочия директора и сосредоточится только на книге «Путеводитель по аэрогидродинамике». Но он остался верен своему институту, маленькому университетскому городку Геттингену, где провел молодые годы. Он не отстранился от руководства, и, как признанный руководитель, следил за многими направлениями.

Появилась внучка Агнес, с которой он часто занимался.

В 1948 году он публикует работу «Мой путь к гидродинамической теории», подводящую итог его плодотворной деятельности [26]. В то время Прандтлю было 73 года, но его активная научная деятельность продолжалась, он разрабатывал многие задачи гидродинамики, в том числе в таких областях как реология, метеорология и др.[22-28]. В их основе всегда лежали физические представления и анализ процессов течения, что делало эти работы классическими. Он был интеллигентом, привлекательным человеком, незаурядным пианистом.

Прандтль являлся почетным доктором во многих Высших технических школах и университетах: Данцига (1920), Цюриха (1930), Праги (1932), Тронхейма (1935), Кембриджа (1936), Бухареста (1948), Стамбула (1952). Он был членом или почетным членом многих иностранных академий. В 1951 году был награжден Большим Германским крестом «За заслуги».

Людвиг Прандтль скончался 78-ми лет 15 августа 1953 года в Геттингене.



Памятник на могиле Л. Прандтля

Имеется обширная литература о его научной работе и жизни (к сожалению, малоизвестная в России). Его дочь фрау Иоганна Фогель-Прандтль собрала и опубликовала в 1993 г. материалы о его жизни в трудах института Макса Планка [60]. В 1961 году издано собрание его научных трудов в 3-х томах (1620 с.) [32], представляющее не только исторический интерес. Быстрое развитие современной гидромеханики во всех областях требует четкого понимания физических явлений, которое невозможно без знания его основных трудов.

Три основных достижения представлены в его работах:

1) Открытие пограничного слоя и создание основ его теории.
2) Создание теории подъемной силы при обтекании тел.
3) Создание полуэмпирической теории теплообмена.

Они нашли широчайшее применение не только в проектировании летательных аппаратов, но и во многих других отраслях техники, связанных с процессами гидродинамики и теплообмена.

Через три года после смерти Прандтля проблемы пограничного слоя вновь оказались в центре внимания специалистов по аэродинамике, поскольку надо было решить проблему возвращения аппаратов и астронавтов из космоса. При сверхзвуковых скоростях газа (числах Маха, $M > 2$) выделение тепла из-за торможения и завихренности в пограничном слое становится настолько большим, что поверхность сильно нагревается. Аэродинамический нагрев представляет препятствие на пути развития авиационной и ракетной техники, так как снижает прочность материалов и усложняет условия для экипажа. При очень высоких скоростях газа ($M = 10 - 20$) нагрев настолько силен, что обшивка аппарата оплавляется и загорается. Невозможно рассчитать нагрев, не имея данных о структуре и характеристиках пограничного слоя. Поэтому и на новом этапе развития техники точное знание гидродинамических и тепловых процессов, развивающихся в тонком пограничном слое, стало насущной необходимостью.

Согласно обзору Драйдена, опубликованному в 1955 году, в те годы ежегодно публиковалось около 100 работ, посвященных теории пограничного слоя. Десять лет спустя это число возросло до 200 за год. Развитые многими учеными представления о пограничном слое актуальны и сегодня, поэтому имя Прандтля останется в науке вечно.

Брат Людвига Прандтля — Вильгельм Антонин Александр Прандтль (22.03.1878 – 22.10.1956) — был видным химиком, окончил Мюнхенский университет, работал на химических и металлургических предприятиях. В 32 года стал профессором неорганической химии в Мюнхенском университете, занимался тонкой очисткой редкоземельных элементов. Его методы и препараты использовались при точном определении атомных масс. Вильгельма и Людвига Прандтля часто путают в энциклопедиях, бывают случаи, когда приписывают Вильгельму фотографии и истории из жизни Людвига.

В России физическая гидромеханика под влиянием идей Прандтля развивалась с начала 20-х годов в Петроградском политехническом институте

коллективом профессора Л. Г. Лойцянского и группой ученых, сформировавшейся при кафедре теплотехники, руководимой профессором (позже первым в СССР академиком-теплотехником) Михаилом Викторовичем Кирпичевым. Исследуя процессы теплообмена поверхностей, обтекаемых жидкостями и газами, «они пришли к идеям Прандтля со стороны теплового пограничного слоя» [57]. Как курьез Л. Г. Лойцянский вспоминает: «Сомнения в существовании пограничного слоя были очень живучи. Так, уже после окончания второй мировой войны, академик Б. Н. Юрьев, выступая в прениях в Отделении технических наук АН СССР, утверждал, что, может быть, пограничных слоев вообще нет. Хотя в то время практики не только не подвергали сомнению существование пограничного слоя и его роль в расчетах течения при обтекании тел, а студенты наблюдали его визуально и проводили в его сечениях измерения распределений скоростей» [61].

В науке с именем Прандтля связаны:

1. Понятие и теория пограничного слоя, отрывного течения (август 1904).
2. Расширение Прандтля – Мейера (1907 – 1908).
3. Число Прандтля (1910).
4. Трубка Прандтля (1913).
5. Теория подъемной силы крыла (1918-1919).
6. Концепция (теория) длины пути смешения (1925).
7. Полуэмпирическая теория теплообмена (1910, 1928).
8. Аналогия Прандтля – Глауэра (1929) или правило Прандтля (1930).
9. Метод характеристик Прандтля – Буземана (1929).
10. Формула для течения реологических сред (1950).

Понятие пограничного слоя. На восьми страницах в [3] была изложена не только основная концепция и описаны дифференциальные уравнения, но и даны решения с прицелом на будущее развитие. Эскизы и фотографии иллюстрировали новую концепцию. Каждый может изучить эту работу теперь спустя 100 лет после её опубликования (рис. 1 - 3). В этой работе Прандтль пришел к заключению, что в жидкостях с незначительной вязкостью влиянием вязкости можно пренебречь; исключение составляет лишь тонкий слой вдоль твердых поверхностей.

В пограничном слое происходит ***торможение*** частиц жидкости (газа) под воздействием сил сцепления с твердой стенкой и сил вязкости, передающих это торможение на некоторое расстояние δ от стенки в глубь потока. Заторможенные частицы находятся под влиянием сил инерции с одной стороны и сил вязкости – с другой, приобретают вращение, или ***завихренность.*** Поведение жидкости в пограничном слое позволяет правильно объяснить срыв струй с поверхности обтекаемых тел и образование вихревого следа за телом, вычислить силу трения жидкости о поверхность тела.

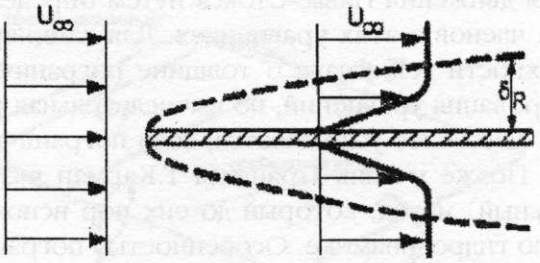


Рис. 1. Обтекание плоской пластины:
U_0 – скорость набегающего потока, δ - толщина пограничного слоя

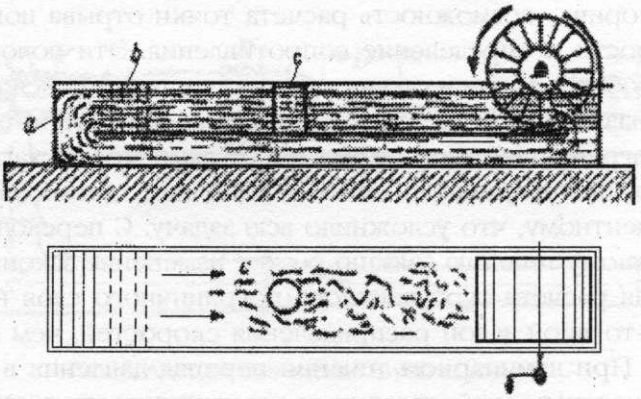


Рис. 2. Водный канал для исследований пограничного слоя, (1903)

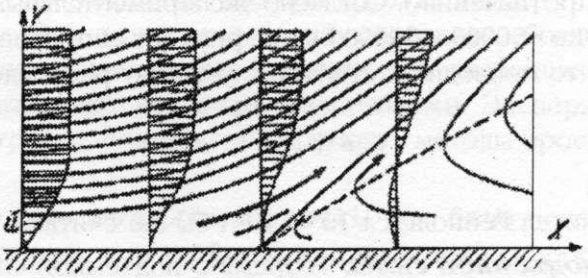


Рис. 3. Отрыв пограничного слоя

Теория пограничного слоя способствовала не только пониманию природы гидравлического сопротивления из за поверхностного трения, но и тому, как сократить сопротивление крыльев аэроплана и других тел в потоке. Сопротивление рассматривается как результат трения жидкости или воздуха, которые протекают над поверхностью.

Поток жидкости или газа, обтекающий стенку, можно разделить на две области: 1) тонкий пограничный слой, где сопротивление движению определяется вязкостью и инерционными силами, и 2) жидкость снаружи этого слоя, где трением можно пренебрегать и которая может рассматриваться как идеальная (без вихрей). На основании этой идеи Прандтль начал упро-

щать уравнения движения Навье-Стокса путем определения порядка величин различных членов в этих уравнениях. Для ламинарного пограничного слоя на поверхности тел задача о толщине пограничного слоя решается путем интегрирования уравнений, но вычислительная работа трудна и громоздка. Задача еще более усложняется, если пограничный слой становится турбулентным. Позже ученик Прандтля Т.Карман разработал приближенный (интегральный) метод, который до сих пор используется и входит во все учебники по гидродинамике. Особенностью пограничного слоя является его свойство допускать возникновение возвратного течения вблизи стенки. С этим свойством связаны отрыв пограничного слоя от тела и возникновение вихрей в кормовой части обтекаемого тела. Наиболее важный результат этой теории – возможность расчета точки отрыва пограничного слоя от поверхности и определение сопротивления. Эти положения заложили фундамент общих принципов гидромеханики движущейся вязкой жидкости для самых различных областей техники. Первоначальное предположение о том, что пограничный слой всегда имеет ламинарный характер оказалось несостоятельным и пришлось от концепции чисто ламинарного слоя перейти к турбулентному, что усложнило всю задачу. С переходом ламинарного к турбулентному течению связано резкое изменение закона сопротивления в трубе. Для расчета турбулентного пограничного слоя необходимо принять какой-то иной закон распределения скоростей, чем при ламинарном обтекании. При ламинарном течении перепад давления в круглых трубах пропорционален первой степени скорости течения, в то время как при турбулентном он пропорционален почти квадрату скорости («квадратичный закон сопротивления»). Согласно экспериментальным данным для гладких труб при Re =50000 – 200000 коэффициент сопротивления пропорционален $Re^{-1/4}$, что приводит к степенному закону распределения скорости в виде:

$$W = W(\delta)(Y/\delta)^{n},$$

где n = f (Re).

В диапазоне чисел Рейнольдса $10^4 - 10^5$ обычно считают n = 1/7.

Теория подъемной силы. Теорема о подъемной силе крыла была установлена Н.Е.Жуковским в 1904 году, о чем Прандтль в то время, по-видимому, не знал. Позже в своей книге он отметил заслуги Н.Е.Жуковского (см. «Гидроаэромеханика», М..: ИИЛ, 1949, с. 94, 112). Теорема Жуковского определяет подъемную силу на единицу длины крыла в виде соотношения:

$$A = \rho w \Gamma, \qquad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, w – относительная скорость, Г – циркуляция.

Теория, созданная Прандтлем, основывается на системе вихрей — присоединенного вихря на крыле, свободных (подковообразных) вихрей, выходящих с нижней части крыла и несущего вихря с конца крыла.

По проекту Прандтля и под его руководством в 1907 году была создана небольшая аэродинамическая труба в Геттингене, а в годы после Первой

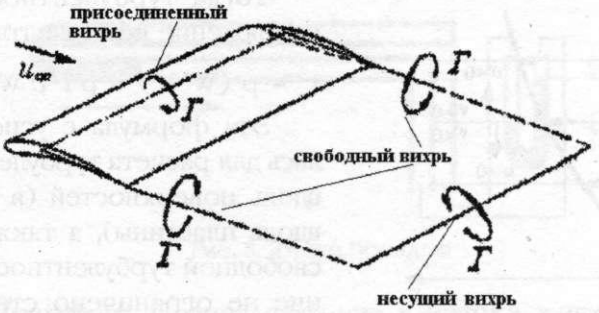


Рис. 4. Система вихрей в теории подъемной силы крыла

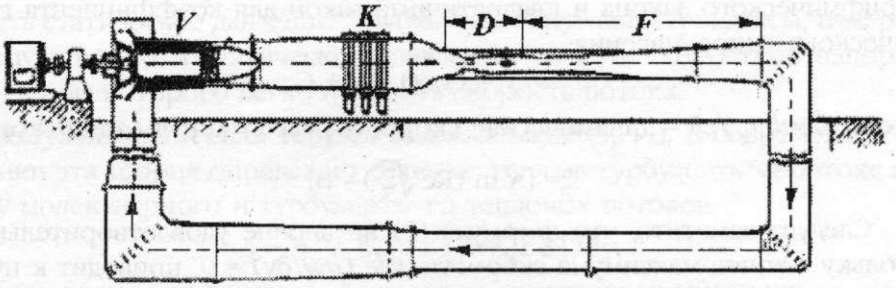


Рис. 5. Аэродинамическая труба в Цюрихе:
V - компрессор, K – холодильник, D – дюза, F – диффузор

мировой войны – вторая, более крупная труба, в Кайзер-Вильгельм институте в 1925 году. Они дали возможность проведения больших исследовательских работ по различным аспектам аэро- и гидродинамики. Поэтому Прандтля рассматривают как отца аэродинамики. Эксперименты, проведенные на этих трубах, позволили ему создать методы проектирования самолетов.

Длина пути смешения Прандтля [11]. Это было первое представление о возможности расчета турбулентных пульсаций скорости в уравнениях Рейнольдса. Основанием этому была аналогия с длиной пути свободного пробега в газокинетической теории газов. Механизм турбулентного течения можно представить, следуя Прандтлю, в виде следующей картины. В турбулентном течении возникают вихри (объемы, моли), каждый из которых обладает собственной скоростью и движется на протяжении некоторого расстояния в виде неразрывного целого с сохранением импульса. Это расстояние (l) Прандтль назвал длиной пути смешения (рис. 6).

Пульсации скорости в потоке считаются пропорциональными этой длине и градиенту скорости:

$$V' = W' = l \,/\, (\partial W/\partial y), \qquad (2)$$

где $l = \chi\, y$, y – расстояние от поверхности, χ – безразмерная величина.

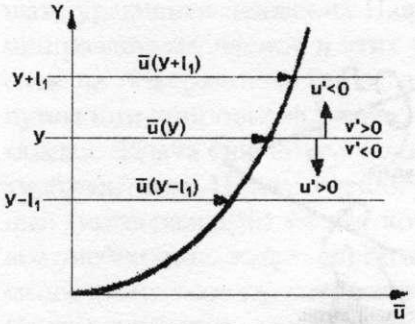


Рис. 6 Концепция длины пути смешения Прандтля

Тогда турбулентное касательное напряжение по Прандтлю будет равно

$$\tau_т = \rho\ (W'\ V') = \rho\ l^2\, \partial\, W/(\partial\, y)^2. \qquad (3)$$

Эта формула с успехом применялась для расчета турбулентных течений вдоль поверхностей (в трубе, канале, вдоль пластины), а также для расчета свободной турбулентности, когда течение не ограничено стенками. Из (3) можно получить распределение скоростей в турбулентном потоке в виде логарифмического закона и квадратичный закон для коэффициента гидравлического сопротивления:

$$W/V_* = (1/\chi)\ \ln y + C. \qquad (4)$$

Здесь $V_* = \sqrt{(\tau_т/\rho)}$ – динамическая скорость (масштаб пульсаций скорости).

$$\xi = [A\ \ln\ (Re\sqrt{\xi}\ ) - B]^{-2}\ . \qquad (5)$$

Следует заметить, что формула (3) не вполне удовлетворительна, поскольку в точке максимума скорости, где $(\partial w/\partial y) = 0$, приводит к нулевой турбулентности ($\tau_т = 0$). Это, безусловно, неверно, так как турбулентный обмен в этой точке не исчезает, что и подтвердили измерения пульсаций скорости, выполненные учеником Прандтля Г.Рейхардтом. Дальнейшее развитие теории длины пути смешения было дано в работах Кармана, Тейлора и др. Выражение $l = \chi \cdot y$ отражает первое приближение. В 60-х годах было установлено, что в пристенной области нет слоя, в котором длина пути смешения изменялась бы линейно. Влияние ядра потока распространяется до стенки. Имеется лишь тонкий слой (δ), безразмерной толщиной $\delta V^*/\ \nu = 1{,}6 \pm 0{,}4$, в котором градиент скорости лишь в среднем постоянен все время. В действительности мгновенное распределение скорости даже в этом тонком слое изменяется во времени.

Число Прандтля – число подобия, отношение кинематической вязкости к температуропроводности.

$$Pr = \nu/a = (\mu/\rho)\ (\rho C/\ \lambda) = \mu C/\lambda. \qquad (6)$$

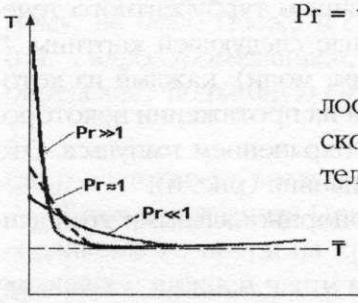


Рис. 7. Распределение температуры в потоках жидкостей с разными числами Pr

Это число играет большую роль в законах теплообмена и отражает соотношение между полями скоростей и температур в потоке. Все теплоносители делятся на три класса:

1. При $Pr \approx 1$ – обычные среды (воздух, газы, вода).
2. При $Pr \gg 1$ – вязкие жидкости (масла и др.).
3. При $Pr \ll 1$ – жидкие металлы.

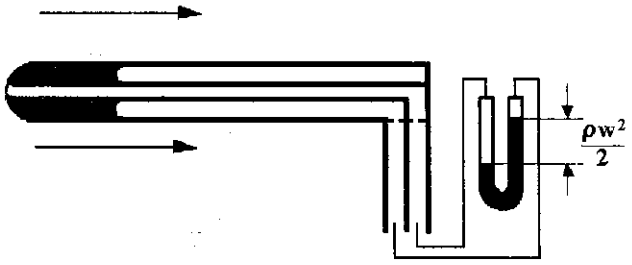


Рис. 8. Трубка Прандтля

Трубка Прандтля. Полное давление в потоке жидкости измеряется трубкой Пито — $P + \rho W^2 / 2 = const$, где P – статическое давление, ρ - плотность. Для измерения скорости (W) необходимо из полного давления вычесть статическое давление. Трубка, предложенная Прандтлем, измеряет разницу полного и статического давления, то есть скоростной напор — ($\rho W^2 / 2$), из которого легко получить скорость потока.

Полуэмпирическая теория теплообмена [4, 11]. В современном изложении эта теория определяет перенос тепла в турбулентном потоке как сумму молекулярного и турбулентного тепловых потоков:

$$q = q_м + q_т = -(\lambda+\lambda_т)\, dT/dy. \qquad (7)$$

Аналогично для переноса количества движения можно записать сумму касательных напряжений (молекулярного и турбулентного)

$$\tau = \tau_м + \tau_т = (\mu+\mu_т)\, dW/ dy. \qquad (8)$$

Здесь $\lambda_т$, $\mu_т$ – турбулентная теплопроводность и турбулентная вязкость. Несложные преобразования приводят к соотношению, отражающему подобие процессов переноса тепла (q) и количества движения (τ):

$$\frac{q_т}{q_м} = \frac{a_т}{a}\frac{\nu}{\nu_т}\frac{\tau_т}{\tau_м} = \frac{Pr}{Pr_т}\frac{\tau_т}{\tau_м}, \qquad (9)$$

где $a = \lambda / C\rho$; $\nu = \mu / \rho$; $a_т = \lambda_т / C\rho$; $\nu_т = \mu_т / \rho$; $a_т$, $\nu_т$ – коэффициенты турбулентного обмена теплом и количеством движения; $\nu/a = Pr$; $\nu/ a_т = Pr_т$ – турбулентное число Прандтля, величина, близкая к единице.

Для сред с $Pr = 1$ и $Pr_т = 1$ получаем совсем простое выражение:

$$(q_т / q_м) = (\tau_т / \tau_м), \qquad (10)$$

отражающее так называемую аналогию Рейнольдса между переносом тепла и количества движения. Следствием (10) является выражение:

$$Nu / Re = \xi/8, \qquad (11)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления.

Заметим, что для сред с $Pr>>1$ даже небольшая турбулентность $(\tau_т / \tau_м)<1$, приведет к отношению $(q_т / q_м)>> 1$, т. е. резко повысит интенсивность теплообмена.

Прандтлем была предложена двухслойная модель турбулентного потока. В ламинарном слое толщиной y_a пренебрегается турбулентным обменом, а в турбулентном ядре потока ($y > y_a$) — молекулярным переносом количества движения и тепла. Тогда, сравнивая (7) и (8), получим:

для ламинарного пристенного слоя

$$\frac{dw}{dy} = -\frac{\tau C_p}{q}\frac{dT}{dy}\frac{1}{Pr}; \tag{12}$$

для турбулентной части потока

$$\frac{dw}{dy} = -\frac{\tau C_p}{q}\frac{dT}{dy}\frac{1}{Pr}. \tag{13}$$

После интегрирования (12) в пределах от $y = 0$ до $y_a = 11{,}7\nu/V_*$ – границы ламинарного слоя (что было определено учеником Прандтля Никурадзе), а также используя закон трения Блазиуса

$$\xi = 0{,}316\,\mathrm{Re}^{-0{,}25}, \tag{14}$$

приходим к формуле для расчета теплообмена в виде:

$$\frac{Nu}{Re} = \frac{\xi}{8}\left[1 + 11{,}7\sqrt{\frac{\xi}{8}}(Pr-1)\right]^{-1} = \frac{\xi}{8}\left[1 + 1{,}74\,\mathrm{Re}^{-0{,}125}(Pr-1)\right]^{-1}. \tag{15}$$

Формула (15) была выведена Прандтлем (1910, 1928 гг.).

Дальнейшее развитие полуэмпирической теории теплообмена связано с учениками Прандтля – Теодором Карманом [45], Рейхардтом [46] и другими. Более поздние разработки, после третьей мировой войны, были выполнены Мартинелли [47], Лайоном [48], , Б.С. Петуховым [49], С.С. Кутателадзе [53].

Избранные труды Прандтля

1. Prandtl L. Kipp-Erscheinungen: Ein Fall von instabilen elastischen Gleichgewicht. — Dissertation, 1899.
2. Prandtl L. Zur Torsion von prismatischen Staben.-Phys. Zeitschrift, 1903, Bd. 4, s. 758-759.
3. Prandtl L. Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung.— 3-Intern. Math.-Kongr. Hiedelberg, 8 –13 Aug. 1904, Leipzig, Teubner, 1905, s. 484–491.
4. Prandtl L. Eine Beziehung zwischen Wärmeaustausch und Strömungswiderstand der Flüssigkeit.— Phys. Zeitschrift, 1910, Bd. 11, s. 1072-1078.
5. Prandtl L., Verhanlungen zur Furderung der angewandten Physik und Mathematik, Goettingen, Munchen, 1912.
6. Prandtl L. Tragflügeltheorie 1-st Mitteilg. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-Phys.Kl., 1918, s. 151-177; sowie: Tragflügeltheorie 1-st Mitteilg. Nachr. Ges. Wiss., Göttingen, Math.-Phys. Kl., 1918, s. 107-137.

7. Prandtl L., Betz A. Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchanstalt zu Goettingen, Lief.1, 1921; Lief.2, 1923; Lief.3, 1935.
8. Prandtl L. Bericht über Untersuchugen zur ausgebilderen Turbulentz.— Zeitschrift Angew. Math. Mech., 1925, Nr. 5, s. 136-139.
9. Betz A., Prandtl L. Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und Aerodynamik, Goettingen, 1927.
10. Prandtl L. The Generation of Vortices in Fluids of Small Viscosity London, 1927.
11. Prandtl L. Bemerkung ьber den Wärmeübergang im Rohr. — Phys. Zeitschrift, 1928, Bd. 29, s. 487-489.
12. Prandtl L., Tietjens O.K.G. Hydro- and Aeromechanik nach Vorlesungen von L. Prandtl Bd.1, Gleichgewicht und reibungslose Bewegung, Berlin, 1929.
13. Prandtl L. and Busemann A. Näherungsverfahren zur zeichnerichen Ermittlung von obenen Strömungen mit Überschallgeschwindigkeit. Festschrif zum 70 Geburrtstag von Prof. Dr. A. Stodola. — Zürich, 1929, s. 499-509.
14. Prandtl L., Tietjens O.K.G. Hydro- and Aeromechanik nach Vorlesungen von L. Prandtl Bd.2, Bewegung reibender Flussigkeiten und technische Anwendungen, Berlin, 1931.
15. Prandtl L. Herstellung einwandfreiers Luftstrume, Leipzig, 1932.
16. Prandtl L., Tietjens O.K.G. Appllied Hydro- and Aeromechanics, New York, 1934.
17. Prandtl L. Abriss der Strömungslehre, Braunschwieg, 1935.
18. Prandtl L., Mesmer G., Anschauliche und nutzliche Mathematik. Offentliche Vorlesungen Im Wintersemester 1931/32, Goettingen, 1937.
19. Prandtl L. Über neuere Arbeiten zur Theorie der tragenden Flasche/ Proc. of the 5-th Intern. Congress for Appl. Mechanics, Cambridge, Massachusetts, Sept. 12-16, 1938.
20. Prandtl L., Über Schallausbreitung bei rasch bewegten Kurpern/ In Jahrbuch 1938/1939 der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung, 1939.
21. Prandtl L. Führer durch die Strömungslehre, 1.Auflage, Braunschwieg , 1942, 2. Auflage, 1944, 3-Auflage des Abrisses der Strömungslehre / (Рус. перевод со 2-го нем. изд. «Гидроаэромеханика», М.: ИИЛ, 1949.).
22. Prandtl L. Neuere Erkentnisse der Meteorologischen Strömungsforschung, Göttingen, 1944, KWI-44/P/02.
23. Prandtl L., Über Reibungsschichten bei dreidimensionalen Strömungen, Göttingen, 1945.
24. Prandtl L. Über ein neues Formelsystem fur die ausgebildete Turbulenz, Göttingen, 1945.
25. Prandtl L. Zum Wesen der Oberflüchenspannung Vorvielfältigt (1944), Ann. Phys. 6, folge, 1947, Bd. 1, s. 59-64.
26. Prandtl L. Mein Weg zu hydrodynamischen Theorien.— Physikalische Blätter, 4 Jg., 1948, s. 89-92.

27. Prandtl L. Erzeugung von Zirkulationen beim Schütteln von Gefässen.— ZAMM, 1949, Bd. 29, s. 8-9.

28. Prandtl L. Wettervorgänge in der oberen Troposphäre. Göttingen 1949 in: Nachrichten von der Akademie der Wisenschaft in Göttingen. Math.-phys. Kl., 1949, s. 13-18, Abb.

29. Betz A., Tollmien W., Prandtl L. und and., Naturforschung und Medizin in Deutschland 1939-1946, Bd.11, Hydro- und Aerodynamik, Weinheim, 1953.

30. Tietjens O.G., Prandtl L., Applied Hydro- and Aerodynamics: Based on Lectures of L.Prandtl, New York, 1957.

31. Tietjens O.G., Prandtl L., Fundamentals of Hydro- and Aerodynamics: Based on Lectures of L. Prandtl, New York, 1957.

32. Prandtl L. «Gesammelte Abhandlungen zur angewanden Mechanik, Hydro- und Aerodynamik. 3 Bd. Herausgegeben von W. Tollmien, H. Schlichting und H. Götler.-Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1961.

Публикации о Прандтле его сотрудников и последователей

33. Blasius H. Grenzschichten in Flussigkeiten mit kleiner Reibung.— Dissertation, Göttingen, 1907.

34. Meyer Th. Über zweidimensionale Bewegungsvorgänge in einem Gas, das mit Überschallgeschwindigkeit strömt. — Dissertation, Göttingen, 1908.

35. Blasius H. Das Ähnlichkeitsgesetz beiReibungsvorgängen in Flüssigkeiten. - Forschungsheft Arb. Ing.— Wes, 1913, No. 131, Berlin.

36. Von Karman Th. Über laminare und turbulente Reibung.-ZAMM, 1921, Bd. 1, s. 233-252.

37. Busemann A. Vorträge aus dem Gebiet der Aerodynamik.— Aachen, 1929.

38. Glauert H. The effect of compressibility on the lift of an aerofoil. — Proc. Roy. Soc., A, 1929, Bd. 118, s. 113.

39. Von Karman Th. Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz, Nachricht Gessel.— Wisschenschaft Göttingen Math. Phys. Klasse, Heft 5, 1930, s. 58-76.

40. Nikuradse J. Laws of resistance and velocity distribution for turbulent flow of water in smooth and rough tubes.— Proc. 3rd Int. Congress for Appl. Mech., Stockholm, 1930, v. 1, p. 239-248.

41. Nikuradse J. Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in Glatten Rohren. — VDI-Forschungheft, 1932, No. 356 (Рус. перевод в сб.: Проблемы турбулентности.— М.-Л.: ОНТИ, 1936, с. 75-150).

42. Nikuradse J. Strömungsgesetze in rauhen Rohren.— VDI-Forschungheft, 1933, No. 361.

43. Von Karman Th. Some aspects of the turbulence problem.— Proc. 4th Int. Congress for Appl. Mech., 1934, p. 54-91.

44. Von Karman Th. The fundamentals of the statistical theory of turbulence. — Journal of Aeronautical Sci., 1937, v. 4, No. 4, p. 134-138.

45. Von Karman Th. The analogy between fluid friction and heat transfer. — Trans. ASME, 1939, v. 61, p. 705-710.

46. Reichardt H. Die Wärmeübertragung in turbulenten Reibungsschichtenn. — ZAMM, 1940, v. 20, p. 297-328.

47. Martinelli R.C. Heat transfer to molten metals. — Trans. ASME. 1947, v. 69, N8, p.947-959.

48. Lyon R.N. Liquid metal heat transfer. — Chem. Eng. Progress. 1951, v.47, №2, P. 75-79.

49. Петухов Б.С., Кириллов В.В. К вопросу о теплообмене при турбулентном течении жидкости в трубах // Теплоэнергетика, 1958, №4, с.53-69.

50. Schlichting H. Entstehung der Turbulenz.— Berlin, 1959. (Рус перевод «Возникновение турбулентности», М.: ИИЛ, 1962г.

51. Schlichting H. Grenzschicht Theorie. 5 erweit und bearbeit Auflage.— Karlsruhe (Рус. перевод с 5 нем. изд. «Теория пограничного слоя». — М.: Наука, 1974).

52. Max-Plank-Institute fur Strömungsforschung Göttingen: 50-Jahre Max-Plank-Institute fur Strömungforschung Göttingen 1925-1975; Festschrift zum 50 jahrigen Bestehen des Institutes, Göttingen, 1975.

53. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд 5-е, М.: Атомиздат, 1979, гл. 11.6-11.7.

54. Rotta J.C., Ein geschichtlicher Ruckblik auf Anfange der Grenzschichtforschung 1904 -1934, 1982. (Jahrbuch der Deutschen Geselschaft fur Luft-und Raumfahrt –DGLR-Bd.4, 1981).

55. Prandtl L., Buseman A.: Ludwig Prandtl and his Kaiser-Wilhelm-Institut, in «Annual Review of Fluid Mechanics», v.19, 1987.

56. Oswatitsch K. und Wieghardt K. «Ludwig Prandtl and his Kaiser–Wilhelm-Institut». — Ann. Rev. Fluid Mech., 1987, Bd. 19, s. 1-25.

57. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 6-е, перераб. и доп. — М.: Наука, 1987.

58. Rotta J.C., Die Aerodinamische Versuchanstalt in Göttingen, Ein Werk Ludwig Prandtls, Ihre Geschichte von den Anfangen bis 1925, Göttingen, 1990.

59. Rotta J.C., Dokumente zur Geschuchte der Aerodinamischen Versuchanstalt Gottingen, 1907-1925, Koeln, 1990.

60. Vogel- Prandtl J. «Ludwig Prandtl. Ein Lebensbild, Erinnerungen, Dokumente. Mit Max-Planck-Institut fur Strömungsforschung». — Göttingen, 1993, Nr. 107.

61. Лойцянский Л.Г. Из моих воспоминаний. — С-Пб.: «ТОО Б.С.К.», 1998.

Даты биографии

1875 Родился 4 февраля 1875 г. во Фрайзинге, вблизи Мюнхена.

1900 Получил степень доктора философии за представленную диссертацию «Явление опрокидывания, как пример нестабильного упругого равновесия», после двух лет работы в фирме MAN в Нюренберге.

1901 Получает должность штатного профессора в Высшей технической школе Ганновера по кафедре механики. Через год (1902) назначается заведующим кафедрой механики.

1904 На 3 Международном конгрессе по математике делает доклад о пограничных слоях. Назначается на должность адъюнкт-профессора в Геттингенском университете.

1905 Основание института прикладной математики и механики при Геттингенском университете под руководством Карла Рунге и Людвига Прандтля.

1906 Основание «Общества изучения аэро- и корабельных моторов».

1907 Прандтль становится штатным профессором. Основание по проекту Прандтля «Геттингенского института моделирования», позднее «Аэродинамический исследовательский институт Геттингена» (AVA).

1909 Прандтлю присуждается первое профессорское звание в области авиационных наук.

1910 Начинает работать первая газодинамическая труба типа «Геттинген» с закрытым контуром.

1911 Вместе с Гуго Хергеселлом подготавливает отчет «Государственный исследовательский институт воздухоплавания», в котором обосновывает создание «Немецкого исследовательского института воздухоплавания» (DVL).

1912 Вместе с сотрудниками создает «Научное общество воздухоплавания».

1918 Публикует теорию подъемной силы крыла.

1920 Прандтлю повторно присуждается звание профессора механики Высшей технической школы Мюнхена; в 1923 г. он отказывается от этого звания.

1921 Назначается на должность штатного профессора нового Института технической физики и аэронавтики при Геттингенском университете.

1922 По инициативе Прандтля, Мизеса и Райзнера основывается общество прикладной математики и механики (GAMM). Председа-

телем общества Прандтль остается до 1950 года. Избирается членом «Общества Кайзера Вильгельма».

1925 Назначение директором «Кайзер Вильгельм института» (KWI).

1928 Основание Прандтлем, Карманом и министром транспорта Бранденбургом «Немецкого Совета по воздухоплаванию».

1936 Избрание членом правления «Общества Лиленталя по исследованию воздухоплавания», членом комитета «Немецкой Академии воздухоплавания».

1937 Прандтль передает руководство AVA Альберту Бетцу после разделения AVA и KWI; он остается председателем Совета KWI.

1942 Издан «Путеводитель по гидродинамике». Назначение председателем «Государственного Управления по исследованию воздухоплавания».

1946 Прандтль покидает пост руководителя KWI, остается Почетным членом Геттингенского университета.

1953 Скончался 15 августа в Геттингене.

Приложение к письму проф. Прандтля от 28 апреля 1941 г. господину рейхсмаршалу Герману Герингу

1. О теоретической физике

Задача теоретической физики — построить логически непротиворечивую концепцию, с помощью которой наблюдательные факты могут быть так систематизированы, что даже далеко расположенные факты найдут общее и вместе с тем как можно точное объяснение. Полученные в результате этой работы законы могут потом наоборот снова служить для предсказания новых экспериментальных фактов.

От любой теории необходимо требовать, чтобы в ней не было логических противоречий, и чтобы она была справедлива в своих результатах к фактам. В зависимости от гипотез, которые кладут в основу теории, для одной и той же группы фактов может иметься также несколько различных теорий. Если теперь устанавливается новый факт, который соответствует одной из этих теорий и при этом противоречит другой, то эту другую теорию необходимо оставить. Это случилось на рубеже нового столетия благодаря экспериментальным выводам, которые были получены в результате так называемого интерференционного опыта Майкельсона. По концепции пространства-времени Ньютона, считающейся до того времени бесспорно верной, этот эксперимент должен был доказать наличие относительной скорости Земли относительно мирового эфира, однако несмотря на неоднократное усовершенствованное повторение всегда давал отрицательный результат (вместо смещения полос интерференции — его отсутствие). Этим было доказано, что концепция пространства-времени Ньютона была принципиально неверной. Конечно, различия для всех земных процессов настолько малы, что эту старую концепцию пространства–времени можно было бы все же практически и дальше использовать. Х. А. Лоренц в Лейдене смог тогда показать, что уравнения электродинамики Максвелла не приводят к противоречиям с новыми экспериментальными фактами, а также нет противоречия в том, когда мир явлений понимают как состоящий из электродинамических процессов. С точки зрения точности теперь требовалась ясная формулировка концепции пространства–времени, которая с абсолютной точностью станет справедливой в отношении новых фактов. Впервые подобную формулировку дал А. Эйнштейн. Его система не содержит внутренних противоречий, при этом согласно вышесказанному не является, конечно, единственно возможным решением, однако она, вероятно, самая простая.

В отношении этого факта группа Ленарда подобно страусу прячет голову в песок и все еще придерживается концепции пространства–вре-

мени Ньютона, несмотря на то, что она уже давно разрушена благодаря эксперименту Майкельсона. Концепция пространства–времени Эйнштейна, которая ясно мыслящими физиками во всем мире признана лучшим в настоящее время решением и которая уже давно стала неотъемлемым основанием дальнейшего развития физики, по мнению группы Ленарда просто не имела права быть верной, так как ее создатель был евреем. Все далеко идущие исследования, которые арийцы с тех пор проводят с помощью новых инструментов, являются также в глазах ленардовских людей «еврейской физикой».

Нечто иное происходит с квантовой теорией, зарождение которой тоже восходит к началу этого столетия. Человеческий интеллект, относящийся к физике, развивался на основании видимого мира. Он, согласно нынешнему установленному знанию, состоит из маленьких частиц (атомов), которые сами тоже построены из более мелких элементов. Во всех видимых процессах даже на мельчайшем пространстве имеют дело еще с огромной массой таких частиц, и казалось, что во всех процессах видна строгая закономерность причины и следствия, из которой вывели «принцип причинности». Вся прежняя теоретическая физика построена на подобных причинных связях отдельных величин.

В настоящее время, когда научное исследование давно проникло вглубь атомов и когда в некоторой степени имеют дело с основными элементами материи (при помощи определенных методов эти отдельные объекты становятся видимыми), выяснилось, что здесь понятие причинности перестает действовать, и оно должно быть заменено статистическим понятием вероятности. (При распадающихся атомах радия, например, нельзя никоим образом указать, когда определенный атом радия распадется. Но можно указать среднее количество, которое из данного количества радия распадется через час или через год. Подобного рода вещи не ограничиваются радием, а имеют место при всех процессах в атоме.) Прежняя причинная связь оказывается просто «законом больших чисел», каким он встречается в вопросах о статистических совокупностях каждого вида. Чем больше число, тем меньше случайных отклонений от того, что должно было ожидаться «казуальным». Преобразования энергии в атомах, про которые в частности тоже не знают, когда и где они возникнут в единичном случае, обладают, кроме того, таким свойством, что в зависимости от вида преобразования одновременно всегда появляются совершенно определенные кванты энергии (отсюда название квантовой теории). С такого рода концепциями огромное количество старых и новых наблюдательных фактов можно было привести в логически единую систему. И это считается людьми Ленарда «еврейской физикой», возможно, по принципу, который я случайно услышал: «То, что я не могу понять, я считаю еврейским». Конечно, есть вклад и евреев в эту часть научного развития, но подавляющую часть создали такие люди как Планк и Зоммерфельд до Гейзенберга и Шрёдингера.

2. Подробности о группе Ленарда

1. Ленард в своих экспериментальных исследованиях, вероятно, открыл бы рентгеновские лучи, если бы его не опередил Рентген. Его имя стало известным. Правда, математическая теория его никогда не интересовала, и все было бы хорошо, если бы он не начал спорить о математике. На старости лет он написал многотомный учебник «Немецкая физика». В этом учебнике уже в самых простых закономерностях обычной механики не хватает ясности и строгости. До некоторой степени его еще можно использовать как учебник для начальной школы, но ни в коем случае его не хватит для высшей ступени.

2. Другой представитель Йоханнес Штарк, бывший президент Имперского физико-технического института. Господина Штарка я знаю, как страстного и незаурядного человека со времен, когда он был приват-доцентом в Геттингене. Он является весьма блестящим экспериментатором, сделал два открытия величайшего значения, из которых одно, называемое «эффектом Штарка», сделало его имя бессмертным. Насколько мне известно, он никогда не занимался теорией, что не помешало ему в невероятно язвительных статьях, в «Шварцен Корпс», безмерно обругать Планка и Гейзенберга.

3. Группа имеет несколько сподвижников, которые в основном занимаются экспериментами и делают работу по их способностям. Наряду с этим находятся также люди, которые считают себя непризнанными гениями, которые в былые времена из-за отсутствия достижений не смогли добиться успеха и в условиях национально-социалистического перелома почуяли возможность выгоды. Некоторые очень плодотворно занимаются реформированием философских основ физики, особенно концепцией пространства-времени. Для всех этих людей эксперимент Майкельсона не играет никакой роли, они остаются во власти концепции пространства-времени Ньютона.

4. Особое дело с Вильгельмом Мюллером — последователем всемирно известного мюнхенского теоретика Зоммерфельда. Зоммерфельду, наряду со многим другим, мы обязаны созданному закону спектральных линий. Вильгельм Мюллер был ассистентом и позже профессором технической механики сначала в Ганновере, потом в Праге и Аахене, и до сих пор занимался главным образом аэрогидродинамикой (теорией течений) и аэромеханикой, писал учебники по этим направлениям. В теоретическую физику он не привнес ровным счетом ничего. Вместо того, чтобы читать физикам необходимые им такие предметы, как электродинамика, электронная теория, оптика и теория излучения, термодинамика, математическая статистика и частные дифференциальные уравнения физики, он читает лекции по своим собственным данным по аэромеханике (аэродинамике) и инженерной механике. Нельзя не признать полезности того, что слушатели в университете узнают что-то и об этих вещах, но когда из-за этого им не дают весьма значительной части физики, то это создает ситуацию, которую

можно охарактеризовать только как саботаж (диверсия). Господин Мюллер подробно высказался о своей программе в «Журнале по вопросам общего естествознания», выпуск ноябрь-декабрь 1940, с. 281-298. В этой статье под названием «Положение теоретической физики в университетах» он не упустил возможности высказать много недружелюбного в адрес немецких представителей теоретической физики. Физическое кредо группы Ленарда полагает, что на стороне теоретиков действует «таинственная группа авторитетов». Он также принуждает следовать определенной программе и угрожает каждому, кто отважится высказать свое собственное мнение независимо от его группы. Я должен отметить, что «таинственные авторитеты» являются ничем иным, как экспериментальными фактами. В угрозе инакомыслящим речь идет ни о чем другом, как об отказе дискуссии с упрямцами, которые не хотят видеть факты. О господах Штарке и Мюллере в настоящее время можно прочитать в выпуске «Еврейская и немецкая физика» издательства Хелинга в Лейпциге. В нем объявляется решительная борьба: «В противовес догматизму все еще находящемуся во власти еврейского духа, который служит не правде и знанию, а стремится совершить насилие над природой и понизиться до всего лишь прислуги предписания». Необходимо также изложить «основополагающее различие между еврейской физикой и находящейся под влиянием евреев теоретической физикой и немецкой прагматичной теорией», которая старается обратно привести к простейшей наглядно понятной системе причинных закономерностей».

Я думаю, что этих примеров хватает, чтобы в достаточной мере охарактеризовать позицию сотрудников группы Ленарда.

Л. Прандтль

Эрнст Крафт Вильгельм Нуссельт

25.11.1882 — 01.09.1957

Немецкий ученый, крупнейший специалист в области теплообмена родился в Нюренберге, Германия. Он происходил из старофранкского рода. Его дед был ювелиром, состоятельным человеком, владел большим имуществом. Молодой Вильгельм рос в обеспеченной семье Иоганна Нуссельта, бывшего директора банка и владельца фабрики, которая выпускала золотые нити.

Детство и молодые годы Вильгельм провел в своем родном городе, здесь же учился в реальном торговом училище, а также на технико-механическое отделении промышленной школы. В свидетельстве об окончании школы отмечается его прилежание, хорошие знания в математических и естественных дисциплинах, но слабое знание языков.

Хотя он неохотно посещал школьные занятия, но проявившийся творческий характер привел его к мысли поступить на машиностроительный факультет Высшей технической школы (университета) в Мюнхене. После одногодичной общей подготовки он перешел сначала на аналогичную специальность в Технический университет в Берлине-Шарлоттенбурге, затем вернулся в Мюнхен. Все эти переходы не помешали ему получить хорошую подготовку по математике и физике.

Во время практики на машинной фабрике Аугсбург-Нюренберг он работал в большом конструкторском бюро чертежником. Однако такая деятельность его не удовлетворяла, и впоследствии он всегда старался избегать работ на промышленных предприятиях.

При экономической помощи от родителей (100 марок в месяц) он стал студентом Высшей технической школы Мюнхена, где в течение двух лет учился математике и физике. Особенный интерес у него вызывали лекции Оскара Кноблауха: «Применение термодинамики к физико-химическим явлениям», «О проведении работ в области технической физики». Позднее они оказали значительное влияние на его инженерную и преподавательскую деятельность.

После окончания Мюнхенского университета в 1904 г. по специальности машиноведение В. Нуссельт работал ассистентом в лаборатории Кноблауха в Мюнхене, где продолжал совершенствовать свои знания по физике и математике. Это была первая исследовательская лаборатория в Германии, созданная в 1902 г. известным ученым Карлом Линде.

В технике в то время для решения отдельных задач теплопередачи было уже достаточно полученных знаний, но общие закономерности процессов теплообмена отсутствовали. Стояла задача — установить законы переноса тепла от твердого тела к текущей жидкости или газу. Нужно было отыскать научные подходы для нахождения перепадов температур между поверхностью тела и текущей жидкостью. Кноблаух обратил его внимание на необходимость именно научного решения этой проблемы.

Нуссельт переезжает в Дрезден и переходит в новую научную школу технической термодинамики, которую организовал знаменитый немецкий ученый Густав Цейнер. Эту типично немецкую школу отличали такие особенности стиля как:

- стремление иметь четкое и ясное представление физических и математических сторон явления;
- сбор фактов и рассмотрение явления как следствие определенного закона;
- использование простых моделей, полнота математического описания явления;
- экспериментальное подтверждение предложенного описания;
- наглядные, ясные графические представления;
- немедленная публикация основных результатов.

Положение Нуссельта в цейнеровской школе было достаточно прочным, несмотря на то, что сам Цейнер работал в достаточно узкой области — над паровыми машинами. Основная тематика в школе — техническая термодинамика в приложении к холодильным и паровым машинам, сгоранию угля, к процессам в химической промышленности

С 1907 г. Нуссельт работал ассистентом у проф. Моллье (Mollier), известного во всем мире как первого составителя таблиц термодинамических свойств водяного пара. Здесь исследовательские работы концентрировались на уточнении уравнения состояния водяного пара и на решении основных проблем теплопередачи. Об этом подробно описано в публикации Моллье в журнале немецкого общества инженеров [2], где, как правило, публиковалось не то, что уже твердо установлено, но новые решения проблем и обсуждения путей дальнейших исследований по теплопередаче.

На своем 50-летнем юбилее Нуссельт вспоминал, что начало его серьезной научной деятельности было связано с экспериментом по изучению теплопроводности изоляционных материалов предложенным им методом сферы (метод позже названный «сферой Нуссельта»). Этим методом он измерил теплопроводность 18 материалов и 06.06.1907 опубликовал статью «Теплопроводность изоляционных материалов» [1]. За эту работу ему была присуждена степень Доктора-инженера.

Несколькими годами позже Нуссельт писал: «*Теплота имеет много форм энергии, которые используются в технике, но один важный момент надо иметь в виду — все технические процессы в конце концов переходят в тепло, которое переносится в атмосферу или к охлаждающей воде... Наблюдая за потоком энергии в отдельной машине или аппарате, мы должны знать, как при этом происходит перенос теплоты от одного тела к другому. Более того, способность производить работу и срок службы машин и аппаратов ограничивается существующими в них перепадами температуры. Мы должны уметь делать такие расчеты уже при проектировании, и для этого необходимо знание законов теплопередачи*».

Моллье очень рано распознал наклонности и организационные способности Нуссельта, дружелюбное отношение к людям и предложил Министерству культуры и образования Саксонии пригласить его, как неординарную личность, для преподавания. Министерство разрешило принять его с месячным окладом в 125 марок сначала в качестве помощника ассистента. Большую роль в предложении Моллье сыграла его сестра Хильда, которая помогала Нуссельту в измерениях теплопроводности и в подготовке его публикации. У Моллье Нуссельт занимался исследованиями теплопередачи. 1907-1916 годы — наиболее плодотворный период его научной деятельности. В феврале 1909 г. он представил работу «Теплоотдача в круглых трубах» [2] и в мае того же года был утвержден в звании доцента.

В этой работе он впервые на основании строгих уравнений гидро- и термодинамики, а также на основании молекулярно-кинетических представлений, дал метод расчета коэффициента теплоотдачи. Важным результатом было установление зависимости интенсивности теплоотдачи от объемной теплоемкости и факта снижения теплоотдачи со снижением теплопроводности газа. Впервые на основании теории подобия были установлены критерии процессов теплообмена.

В июле 1909 г. Нуссельт перешел на работу в машиностроительную фирму братьев Зульцер для приобретения практических знаний в способах нагрева. Эта фирма была основана в 1834 г. и к тому времени стала известной во всем мире. Она выпускала паровые и другие машины, нагреватели разных видов, которые имели заслуженную репутацию и получили золотые медали на Всемирной выставке в Париже в 1900 г. Работа в фирме оказала большое влияние на последующую научную деятельность Нуссельта. Отличные знания, широкий кругозор и собственная инициатива стали фундаментом для его дальнейших научных успехов.

После возвращения в лабораторию машиноведения в Дрезден в 1910 г. он продолжал исследования по теплопередаче между твердой поверхностью и жидкостью или газом с целью создания практических рекомендаций для расчетов. В этом плане следует отметить его работу 1914 года «Теплопередача в газовых машинах» [5].

В 1915 г. Нуссельт публикует свою основную работу «Основные законы теплопередачи» [6], в которой впервые предложил использовать безразмерный комплекс величин, называемый теперь его именем (число Нуссельта), который является одним из основных чисел подобия в теории теплообмена. Это одна из основополагающих работ в науке о теплообмене.

Здесь же он занимался проблемами сгорания каменных углей, процессами взрывов газовоздушных смесей при соприкосновениях с нагретой поверхностью. В результате появилась статья «Сжигание и газификация углей на колосниковых решетках» [7]. Обе работы стали классическими в области теплотехники.

Им было показано, как можно многие параметры, от которых зависит интенсивность теплообмена, свести к небольшому количеству безразмерных комплексов. При этом можно установить, какие параметры оказывают слабое влияние, а какие являются существенными. Рассматривая дифференциальные уравнения теплопроводности и диффузии, Нуссельт пришел к выводу об аналогии процессов переноса тепла и массы.

С 1 апреля 1913 г. его назначили адъюнктом лаборатории машиноведения, а с 19.02.1915 г. он становится неординарным профессором. Во времена первой мировой войны он был освобожден от военной службы по здоровью.

Педагогическая деятельность Нуссельта в Дрездене не прерывалась с 1910 по 1918 гг. Он читал курс «Отопление и вентиляция», в котором рассматривал теорию, вычисления и конструирование, а также другие курсы — «Основы техники полета», «Теория пропеллера», «Измерения в технике».

Научная деятельность помогла Нуссельту обзавестись семьей. 12 декабря 1917 г. он женился на Сюзанне Тюрнер, которая была первой женщиной в Высшей технической школе Дрездена, слушала его лекции, а также лекции по физике, химии, ботанике. От этого счастливого брака у них были две дочери и сын. Разумеется, перед ним был пример Пьера и Марии Кюри, но к большому разочарованию из-за проблем со здоровьем жены он не мог привлечь ее к своей работе.

С 1915 г. он — экстраординарный профессор в Высшей технической школе Дармштадта. Другие знаменитые его работы связаны с пленочной конденсацией неподвижного водяного пара на вертикальной поверхности. В [8] впервые были записаны и решены основные уравнения движения и энергии для этой задачи. Это решение до сих пор цитируется в большинстве учебников по теплообмену и приложимо для расчетов промышленных конструкций, несмотря на наличие более сложных теорий, в которых учитываются многие дополнительные, но менее существенные факторы.

Известны его работы по сжиганию распыленных углей, а также по аналогии между переносом тепла и массы при испарении. Среди преимущественно математических работ Нуссельта надо упомянуть хорошо известные решения для теплообмена при ламинарном течении на входном участке трубы, задачу о поперечном обтекании цилиндра и создание основ расчета регенеративных теплообменников.

После первой мировой войны с января 1918 г. он работал инженером в технической лаборатории Баденской анилиновой и содовой фабрики в Людвигсхафене, занимался решением задач по охлаждению азотной кислоты. О его деятельности в то время с благодарностью писалось в отчетах концерна Карл-Бош Фарбен-индустри.

В 1919-1920 гг. Нуссельт возвращается на работу в Высшую техническую школу в Дармштадте. С мая 1919 г. он — приват-доцент, позже становится экстраординарным профессором. В апреле 1920 г. он по приглашению переходит в Высшую техническую школу в Карлсруэ на должность штатного профессора по машиноведению и одновременно директором лаборатории тепловых и энергетических машин. Здесь он продолжает исследования по теплоотдаче, получает ряд простых формул для расчетов коэффициентов теплоотдачи плоской стенки при естественной конвекции, а также для пучков труб паровых котлов.

С января 1922 г. он курирует Физико-технический Государственный институт в Шарлоттенбурге, выступает как приемник профессора Линде в области технической термодинамики, подобно другим ученым — Бушу, М. Якобу.

В 1920 - 1925 гг. Нуссельт — ординарный профессор в Высшей технической школе (Технический университет) в Карлсруэ на кафедре машиноведения. Постоянная возможность посещения Берлина связывала его с родными местами. В 30-е годы он продолжал развивать теорию теплоотдачи при конденсации водяных паров — технически важную проблему теплопередачи.

Репутация Нуссельта как пионера теплотехники была основана на его фундаментальных работах. Он был основателем лаборатории машин в Высшей технической школе Дрездена, которая к тому времени была центром технической термодинамики в Германии. Здесь Нуссельт получил звание профессора за работу «Перенос тепла и количества движения в трубах». В 1923 г. им опубликована статья «Значение учения о теплопередаче для машиноведения» [10].

Он написал книгу «Основания термодинамики» (Geburtsstunde der Themodynamik), в которой он отразил представления о механической теории тепла, законы теплопередачи, расчеты отопления, вентиляции, теорию холодильных и тепловых машин — все основные области учения и использования теплоты. По его книге почти 40 лет училось не одно поколение инженеров и аспирантов. Этот труд рассматривался как наиболее полное педагогическое издание учения о теплоте. Книга была выпущена в двух томах в 1934 и 1944 годах, последнее издание в 1951 г. [19]. По мнению многих

критиков, издание ценилось за точность и ясность изложения и в инженерной среде называлось «Большой Нуссельт».

Нуссельтом опубликовано более 50 статей, основная их часть по теплопередаче при естественной и вынужденной конвекции, по гидро- и термодинамике, по двигателям внутреннего сгорания, регенераторам, рекуператорам и проблемам преобразования теплоты в газовых и паровых машинах.

С 1925 г. его главным делом была преподавательская деятельность, он профессор и заведующий кафедрой теоретического машиноведения в Высшей технической школе Мюнхена, где проработал 27 лет до своего ухода на пенсию (1952). После его ухода эту кафедру занял известный ученый Э. Шмидт, именем которого названо число подобия (Sc= ν/D) — эквивалент числу подобия Прандтля для массопереноса.

Любовь и самопожертвование Нуссельта к своей профессии были широко известны, он был далек от материальных интересов, ему более была близка природа. Странствия, езда на велосипеде, пробежки на лыжах, подъемы в горы или созерцание горных лугов давали ему одновременно разрядку и силу. Изредка он бывал в кино, театре или опере, но никогда почему-то не бывал на концертах. Из года в год он с удовольствием устраивал семейные октябрьские праздники, обладал большим чувством юмора, любил хитрые парадоксы и афоризмы. Дома любил читать труды Канта, Шопенгауера и других философов, а также технические публикации со спорными вопросами, но сам старался никогда не высказывать собственного мнения. Свое либерально-демократическое мышление он сохранил даже во времена фашизма. Почему фашисты терпели таких людей? Видимо, понимали их научную величину и терпели, как терпели великого физика-антифашиста М. Планка, Л. Прандтля и др.

В некрологе, написанном его преемником по кафедре Эрнстом Шмидтом, его политические взгляды характеризуются так: «Прямой характер Нуссельта и его ясная критическая манера не позволяла делать уступки прошлому, (то есть, фашистскому) режиму. Все внешние иллюзии были ему по существу чужды» [20].

В 1951 г. Нуссельт ушел на пенсию, оставаясь до октября 1952 г. заведующим кафедрой. За его научные и педагогические заслуги он был избран членом Попечительского совета Государственного физико-технического института, и уже в 1929 году, отмечая его заслуги в области науки и техники, Высшая техническая школа Данцига присвоила ему звание Почетного доктора.

Брауншвейгское научное общество отметило его в 1951 г. Памятной медалью в честь дня рождения Карла Фридриха Гаусса «за его основополагающие работы, которые перевели изучение теплопередачи из области эмпирической в научную сферу». Высшая техническая школа Дрездена, празднуя свое 125-летие в 1953 г. присвоила ему звание Почетного доктора за персональные достижения в технических науках в первой половине XX столетия.

Общество немецких инженеров (VDI) наградило Нуссельта своим высшим отличием — Памятной медалью Грасгофа, учрежденной за высшие достижения и заслуги в инженерном искусстве, которые может отметить общество. В 1954 г он был избран членом Баварской Академии наук.

В. Нуссельт скончался от сердечного приступа на 75 году жизни (01.09.1957) в Мюнхене и был похоронен на местном кладбище у лесного массива Перлахер.

Именем Нуссельта названы:

Сфера Нуссельта — метод, предложенный В.Нуссельтом для измерения теплопроводности преимущественно изоляционных материалов. Метод состоит в использовании двух полых концентрических сфер, внутренняя сфера диаметра (d_1) содержит электрический нагреватель. Наружная — тонкостенная металлическая оболочка диаметром (d_2).

Между ними помещается испытуемый материал. Измеряя температуры поверхностей оболочек, внутренней (T_1) и наружной(T_2), и зная мощность нагревателя Q, можно определить коэффициент теплопроводности испытуемого материала :

$$\lambda = \frac{Q[(1/d_1)-(1/d_2)]}{2\pi(T_1 - T_2)}.$$

Число подобия Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} = \frac{\alpha}{\lambda / L} = \frac{L}{\Delta}.$$

Это число подобия характеризует связь между интенсивностью теплообмена и перепадом температур в пограничном слое. Точнее его можно определить как отношение конвективного переноса тепла в жидкости к переносу тепла теплопроводностью при тех же самых условиях. Рассмотрим слой жидкости толщиной L и разность температур T, тогда тепловой поток за счет конвекции равен

$$q_k = \alpha(T_w - T).$$

Если, с другой стороны, слой неподвижен, то тепловой поток за счет теплопроводности будет равен

$$q_T = \frac{\lambda}{L}(T_w - T).$$

Тогда число Нуссельта можно определить как отношение двух тепловых потоков:

$$Nu = \frac{q_k}{q_T}\frac{(\text{конвективный})}{(\text{теплопроводность})} = \alpha L / \lambda.$$

Если число Нуссельта порядка единицы, то это указывает на то, что тепло передается практически только теплопроводностью. Большие числа Nu указывают на эффективную роль конвекции.

Nu можно представить также как отношение характерного размера (L) к толщине теплового пограничного слоя (D) (см. выше)

Уравнения Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} = f(Re, Pr).$$

Так как функция f изменяется монотонно, то она может быть аппроксимирована по отдельным интервалам Re и Pr приближенными уравнениями вида

$$Nu = const(Re)^m (Pr)^n.$$

Такая форма уравнений является излюбленной в практике. По имени их автора они и называются «уравнениями Нуссельта». (См. Гребер Г., Эрк С., Григуль У. «Основы учения о теплообмене». М.: ИИЛ., 1958, с. 215.)

Эта зависимость позволяет определить коэффициент теплоотдачи непосредственно из опытов на моделях и результаты распространить для любого числа геометрически подобных конфигураций. Сопоставляя дифференциальные уравнения движения, энергии и граничные условия, можно видеть, что число аргументов уменьшилось, а именно, семь размерных переменных системы (α, L, w , λ, ν, ρ, C_p) сведены всего лишь к трем безразмерным числам подобия (Nu, Re, Pr).

Теория пленочной конденсации Нуссельта. В ней впервые были записаны и решены основные уравнения движения и тепла при ламинарном течении пленки конденсата под действием гравитационных сил. Задача о теплообмене при пленочной конденсации неподвижного пара рассматривалась в ряде предположений. Это решение цитируется в большинстве учебников по теплообмену, несмотря на наличие более сложных теорий, в которых учитываются многие дополнительные факторы (силы инерции, конвективный перенос в пленке, трение на границе фаз, силы поверхностного натяжения, зависимость физических параметров от температуры).

Основные публикации Нуссельта

1. «Die Wärmeleitzahl von Warmeisolierstoffen», 1907, — München, TH Diss. Forsch. Arb. Ing. Wes. N 89, Verlag des VDI, Berlin, 1909.
2. «Der Wärmeubergang in Rohrleitungen», 1909, — Dresden, TH, Habilitationsschrift.
3. Abhangigkeit der Wärmeübergangszahl von der Röhrlange, — Zeitschrift VDI, 1910, Bd.54, S.1154-1158.
4. Der Wärmeubergang in Kreuzstorm, Zeitschrift VDI, 1911, Bd. 55, S. 2021-2024.

5. «Der Wärmeübergang in der Gasmaschine». — Zeitschrift VDI, Berlin,1914, Bd.58, N.10, S.361
6. «Das Grundgesetz des Wärmeübergangs», Gesundh. — Ing., 1915, Bd. 38, S.477-482; 490-496.
7. «Die Verbrennung und die Vergasung der Kohle auf dem Rost» — Zeitschrift VDI, Berlin, 1916, Bd.60, N6, s.102-107.
8. Die Oberflachenkondensation des Wasserdampfes, — Zeitschrift VDI, 1916, Bd.60, s.541-546; 569-575.
9. Der Wärmeübergang in Röhr, — Zeitschrift VDI, 1917, Bd.61, S. 685-689.
10. «Bedeutung der Lehre vom Wärmedurchgang fur die Maschinentechnik», — Zeitschrift VDI, 1923, Bd.67, N36, S.1154-1158; VDI Forschungsheft 264, 1923
11. Die Wärmeubertragung an Wasser im Röhr, Festschrift zur Hundertjahrfriersder Techn. Hochschule Karlsruhe, 1925.
12. Die Gasstrahlung bei der Strömung im Röhr, Zeitschrift VDI, 1926, Bd.70, S.763-765.
13. Die Theorie des Winderhitzers, — Zeitschrift VDI, 1927, Bd.71, S.85.
14. Der Beharrungszustand im Winderhitzers, — Zeitschrift VDI, 1928, Bd.72, S. 1052-1054.
15. Der Einfluss der Gastemperatur auf den der Wärmeübergang in Röhr, Techn. Mech. Und Thermodynamik , 1930, Bd.1, S. 227-290.
16. Eine neue Formel fur der Wärmeübergang in Kreuzstorm, Techn. Mech. Und Thermodynamik , 1930, Bd.1, S. 417-422.
17. Die Wärmeübergang, Diffusion und Verdungstung, ZAMM, 1930, Bd. 10, S. 105-121.
18. Der Wärmeaustausch zwischen Wand und Wasser im Röhr, Forsch.Ing. Wes., 1931, Bd.2, S.309-313.
19. Technische Thermodynamik, Bd.1, 2. Berlin, 1934, 1944, 1951.

Основные публикации о Нуссельте

20. Schmidt E., Wilhelm Nusselt. In VDI-Zeitschr. Dusseldorf, 1957, Bd.99, N.35, s.1741-1742.
21. Luck G., Wilhelm Nusselt zum Gedenken. In Allg.Wärmetechnik.- Stuttgart, 1957, Bd.8, N10, s.224.
22. LAT-TUM. Festschrift des Lehrstuhles A fur Thermodynamik der Technischen Universitat München. — 1977. — Munchen, TU.S.12. (Zit.von [1]).
23. ElsnerN., Ein Pioner der Wärmeubertragungs- und Verbrennungsforschung.- Zum 100 Geburtstag Wilhelm Nusselt.— In Energiewirtschaft.-Leipzig, 1983, Bd.33, N.7, s. 241-243.
24. Lebensbilder von Ingenieurwissenschaftlern. Eine Sammlung von Biographien aus zwei Jahrhunderten, Hersg. von G. Buchheim und R. Sonnemann, Leipzig, 1989, s. 140 – 150.
25. Eine Kopie wurde den Autoren freundlicherweise vom Archiv der Bayerischen AdW München zur Verfugung gestellt. (Zit. von [1]).

Даты биографии

25.11.1882	Родился в Нюренберге, Германия.
1893-1898	Посещает реальное училище и механическое отделение промышленной школы.
1900-1904	Студент Высшей технической школы в Мюнхене и в Берлине – Шарлоттенбурге.
1906	Ассистент в лаборатории технической физики О. Кноблауха Высшей технической школы Мюнхена.
06.06.1907	Публикация статьи «Теплопроводность изоляционных материалов».
06.08.1907	Присуждение степени Доктора-инженера.
1907-1909	Ассистент в лаборатории Моллье (школа Цейнера) Высшей технической школе Дрездена.
02.1909	Публикация статьи «Теплоотдача в круглых трубах».
05.1909	Назначение на должность доцента.
01.07.1909-1910	Работа в фирме Братьев Зульцер.
1911-1913	Участие в работах по сгоранию углей и взрывах газовоздушных смесей.
01.04.1913	Назначение на должность адъюнкта лаборатории машиноведения Высшей технической школы Дрездена.
1915	Публикация статьи «Основные законы теплопередачи».
19.07.1915	Неординарный профессор в Высшей технической школе Дрездена (ВТШД).
1910-1918	Преподавание в ВТШД, читает курс «Отопление и вентиляция» и др.
1918-1920	Инженер на анилиновой и содовой фабрике в Людвигсхафене.
1919-1920	Ординарный (штатный) профессор в Высшей технической школе Дармштадта.
1920-1925	Ординарный профессор кафедры теории машиноведения Высшей технической школы в Карлсруэ.
27.01.1922	Избрание членом Государственного попечительского физико-технического совета.
1925-1951	Ординарный профессор и заведующий кафедрой машиноведения в Высшей технической школе Мюнхена.
19.07.1929	Присуждение степени Почетного доктора Высшей технической школы Данцига.
1934	Первое издание книги «Основы термодинамики» двух томах.
1944	Второе издание этой книги («Grossen Nusselt»).
30.04.1951	Награждение медалью Гаусса. Брауншвейгское Научное Общество.
1951	Союз немецких инженеров (VDI) в честь50-летия союза награждает его медалью Грасгофа- Высшей наградой VDI.
1952	Уход на пенсию.
1953	Присуждение степени Почетного Доктора Высшей технической школы Дрездена при праздновании 125-летия школы.
1954	Избрание членом Баварской Академии наук.
01.09.1957	Скончался в Мюнхене, похоронен на местном кладбище.

Послесловие

Написание этой небольшой книги было вызвано двумя обстоятельствами. Во-первых, явно плохое знание студентами вузов, инженерами истории истоков чисел подобия и деятельности тех ученых, именами которых названы эти числа. Во-вторых, пример профессора Дж. Хьюитта (Имперіал Колледж Лондонского университета), прочитавшего лекцию на 11-й Международной конференции по теплообмену с названием «Имена, числа и единицы».

Благодарности

С радостью выражаю благодарность за помощь и ценные советы всем, кто помог мне собрать и оформить материалы для этой книги. Я всегда получал истинное удовольствие от общения с теми, с кем сотрудничал.

Благодарен:

- За постоянную поддержку и терпение моей жене Вирде Мухамедовне Абрамовой.
- За помощь в подборе и переводе материалов, касающихся Ж. Б. Фурье, Галине Павловне и Антону Владимировичу Богословским (ГНЦ РФ ФЭИ).
- За материалы по О. Рейнольдсу — профессору Манчестерского университета Дж. Джексону, который прислал мне свои работы и с которым были полезные дискуссии о жизни и деятельности этого неординарного ученого.
- За материалы о Л. Прандтле — Дипломированному инженеру К. Кнехту (Фраматом), встреча и знакомство с которым в 2003 г. помогли получить уникальные подробные публикации о жизни и работе ученого; госпоже Ане О'Доннелл (Фраматом), Виктору Ивановичу Слободчуку (ОИАТЭ), которые сделали доступными многие материалы о жизни Л. Прандтля; за помощь в переводе материалов Анастасии Владимировне Трошиной.
- За материалы о В. Нуссельте — д-ру Х. Ченгу (центр Карлсруэ) и фрау Маргарите Клейм из Германии, любезность которых мне всегда будет памятна. Полезный обмен мнениями об этих материалах я имел с профессором МВТУ Ревазом Зурабовичем Кавтарадзе, которому я также весьма признателен

Благодарю Ларису Николаевну Исаеву любезно создавшую благоприятные условия на заключительном этапе подготовки текста.

Особое спасибо Марине Иосифовне Терентьевой и Нонне Борисовне Денискиной за всегда прекрасную помощь в подготовке рукописи.

Приложение

Основные числа подобия и их физический смысл*)

Альфвена	$Al = \frac{B_0^2}{\mu_0 \rho\ w^2} = \frac{N}{Re_m}$	мера отношения электромагнитной силы к силе инерции, умноженная на отношение напряженностей внешнего (H_0) и индуцированного (H) магнитных полей $Al=Ha^2/(Re \cdot Re_m)$.
Архимеда	$Ar = \frac{g\ l^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1}$	мера отношения подъемной силы, обусловленной разностью плотностей и силы вязкого трения
Био	$Bi = \frac{\alpha\ l}{\lambda_w}$	мера отношения термического сопротивления стенки и термического сопротивления на границе стенки с потоком жидкости или газа
Больцмана	$Bo = \frac{\rho\ w\left(h_1 - h_2\right)}{\sigma_{SB}\left(T_1^4 - T_2^4\right)}$	мера отношения количества тепла воспринимаемого потоком и количества тепла, подводимого излучением (σ_{SB} — константа Стефана-Больцмана).
Бонда	$Bo = \frac{g\ d^2\ (\rho' - \rho'')}{\sigma}$	мера отношения сил тяжести и поверхностного натяжения при анализе поведения пузырей и капель. Другое название этого комплекса - число Этвеша (Eo).
Кипения	$Bo\ (Bq) = \frac{q}{r\ \rho\ w}$	число кипения – отношение массы пара, генерируемого с единицы поверхности (q/r) к массовому расходу через единицу поперечного сечения канала (ρw).
Капиллярное число	$Ca = \frac{\mu\ w}{\sigma}$	мера отношения вязкостных сил и сил поверхностного натяжения; Ca=We/Re.

* Условные обозначения см. далее

Дамкелера	$Da = \frac{w_r \ell^2}{D C_0}$	отношение времени нахождения частицы в потоке (время диффузии l^2/D) ко времени протекания химической реакции (w_r/C_0). При $Da \to 0$ влияние химической реакции в газовой фазе на течение в пограничном слое мало. Пограничный слой "заморожен", w_r. При $Da \to \infty$ время протекания химической реакции много меньше времени нахождения частицы в пограничном слое (термохимическое равновесие – равновесный пограничный слой).
Дина	$De = Re\sqrt{\frac{d}{D}}$	модифицированное число Рейнольдса для каналов в виде змеевиков (d – диаметр канала, D – диаметр змеевика).
Эккерта	$Ec = \frac{w^2}{c_p \Delta T}$	мера отношения кинетической энергии потока к энтальпии (или динамической температуры к термодинамической); $Ec \cdot Pr = Br = \mu w^2/(\lambda \Delta T)$ - число Бринкмана, характеристика вязкостной диссипации энергии.
Эйлера	$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$	мера отношения перепада давления и кинетической энергии потока.
Фруда	$Fr = \frac{w^2}{g l \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right)} \approx \frac{w^2}{g l}$ *	мера отношения кинетической энергии потока и потенциальной энергии (силы тяжести).
Фурье	$Fo = \frac{a \tau}{l^2}$	характеристика связи между скоростью изменения поля температуры, физическими свойствами и размерами тела; безразмерное время - $\tau/(l^2/a)$.
Галлилея	$Ga = \frac{g l^3}{\nu^2}$	мера отношения сил тяжести и вязкого трения; $Ga = Re^2/Fr$.

* Иногда используется обратная величина

Грасгофа $$Gr = \frac{g\,l^3 \beta\,\Delta t}{\nu^2}$$ мера отношения сил термогравитационной конвекции и сил вязкого трения.

Гретца $$Gz = Pe\,Pr\frac{d}{l} = \frac{w\,d^2}{a\,l}$$ мера отношения времени диффузии тепла в радиальном направлении (d^2/a) к времени прохода жидкости по длине l (l/w).

Гартмана $$Ha = B_0\,l\sqrt{\frac{\sigma_0}{\rho\,\nu}} = \left(Al \cdot Re \cdot Re_m\right)^{1/2}$$ квадрат числа Гартмана определяет отношение электромагнитной силы к силе, обусловленной вязкими напряжениями.

Якоба $$Ja = \frac{r}{c_p\,\Delta T}\frac{\rho''}{\rho'}\ *$$ мера характеристики процессов фазового превращения – мера отношения теплоты фазового перехода к теплоте перегрева (переохлаждения) одной из фаз.

Кармана $$Ka = \sqrt{\frac{v_x^{\,2} + v_y^{\,2} + v_z^{\,2}}{3\overline{w}^2}}$$ характеристика степени турбулентности потока; здесь v_x, v_y, v_z – пульсации скорости по направлениям x, y, z; $\overline{w}$ - средняя скорость потока.

Кирпичева $$Ki = \frac{k\,l}{\lambda}$$ мера отношения термического сопротивления, связанного с теплопроводностью (l/λ) к общему термическому сопротивлению теплопередачи (1/k)

Кнудсена $$Kn = \frac{L}{l}$$ отношение длины свободного пробега молекул и масштаба течения.

Кутателадзе $$Ku = \frac{\rho''\,w''^{\,2}_{кр}}{\sqrt{\sigma\,g\left(\rho' - \rho''\right)}}$$ характеристика устойчивости двухфазной системы, определяющая критическую скорость паровой фазы, при которой система теряет устойчивость.

Лапласа $$La = \frac{\Delta p\,l}{\mu\,w}$$ мера отношения сил, связанных с перепадом давления и сил вязкого трения, La=Eu·Re; для ламинарного течения La=const.

Льюиса $$Le = \frac{a}{D} = \frac{Sc}{Pr}\ *$$ отношение коэффициента температуропроводности среды к коэффициенту диффузии (D) – мера подобия температурного поля и поля концентрации.

Маха	$M = \frac{w}{a_*}$	отношение скорости потока к скорости звука в потоке (a_*).
Марангони	$Ma = \frac{l^2}{a\mu}\frac{d\sigma}{dT}\frac{dT}{dx}$	мера отношения сил поверхностного натяжения, связанных с градиентом температуры на поверхности, к силам вязкости.
Мортона	$Mo = \frac{g\,\nu^4\,\rho^3}{\sigma^3}$	безразмерный комплекс физических свойств жидкости (вязкости - ν, плотности - ρ, поверхностного натяжения - σ), характеризующих режим всплытия газовых (паровых) пузырей в жидкости.
Стюарта	$N = \frac{B_0{}^2 l\,\sigma_0}{\rho w}$	мера отношения электромагнитной силы к силе инерционной ($N=Al\cdot Re_m$; $N=Ha^2/Re$).
Нуссельта	$Nu = \frac{\alpha\, l}{\lambda}$	мера отношения теплового потока, определяемого коэффициентом теплообмена и теплового потока через слой l с теплопроводностью λ. Другой смысл: отношение характерной длины (l) к толщине теплового пограничного слоя, $\Delta=\lambda/\alpha$.
Пекле	$Pe = \frac{w\,l}{a} = \frac{w\,c\,\rho\,l}{\lambda}$	мера отношения интенсивности переноса тепла конвекцией (wcρ) и теплопроводностью (λ/l). $Pe=Re\cdot Pr$.
Прандтля	$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu\,c_p}{\lambda}$	отношение кинематической вязкости и температуропроводности – мера подобия температурных и скоростных полей в потоке.
Прандтля (магнитное)	$Pr_M = \mu_0\,\sigma_0\,\nu$	отношение кинематической вязкости (ν) к характеристикам электромагнитного поля ($1/(\mu_0\,\sigma_0)$).
Релея	$Ra = \frac{g\,\beta\,l^3\Delta T}{\nu\,a}$	мера отношения сил тяжести, вызванных градиентом температуры и теплопроводностью и сил вязкостного трения; $Ra=Gr\cdot Pr$ при $Pr\geq 1$; $Ra=Gr\cdot Pr^2$ при $Pr<<1$.
Рейнольдса	$Re = \frac{w\;l}{\nu} = \frac{\rho\,w\,l}{\mu}$	характеристика гидродинамического режима потока - мера отношения инерционных сил к силам вязкостного трения. Мера отношения силы, связанной с изменением количества движения (ρw^2) к силе, связанной с вязкостным трением ($\mu w / l$).

Рейнольдса (магнитное)	$Re_M = w\, l\, \mu_0\, \sigma_0$	отношение напряженности магнитного поля индуцированных токов ($H=B_0\, w\, l\, \sigma_0$) к напряженности внешнего магнитного поля ($H_0=B_0 / \mu_0$) – $Re_m=H / H_0$.
Ричардсона	$Ri = \frac{g\, l\, (\rho' - \rho'')}{\rho w^2}$	отношение силы тяжести к скоростному напору потока жидкости (газа).
Шмидта	$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{\mu}{\rho D}$	отношение кинематической вязкости к коэффициенту диффузии (D) – аналог числа Прандтля (Pr_m) для процессов массопереноса.
Шервуда	$Sh = \frac{(\beta \cdot l)}{D}$	мера отношения интенсивности конвективного потока массы (β) и потока массы за счет диффузии через слой l. Другой смысл - отношение характерной длины (l) к толщине диффузионного пограничного слоя – (D/β). Аналог числа Нуссельта (Nu_m) для процессов массопереноса.
Стокса	$Stk = \frac{\rho_T w\, d_T^2}{\mu\, l}$	характеристика интенсивности осаждения твердых частиц в среде; ρ_T, d_T – плотность и диаметр твердых частиц; l – характерный размер. Другое выражение: $Stk = \rho\, g\, d_T^2/\mu\, w$ (отношение гравитационных сил к силам вязкости).
Струхаля	$Sr(Sh) = \frac{f\, l}{w}$	число подобия, определяющее частоту отрыва вихрей от тела с характерным размером l при обтекании его потоком со скоростью w.
Стантона	$St = \frac{\alpha}{\rho w\, c}$	мера отношения интенсивности теплообмена и конвективного (вместе с массой) переноса тепла, St=Nu / (Re Pr). Для заданной геометрии число St пропорционально подогреву и обратно пропорционально движущей разности температур.
Вебера	$We = \frac{(\rho \cdot w^2\, l)}{\sigma}$	мера отношения скоростного напора (ρw^2) к силам поверхностного натяжения (σ/l). В виде $\sigma/[g\, (\rho' - \rho'')\, l^2]$ отношение сил поверхностного натяжения и сил тяжести.
Жуковского	$Zh = \frac{\nu\, \tau}{l^2}$	характеристика связи между темпом изменения поля скорости, размером канала и физическими свойствами. В виде: $\tau/(l^2 / \nu)$ - безразмерное время. Zh – аналог числа Fo для гидродинамических процессов.

Условные обозначения к приложению

a - температуропроводность, $м^2/с$

a_* - скорость звука, м/с

B_o - магнитная индукция, Н/(А·м)

c, c_p - удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)

C_o - концентрация, кг/ $м^3$

d - диаметр канала, м;

D - коэффициент диффузии, $м^2/с$

f - частота, $с^{-1}$

g - ускорение силы тяжести, $м^2/с$

H - напряженность магнитного поля от индуцированных токов, А/м

H_o - напряженность внешнего магнитного поля, А/м

k - коэффициент теплопередачи, Вт/($м^2$·К);

l - характерный размер, м

L - длина свободного пробега молекул, м

p - давление, Па

Δp - разность давлений, Па

r - теплота испарения, Дж/кг

T - температура, К

ΔT - разность температур, К

w - скорость потока, м/с

w_r - скорость протекания хим. реакции, кг/$м^3$с

α - коэффициент теплообмена, Вт/($м^2$К)

β - коэффициент массопереноса, м/с

λ - теплопроводность жидкости (газа), Вт/(м·К);

λ_w - теплопроводность материала стенки, Вт/(м·К)

μ - динамическая вязкость, Па·с

μ_o - магнитная проницаемость, Вб/(А·м)

ν - кинематическая вязкость, $м^2/с$

ρ - плотность, кг/$м^3$; ρ' - плотность жидкости, ρ'' - пара

σ - поверхностное натяжение, Н/м

σ_o - электропроводность, $(Ом·м)^{-1}$

σ_{SB} - постоянная в законе Стефана-Больцмана; $5{,}67·10^{-8}$ Вт/($м^2$·$К^{-4}$)

Некоторые размерности в системе СИ

τ	-	T	T – единица времени, с;
$[B]$	-	$M\,T^{-2}\,I^{-1}$	M – единица массы, кг;
$[H]$	-	$L^{-1}\,I$	L – единица длины, м;
$[\mu_0]$	-	$L^{-3}\,M^{-1}\,T^{3}\,I^{2}$	I – единица силы тока, А.
$[\sigma_o]$	-	$LM\,T^{-2}\,I^{-2}$	

СОДЕРЖАНИЕ

Вместо предисловия 3

Жан Батист Жозеф Фурье 6

Осборн Рейнольдс 45

Людвиг Прандтль 63

Приложение к письму проф. Прандтля от 28 апреля 1941 г. господину рейхсмаршалу Герману Герингу 92

Эрнст Крафт Вильгельм Нуссельт 96

Послесловие 106

Приложение. Основные числа подобия и их физический смысл 107

Подписано в печать 05.05.2006.
Тираж 250 экз. Заказ № 87. Уч.-изд. л. 8,6. Усл. п. л. 6,6.

Отпечатано в ОНТИ ГНЦ РФ ФЭИ.
249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.