

УДК 167: 532+533

## ЛЮДВИГ ПРАНДТЛЬ В ГИДРОМЕХАНИКЕ ПРОШЛОГО И БУДУЩЕГО

Е. А. ГАЕВ

Институт гидромеханики НАН Украины,  
03680 Киев – 180, МСП, ул. Желябова, 8/4  
ye\_gayev@voliacable.com

Получено 10.02.14

Проведено биографическое и библиографическое исследование научного творчества выдающегося гидромеханика XX столетия Людвиг Прандтля, создателя теории пограничного слоя (ТПС) и первых моделей турбулентности, а также его научной школы. Изложены размышления автора о методе мышления Л.Прандтля, сочетании в нем эксперимента и математики, видение роли ТПС в современной гидромеханике, в частности – украинской. Работа посвящена двум последователям Л.Прандтля, творчество которых прошло в нашем институте.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Людвиг Прандтль, история гидромеханики, теория пограничного слоя

Проведено біографічне та бібліографічне дослідження наукової творчості видатного гідромеханіка ХХ сторіччя Людвіга Прандтля, творця теорії пограничного шару (ТПШ) і перших моделей турбулентності, та його наукової школи. Викладені роздуми автора щодо методу мислення Л.Прандтля, зв'язку у ньому експерименту і математики, бачення ролі ТПШ в сучасній гідромеханіці, зокрема – в українській. Працю присвячено двом послідовникам Л.Прандтля, що творили у нашому інституті.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** Людвіг Прандтль, історія гідромеханіки, теорія пограничного шару

Biographical and bibliographical study of the scientific heritage of Ludwig Prandtl and his scientific school has been carried out. Prandtl, a prominent XX century personality, is an expert in fluid mechanics, author of the boundary layer theory (BLT) and of the first turbulence models. Authors' reflections on Prandtl's "thinking method" are given, in particular on combining experiment and mathematics in it, his vision of BLT role in modern hydromechanics, particularly in Ukrainian scientific school, is presented as well. The paper is dedicated to the two Prandtl followers who worked in our institution.

**KEY WORDS:** Ludwig Prandtl, history of fluid mechanics, boundary layer theory

Посвящается  
95-летию Национальной академии наук Украины,  
80-летию Института гидромеханики НАН Украины  
и замечательным ученым ИГМ НАН Украины  
проф. Л.Ф. Козлову и проф. И.К. Никитину

### МОТИВАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мировое сообщество ученых, работающих в областях аэромеханики, гидродинамики, теории тепло- и массопереноса, и даже "далекие от физики" математики уже несколько раз отмечали круглые даты, связанные с Людвигом Прандтлем – выдающимся немецким ученым (1875–1953), чьи идеи чрезвычайно продвинули исследователей в этих разделах науки и сегодня дают нам как эффективные рабочие инструменты, так и указывают способы мышления при решении постоянно возникающих новых задач.

Первым юбилейным событием стало 50-летие рождения теории пограничного слоя – важнейшей и перспективной теории Людвиг Прандтля, взявшей начало из его доклада на Международном конгрессе математиков 1904 году [1].

К сожалению, до окончания холодной войны ма-

ло что можно было узнать об ученом и о плеяде его выдающихся учеников. Затем последовал 125-летний юбилей Людвиг Прандтля (2000 г.), по случаю которого университет Гёттингена издал ряд воспоминаний о нем [2–5]. В 2013 году отмечалось шестидесятилетие со дня смерти ученого. Наконец, в нынешнем году исполняется 110 лет его теории пограничного слоя – одной из ключевых для нашей науки, механики жидкости и газа (МЖГ).

Данная статья написана под впечатлением обильной информации, которая лишь недавно появилась на немецком и английском языках (публикации [6–9] – то немногое, что имеется на русском). Она содержит также небольшое собственное исследование об отдельных персоналиях, связанных с жизнью и деятельностью Прандтля, некоторые размышления о будущем гидромеханики и в частности в нашей стране, а также о

способах мышления в ней "после Прандтля".

Как и всякое научное положение, теория пограничного слоя прошла сложный путь становления, поэтому ее "биография", как и биография творца теории волновали многих исследователей и последователей. К таким людям можно отнести и профессора Леонида Филипповича Козлова (1927–1988), основателя отдела пограничного слоя в Институте гидромеханики НАН Украины [7–11]. Леонид Филиппович мечтал сам написать биографию Людвигу Прандтлю. Он даже собрал некоторые материалы, которые теперь оказались в распоряжении сотрудников. Но тогда осуществлению идеи мешало не только отсутствие информации, но и идеологическое противостояние того времени, подозрение о сотрудничестве с гитлеровской военной машиной как самого ученого, так и его учеников [15]. Теперь на этот вопрос в отношении Прандтля можно дать исчерпывающий отрицательный ответ.

Профессора Ивана Кузьмича Никитина (1911–1992), основателя отдела физической гидромеханики в нашем институте также можно считать последователем идей Л.Прандтля в приложении теории пограничного слоя и турбулентности к русловым и сложным течениям [13–15]. Вот почему данное исследование посвящено памяти этих двух значительных для нашего института личностей.

## 1. ГЛАВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЮДВИГА ПРАНДТЛЯ В МЕХАНИКЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

### 1.1. Теория авиации

Гидродинамика и аэродинамика (сейчас предпочитают обобщающее название *гидромеханика* или *механика жидкости и газа*, МЖГ) и, на их базе, теория авиации стали главным жизненным делом Людвигу Прандтлю. В этой науке он известен как теоретик и экспериментатор. Не удовлетворяясь "интегральными" (гидравлическими) характеристиками течений, использовавшимися предшественниками, он придумал инструмент для "проникновения внутрь" потока – "трубку Прандтля-Пито" [15, 19] для измерения локального давления и на этой основе локальной скорости потока. Отвечая на запросы быстро развивающейся авиации, он предложил теоретическую модель возникновения подъемной силы крыла [7, 19–21]. На построенной им аэродинамической трубе (одной из первых в мире) измерил ко-

эффициент лобового сопротивления тела в потоке  $c_x$ , в дискуссии со знаменитым инженером и строителем Гюставом Эйфелем определил зависимость  $c_x$  от числа Рейнольдса [15, 19] и главное – разделил силу сопротивления потоку на сопротивление давления, зависящее от формы тела, и сопротивление трения [15, 19, 21] соответственно происходящим при обтекании тела физическим явлениям.

Размышляя "наперед" о способах и пределах увеличения скорости летательных аппаратов, Прандтль пришел к мысли о возникновении эффектов сжимаемости воздуха, для учета которых потребовались новые теоретические исследования и была построена первая в мире сверхзвуковая аэродинамическая труба. Это позволило обнаружить новые аэродинамические и физические явления (возникновение облака за околосзвуковым объектом в условиях повышенной влажности воздуха – эффект Прандтля-Глоерта, волны разрежения за острой кромкой сверхзвукового тела – течение Прандтля-Майера) и учесть их в будущих самолетных и ракетных конструкциях. Множество физических явлений, сопровождающих движение жидкостей и газов, классифицированы и описаны им в фундаментальных учебниках [20, 21], не потерявших значение и спустя 80 лет с момента их появления.

Людвиг Прандтль одним из первых осознал, что основной формой течения жидкостей является турбулентность и предложил пионерские подходы к ее изучению. Память об этом осталась в гидромеханике в таких понятиях как "длина пути смешения Прандтля", "число Прандтля", "турбулентное число Прандтля", "магнитное число Прандтля". В размышлениях о турбулентности сам Прандтль ограничился качественными размышлениями, однако именно в созданном и руководимом им коллективе родилась теория гидродинамической устойчивости.

Определяющий след в механике оставила и организационная деятельность Прандтля. Он создал один из первых в мире аэродинамических институтов и воспитал плеяду блестящих исследователей – гидро- и аэромехаников, которым мы посвящаем раздел 3. Его институт им. Кайзера Вильгельма (KWI) по изучению течений жидкости и газа постепенно объединил 21 немецкий институт, позднее названный Обществом имени Макса Планка, аналог нашей Академии Наук. Вместе с математиком Рихардом Мизесом основал Общество прикладной математики и механики (GAMM, Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik).

На основании перечисленного можно сказать, что Людвигу Прандтлю заслуженно называют

отцом современной гидромеханики и аэродинамики. Однако главным научным детищем Людвиг Прандтля по праву считается его теория пограничного слоя, которая явилась не только еще одной математической моделью течения жидкости, но и существенно повлияла на сам характер мышления в нашей науке. И этот аспект и хотелось бы особенно подчеркнуть в данной работе.

## 1.2. Теория пограничного слоя

Теория пограничного слоя (ТПС) Людвиг Прандтля открыла новую эру в механике жидкостей и газов. Не повторяя сущности этой теории, что можно найти в любом современном учебнике МЖГ ([22]), сосредоточимся лишь на оценке ее значения для нашей науки и физико-математических наук вообще.

Стремительный прогресс МЖГ в большой степени стимулировался формулированием и разрешением парадоксов, т.е. возникающих по мере развития теории расхождений с опытом, а иной раз – и со здравым смыслом. На тот момент, когда гидромеханики и аэродинамики всего мира пытались создать теорию плавающего или летающего аппарата на основе теории потенциального течения идеальной жидкости, таковым был как раз "*парадокс Даламбера*" об отсутствии сопротивления обтекаемого тела. Его разрешения искали на пути привлечения искусственных моделей наподобие кавитационной схемы Рябушинского [23] или полных уравнений Навье-Стокса, учитывающих вязкость сплошной среды. Метод Прандтля указал "промежуточные" уравнения, которые много легче поддавались исследованию и давали возможность физической интерпретации.

Заметим здесь, что первое сообщение о новой гидродинамической теории, сделанное Прандтлем на Международном конгрессе математиков [1] в 1904 году, последними не было оценено по достоинству. Вероятная причина состоит в том, что доклад существенно апеллировал к физическим соображениям, и лишь много позднее теория приобрела более математическое изложение. Да и самому Прандтлю более важным казались его новые представления об образовании вихрей за обтекаемым телом ("*отрыв пограничного слоя*" говорим мы сегодня), чем математическая сторона теории, как это видно из текста доклада [1].

Теория пограничного слоя дала инструмент для решения множества практических задач гидромеханики и гидравлики. Но оказалось, что "*явление пограничного слоя*" имеет место и в других областях механики и физики (сошлемся, напри-

мер, на монографию И.И. Воровича [24]), равно как и в чисто математических задачах – в дифференциальных уравнениях с малым коэффициентом при старшей производной. При его обращении в нуль меняется не только порядок уравнения, но и исчезает одно граничное условие [25, 26] – именно это наблюдение легло в основу прандтлевской теории 1904 г. Идея пограничного слоя, физическая по своему существу, "дала работу" и множеству математиков. Пришлось рассматривать вопросы существования и единственности решения системы уравнений Прандтля, корректности, устойчивости, поведения на бесконечности и т.п., как это свидетельствовала признанный математик академик РАН О.А. Олейник, [27]. Таким образом, теория Прандтля завершилась лишь в конце XX века.

## 2. ВЕХИ ЖИЗНЕННОГО ПУТИ

Вероятно, не стоит удивляться, что выпускник гимназии небольшого баварского городка Фрайзинг 18-летний Людвиг Прандтль "пошел в науку". Куда еще мог пойти представитель профессорской династии технарей, химиков, ботаников (дед – профессор математики и мелиорации, отец – профессор инженерии [2, 3, 28])? Технический университет г. Мюнхена, да и сам этот город дышали вековой культурой и наукой, многие славные имена инженеров и природоиспытателей оставили здесь свой след. Научным руководителем начинающего ученого стал знаменитый в то время механик Август Фёппль. Первые научные результаты получены Прандтлем в теории пластичности и эластичности материалов.

На начинающего ученого обратил внимание математик Феликс Клейн. В то время он активно пропагандировал отказ от "чистой" науки в сторону более прикладной ("американизм" – оппонировали ему противники) [4, 29]. Прусское правительство поддержало Клейна в его преобразовании "чистого" университета Гёттингена в центр прикладной математики, в "математическую Мекку". Клейн получил возможность набрать в университет блестящий состав преподавателей – в прикладной математике прежде всего. В числе таковых он приглашает и Прандтля, и тот переезжает в Гёттинген в 1904 г. Заметим, что организационные идеи Клейна увенчались блестящим успехом: сегодня, шутят гёттингенцы, в их городе – самая высокая в мире концентрация нобелевских лауреатов на км<sup>2</sup>. Там Прандтль тесно сотрудничал с Давидом Гильбертом, Рихардом Курантом, Карлом Рунге (известен нам его *методом Рунге-Кутты*), Вернером Гейзенбергом, многими другими ныне

знаменитыми классиками науки. Благородные задачи "служить Фатерланду" объединяли образованных молодых людей. И, надо отметить, их отечество сполна отвечало на их энтузиазм. Молодой Прандтль сразу получает звание профессора.

Чтобы добиться известности университета, Ф.Клейн организовывает в нем Всемирный конгресс математиков, третий по счету. 29-летний профессор Прандтль решает представить конгрессу свою новую работу, получившую впоследствии название "*теория пограничного слоя*" и всемирное признание. Как отмечает дочь и биограф Прандтля [2, 3], на тот момент это была лишь умозрительная работа, не вызванная какими-либо насущными проблемами. Воздухоплавание, для которого умозрения Прандтля позднее и понадобились, делало лишь первые шаги: в 1908 году Прандтль впервые совершил полет на воздушном шаре; дирижабль графа Цеппелина торжественно проплыл над Гёттингеном лишь в 1912 году; первый самолет американцев братьев Райт, продержавшийся в воздухе лишь 59 секунд, начал отсчет эры авиации в декабре 1903 года, а немецкий пилот-энтузиаст Август Эйлер, ставший вскоре знакомым Прандтля, получил свой пилотский сертификат №1 в 1911 году. Прандтль стремится понять "законы летания" – формы обтекания тел воздухом, возникающие за ними распределения давлений. В Гёттингене он начинает наблюдения за этими явлениями, для чего своими руками сооружает небольшой гидравлический лоток.

Первый возникавший вопрос – происхождение подъемной силы крыла и "тянущей силы" пропеллера, их поведение в зависимости от угла атаки и особенностей конструкции. Результаты Прандтля и привлеченных им молодых инженеров А. Бетца и М. Мунка отталкивались от эксперимента, но завершённую форму смогли принять только с привлечением общих гипотез и серьезного математического аппарата. С небольшими изменениями эти результаты были использованы и для теории гребного винта корабля (Бетц – инженер-кораблестроитель; а гребной винт был еще довольно новым устройством), поскольку при тогдашних скоростях полета воздух вел себя подобно воде, был "несжимаем". Историкам науки и техники стоит, вероятно, исследовать все три существующие и появившиеся примерно в одно время теории подъемной силы [7, 15] – Прандтля, Ф. Ланчестера и Жуковского-Чаплыгина. Сколь различны результаты, чем отличаются теории?

Далее возникали вопросы влияния сжимаемости воздуха при больших скоростях полета, появление

беспричинных пульсаций в потоках – турбулентности. Это подвигало Прандтля к расширению круга исследований, строительству новых экспериментальных установок, привлечению новых людей, "пробиванию" финансирования в промышленных и правительственных кругах. Заметим, что круг возможных заказов на исследования был весьма ограничен, поскольку на основании Версальского договора 1919 года. Германия не имела права зарабатывать авиацию военного назначения. В [25] утверждается, что Прандтль не был особо успешным администратором, но в этом его идеально дополнял А. Бетц. Позднее последний стал директором коммерческого предприятия при KWI от Министерства воздушного флота (700 сотрудников в период Второй мировой войны), а Прандтль более тяготел к "свободному выбору" проблем и обходился в KWI всего 40 сотрудниками, включая технический персонал и сторожа [29].

При всех успехах, KWI терпел и научные неудачи. К таковым можно отнести исследование роторного движителя для кораблей немецкого учителя и изобретателя А. Флеттнера, который и до сих пор не нашел своего применения.

В быту молодой ученый вел по-немецки упорядоченный, "профессорский" образ жизни, с обеспеченным бытом, всегда погруженный в научные размышления. Популярная легенда о женитьбе Прандтля гласит: когда герр профессор счел, что необходимо жениться, у него не было времени выбирать. Он пошел к своему "доктору-отцу"<sup>1</sup> и попросил руки дочери. "Старшей или младшей?" – спросил профессор Фёпль, чем поставил ученика в трудное положение. Несколько других историй о Прандтле можно найти в [29].

Совершая в семейном или дружественном кругу прогулки по живописным окрестностям, Прандтль с увлечением наблюдал и обсуждал те же течения, но уже не в лабораторных условиях, а в окружающей среде. Посещая кафе, любил громоздить посуду на посуду, наблюдая равновесие. С увлечением импровизируя на клавесине, Прандтль накрывал струны газетой, чтобы понаблюдать и поразмышлять над изменением тона звуков. Все же он был полной противоположностью своему близкому другу – экстравагантному профессору К. Рунге, ученику знаменитого К.Вейерштрасса. Полиглот и заядлый путешественник, Рунге был известен тем, что никогда не чистил свой велосипед: "Зачем? Ведь достигнуто динамическое равновесие – сколько грязи добавится, столько и упа-

<sup>1</sup>Буквальный перевод немецкого выражения Doktorvater, научный руководитель.

дет вследствие тряски" [2, 3]. Но странности не помешали Рунге дать миру ученика – создателя квантовой механики М. Борна [30].

Ко всем, кто обращался с научными и техническими вопросами, Прандтль был очень доброжелателен. Даже если приносили очередной проект "вечного двигателя", старался объяснить изобретателю его проблему, по-возможности исправить проект. Будущий нобелевский лауреат Р. Милликен, которому было поручено отобрать кандидатов на приглашение в США, характеризовал Прандтля "непрактичной личностью" [31].

Политикой проф. Прандтль почти не интересовался, как и большая часть его академического окружения, справедливо полагая, что правительство Его Величества кайзера Вильгельма состоит из таких же профессионалов в своих вопросах, как и он в своих. Они ошибались, как, в свою очередь, и их коллеги-конкуренты в нашей стране!

### 3. ШКОЛА Л. ПРАНДТЛЯ

Не каждому исследователю посчастливится увлечь в свою науку и вдохновить столь большое количество последователей и исследователей мировой величины, как это удалось Людвигу Прандтлю. В то же время, специалисты часто и не подозревают, что то или иное широко известное имя или авторитет принадлежит школе Прандтля. На наш взгляд, главная причина – не режим секретности того времени, а особый творческий климат прандтлевского коллектива.

Коллектив учеников Прандтля формировался постепенно на протяжении пятидесяти лет. Он начался с первого гидравлического лотка 1904 года, сделанного Прандтлем собственноручно. Затем Министерство образования Пруссии поддержало создание Института им. кайзера Вильгельма (KWI, 5 сотрудников в 1922). Годы Первой мировой войны и после нее были самыми успешными в творческом отношении. К началу Второй мировой в KWI было уже 44 сотрудника. Но война, а также послевоенные годы трудно дались самому ученому и его институту.

**3.1. Знакомство с коллективом.** Начнем с самой трудной, загадочной (особенно для нашего читателя) и спорной фигуры. **Иоганн Никурадзе** упоминается в мировой научной литературе едва ли не чаще своего учителя Л. Прандтля в связи с тщательно выполненными им измерениями турбулентного потока в гладкой и шероховатой трубах (опубликованы в 1932–1933 гг.) [32]. В них впервые представлены миру и обоснованы экспе-

риментально так называемые "логарифмические" распределения скоростей Прандтля-Кармана. При такой популярности этого имени совсем не легко было нам найти достаточные сведения о происхождении этого человека, его последующих работах и судьбе.

Как легко заподозрить нашему читателю, эта фигура – советского происхождения. Действительно, когда в 1921 году в Грузии "железной рукой" были подавлены все национальные движения и установлена большевистская диктатура, командированные в Германию два брата, студенты Тифлисского университета Георгий (старший, принявший имя Иоганн) и Александр оказались эмигрантами [33–35]. Оба изучали физику (в Гёттингене и Мюнхене соответственно), но младший увлекся также и политической деятельностью. Вероятно, участие в НСДАП он связывал с возможностью освобождения родной страны и отмщения большевикам за репрессированного отца, начальника железнодорожного депо [35].

С приходом к власти национал-социалистов в 1933 году, Иоганн проявляет рвение по административной линии, становится партай-геноссе и напештывает начальству и директору KWI Прандтлю, в первую очередь, на коллег-евреев, которые вдруг перестали удовлетворять требованиям нового закона о госслужащих. Напомним, в Германии это было время гонений на "неарийскую" физику и ее представителей. Хотя Прандтль и руководители гёттингенского университета В. Гейзенберг и др. не сумели отстоять профессоров-евреев, но их усилиями Никурадзе был уволен. Вероятно, в поведении этого человека (а не в имевшем место подозрении о шпионаже на СССР [2, 3]) причина табу на его имя, которого придерживается большинство авторов воспоминаний [4, 29]. Во время войны Никурадзе работал в университете Бреслау (ныне г. Вроцлав), затем в США, а после возвращения – в университете Аахена. Известно, что американские коллеги также относились к нему недоброжелательно [36]. Поскольку работа в университетах обязывала что-то публиковать, то несколько "перепевков" своих названных выше работ [32] напечатал в военные годы; в 1966 г. NASA переиздала переводы его статей в виде книги. Умер Никурадзе в 1979 году, ничем более не известный ни исследованиями, ни учениками [30]. Столь подробные сведения о нем появились в немецкой Википедии [33] лишь в марте 2012 г. (Отметим, впрочем, наличие противоположного мнения: российский теоретик и историк аэродинамики С.К. Бетяев, а также академик А.И. Леонтьев называют Никурадзе выдающимся

гидродинамиком [8, 37]).

**3.2. Теодор фон Карман** (1881, Будапешт – 1962, Аахен), выходец из галахической еврейской семьи, знаменит едва ли менее, чем его Doktorvater Людвиг Прандтль. Больше всего на слуху его "дорожка Кармана"<sup>2</sup> (1911 г). Но известны также "уравнение Фёпля-Кармана" в теории деформации эластичных пластин, ашпроксимация Чаплыгина-Кармана-Чена для потенциальных течений, константа Кармана  $\kappa = 0.40$ , уравнение Фалковича-Кармана, поправка Кармана-Чена и "оживальная форма" Кармана в сверхзвуковой аэродинамике, корреляция Кармана-Никурадзе, уравнение Кармана-Хоуарта для вязкой жидкости и турбулентности, параметр Кармана-Польгаузена и интегральное уравнение Кармана в теории пограничного слоя [38].

Карман лишь на шесть лет моложе своего учителя [5, 38]. Некоторые свидетельства позволяют предположить о несколько ревнивом отношении Кармана к результатам учителя-сверстника. Так, легенду о женитьбе Прандтля связывают именно с его авторством. Подобно Прандтлю, он начал с проблем теории упругости, далеких от аэродинамики [39]. Затем – блестящий старт в институте Прандтля KWI, переход на преподавательскую работу в технический университет Аахена (ныне знаменит своим авиационным направлением), раннее (1920 г.) бегство от нацистов в США. В этой стране, в знаменитом Калтехе (Калифорния), Карман становится основателем двух ракетных предприятий – лаборатории *Jet Propulsion Laboratory* и компании *Aerojet*. Чрезвычайно велик его вклад и в прикладную математику. "Универсальный человек" – так называет его автор книги [40]. По совокупности трудов Кармана считают основателем американской аэронавтики; Национальная медаль науки США вручена ему лично президентом Дж.Ф. Кеннеди (1962). В Европе его имя носит международный Институт механики жидкости фон Кармана в Брюсселе. О богатой "вихрями" жизни Теодора Кармана можно прочитать в авторизованной книге [5].

**3.3. Отечественному читателю более всего известны Герман Шлихтинг** (1907–1982), автор популярной монографии по теории пограничного слоя [41, 42], ставшей учебником для многих специалистов. Вероятно, именно он является главным разработчиком многочисленных конкретных применений ТПС, "течений с трением", став таким

<sup>2</sup>И даже свою автобиографию [34] Карман назвал "Wirbel Straße", "Вихревая дорога".

образом сотворцом ТПС. В числе других важнейших результатов Шлихтинга – открытие волн Толмина-Шлихтинга, возникающих при смене ламинарного режима обтекания на турбулентный. Многое делал он и для авиационной промышленности Германии.

**3.4. Упомянутый выше Вальтер Толмин** (1900–1968) начал у Прандтля новое направление в МЖГ – теорию устойчивости течений, на основе чего была попытка объяснить возникновение турбулентности. Именно он получил в 1929 году первые результаты в этой области, рассматривая асимптотическое поведение малых возмущений в пограничном слое (сам термин "устойчивость течения" принадлежит ему). Он теоретически предсказал постепенную "раскачку" потока у стенки и появление волн – явление, известное теперь как волны Толмина-Шлихтинга. Далее Толмин кратковременно работал у Кармана в США, потом в Англии, но последующая и главная его деятельность протекала в университете Дрездена, а после установления советской зоны влияния – снова в Гёттингене. Его считали блестящим лектором. Ясный и живой стиль лекций был воспринят многими его учениками-последователями.

**3.5. Генрих Блазиус** (1883–1970), известный нам по "задаче Блазиуса" [22, 41], был одним из первых учеников Прандтля. Его задача (натекание безграничного ламинарного потока на полубесконечную плоскую пластинку, 1908 г.) – самая простая постановка ТПС, но именно она впервые продемонстрировала потенциал непонятой математиками идеи Прандтля. Вскоре Блазиус перешел в Инженерную школу Гамбурга (сейчас – Университет прикладных наук), где преподавал физику и гидромеханику до конца своей жизни. Известна также "теорема Блазиуса" о силе на тело в потенциальном потоке. Снискал репутацию выдающегося немецкого педагога [42, 43].

**3.6. Якоб Аккерет** (1898–1981), студент из Швейцарии, руководил постройкой KWI (1925–1926 гг.) и сам заинтересовался проблемами высокоскоростных полетов. Вернувшись на родину в 1927 году на должность главного гидравлика машино- и турбостроительного завода, подготовил и защитил диссертацию о силах в высокоскоростном потоке (1928), после чего перешел в университет ETH (Zürich). Названная диссертация знаменательна тем, что в ней впервые введен термин "число Маха" в память физика и философа Эрнста Маха. (В советской литературе в силу изве-

стных причин это имя всячески избегали, называя тот же параметр "числом Берстоу" или "Маевского" [44]. Далее занимался мостом Такома (знаменитого своим разрушением под действием как раз "кармановских вихрей" в 1940 г., США), улучшением паровых и газовых турбин, корабельным винтом с изменяемым углом лопастей. Якоб Аккерет – иностранный чл-корр. Американской национальной инженерной академии за "вклад в понимание высокоскоростных и сверхзвуковых течений".

**3.7. Аэродинамик Макс Мунк (1890–1986)** удостоился персональной автобиографической статьи [45] в ведущем журнале по МЖГ. Он был первым студентом Прандтля, которого американцы пригласили работать к себе (1920 г.). Автору статьи нравится его высказывание, формула всей жизни: *"Настоящее исследование направляется любознательностью, а не техническими приложениями"*. Тем не менее, его результаты очень даже весомы в авиационной технике. В университете Гёттингена он получил сразу две степени доктора, одна – по физике, другая – по математике (1917, руководителем был К. Рунге), после чего стал заниматься разработкой авиационных профилей. В США Мунк предложил ряд нестандартных решений для аэродинамических труб и крыловых профилей. Вероятно, был конфликтным человеком [42, 43]. Недаром американский рекрутер характеризовал его как *"блестящий и донкихотствующий студент"*: под конец "технической" карьеры Мунк бросил все силы на доказательство Великой теоремы Ферма, о чем издал книгу (1977 г.).

**3.8. Гёртлер Генри** (согласно канадскому папорту) или Хайнрих (согласно немецкому происхождению, 1909–1987 г.) формально учеником Прандтля не был [30]. Математик, защитившийся по асимптотике дифференциальных уравнений, он, тем не менее, называл Прандтля своим учителем. Гёртлер стал сотрудником KWI только в 1937 году и принял активное участие в пограничных исследованиях вместе с Толмином и Шлихтингом. Его "задел" по асимптотике оказался кстати: рассмотрев пограничный слой вблизи вогнутой поверхности, он теоретически установил возможность периодического винтового течения (теперь носит имя Тейлора-Гёртлера), когда толщина пограничного слоя становится сравнимой с радиусом кривизны поверхности. Г.Гёртлер был членом академий наук Гейдельберга и "Leopoldina", председателем Общества прикладной мате-

матики и механики (GAMM), президентом международного Союза теоретической и прикладной механики (IUTAM), членом Американского института аэронавтики и астронавтики (AIAA).

**3.9.** Сайт [30] насчитывает 88 учеников Прандтля и 3159 учеников его учеников; среди последних также есть знаменитые имена. Сейчас не многое еще известно о связи прандтлевской школы и студентов университета с авиационно-космической сферой Германии, в том числе – периода Второй мировой войны. Это будет доступно будущим историкам науки и техники.

Под влияние школы Прандтля попал и "чистый" физик-теоретик Вернер Гейзенберг, когда он на один учебный год 1921/1922 приехал из Мюнхена в Гёттинген, чтобы послушать М. Борна [46] (Не такая ли свобода студенческого передвижения и есть – на самом деле – "Болонский процесс", формально-бюрократически внедряемый в наших университетах?). Тогда, под влиянием Т.Кармана, он рассмотрел устойчивость вихревой ламинарной "дорожки Кармана" между плоскопараллельными пластинами – и оставил непреходящие результаты в нашей науке.

Отметим, что и С.П. Тимошенко, будущий основатель Института механики НАН Украины (а также ... системы инженерного образования США), считал Прандтля своим учителем<sup>3</sup>, [30, 47]. Но дальнейший путь С.П. Тимошенко лежал в другую отрасль механики сплошной среды – в теорию упругости. В последней области Прандтль также продолжал работать и публиковаться.

### 3.10. Этика прандтлевской школы

Сказанное выше – более или менее известно в профессиональном кругу. Но вместе с тем, можно и удивиться некоторым аспектам творческого духа прандтлевского коллектива. Хотя абсолютно все ученики признают определяющее влияние Прандтля, большинство их "знаменитых" статей опубликованы под одной фамилией. Поминая в своих лекциях так называемое "число Прандтля", сам Л. Прандтль неизменно отмечал, что оно использовалось ранее Нуссельтом. Такова была скромность этого человека. Из мемуаров можно извлечь, что Прандтль не был блестящим лектором [4, 29]. Но во всех без исключения публикациях своих и учеников он добивался глубокой ясности изложения. Он всегда находил время побеседовать с учениками и сотрудниками, но свои идеи не навя-

<sup>3</sup>Его первым учителем был знаменитый механик, первый ректор киевского политехнического института В.П. Кирпичев.

зывает, чтобы они работали независимо, как только можно. Полагаю, что в этом абзаце – ответ на часто обсуждаемый сегодня вопрос: стала ли наука коллективным делом (эдаким фабричным конвейером производства знаний) или по-прежнему дело творческих одиночек и энтузиастов.

#### 4. Л. ПРАНДТЛЬ И НАЦИЗМ

Как упоминалось, проф. Л.Ф. Козлов собирался написать статью или книгу о Л.Прандтле. Его останавливало лишь подозрение в адрес Прандтля о сотрудничестве последнего с фашистами, работе на Luftwaffe. Теперь накопилась информация, позволяющая ответить на большую часть подобных вопросов.

Вопрос о сотрудничестве с нацистами для нынешних немцев даже более принципиален, чем для нас. После Второй мировой войны немцам было болезненно-важно самим себе ответить, как это из ведущей мировой нации, нации философов, писателей, художников и музыкантов, культуры и гуманизма они превратились в страшное чудовище, принесшее смерть миллионам людей Европы и, особенно ее восточной части. Сегодняшние немцы стыдятся себя, прошлых. Они многое делают, чтобы фашизм более не повторился.

Сотни исследований были проведены на средства нового немецкого государства и частных лиц, сотни книг изданы и тысячи воспитательных акций проведены. В частности, анализу событий и поведению сотрудников гёттингенского университета посвящены материалы ряда общедоступных сайтов. Так, в немецкой Википедии выставлен на обзор список профессоров, присягнувших Гитлеру еще в 1933 г. Прандтля там нет. Однако таковым называют прандтлевского ученика А. Буземанна [30]. Правительство британской зоны оккупации сразу же провело "денацификацию" профессоров университета; 70-летний Прандтль преподавание продолжил.

Но тогда в Гёттингене, как и во всей Германии, сторонники "арийской науки" организовали травлю "еврейской физики" и ее представителей. Для разумных и успешных ученых, названных выше, "национального вопроса", разумеется, не стояло. Научные результаты для них могли быть либо верными, либо неправильными, безотносительно к национальности автора. Но их подвела вера в профессионализм чиновников нового немецкого государства и аполитичность самих ученых. Прандтль, как и В. Гейзенберг, как и другие именитые ученые, делали все возможное для защиты своих еврейских коллег. Известно письмо ряда ве-

дущих немецких ученых рейхсляйтеру СС Гиммлеру в защиту коллег-евреев, под которым стоит и подпись Л. Прандтля. Но наивная вера профессоров не помогла! Прандтль с ужасом сообщал жене слухи о концлагерях и убийствах людей, о которых ему сказала соседка [2]. Откуда было знать профессорам, что именно господин рейхсляйтер и есть организатор расстрелов "евреев, цыган и коммунистов" ?

Снова возникает вопрос, актуальный и для нашего прошлого и настоящего: имеет ли право ученый быть отрешенным от социальных проблем и политики? Т. Карман, вернувшийся в Гёттинген вместе с американскими войсками в 1945 году, вспоминал: старый ученый пожаловался, что и не подозревал об ужасных преступлениях нацизма, о концлагерях. "С вашим умом это можно было бы вычислить, господин учитель", – ответил ученик.

Война была личной трагедией и самого ученого. Особенно трагичным был 1941 год: умерла его жена, на Восточном фронте погиб зять, умер первый внук.

#### 5. РАЗМЫШЛЕНИЯ О НАУЧНОМ МЕТОДЕ ПРАНДТЛЯ

Со времен Гегеля известно, что "знание законов пищеварения не помогает переваривать пищу". Но, вопреки азбучной истине, многие естествоиспытатели задумывались над законами мышления, над причинами и способами познания не реже, чем философы. Вспомним гносеологические работы физиков Эрнста Маха, Анри Пуанкаре, Э. Шредингера, В. Гейзенберга, М. Борна, Т. Куна, В.Л. Кирпичева, математиков В.И. Арнольда, Ю.И. Манина, даже религиозного философа авиаконструктора И.И. Сикорского. Вероятно, и самого Прандтля вопросы методологии науки интересовали, но свои мысли о научном методе он оставил нам всего лишь на четырех страницах [48]. Ход его мыслей, и особенно – каким именно образом пришел он к идее пограничного слоя, до сих пор являются предметом дискуссий и анализа (см., например [49]).

##### 5.1. Теоретик или экспериментатор?

Так уж повелось в естественных науках, что мы делим физиков на "экспериментаторов" и "теоретиков". Чего больше в методах Прандтля – наблюдений, эксперимента или теории и математики? "Практики" и "экспериментаторы" зачислят Прандтля в ряды своих сторонников, и это в большой степени справедливо. Знавшие Прандтля

ученые восхищаются его необыкновенной физической интуицией. Предваряя одно из выступлений Прандтля в 1948 году, В. Гейзенберг пошутил о способности этого человека "видеть решение уравнения, не решая его" [48].

Но и "теоретики" с еще большим основанием считают его своим. Выше уже цитировалось суждение его биографа и дочери о том, что исследование течений Прандтль начинал как отвлеченно-научное [2, стр. 28]. Поясняя свою идею математикам [1], Прандтль опирался на кардинальное изменение в краевых условиях для уравнений "гидродинамики в гиббсовых обозначениях"<sup>4</sup>, если в них положить вязкость  $\nu = 0$ . Всего лишь "странное математическое явление", но раскрытие его физического содержания и есть теория пограничного слоя (ТПС). "Непостижимая эффективность математики", – говорил физик, нобелевский лауреат Юджин Вигнер [50]. И в нашей истории сначала была математика, а уж потом – осознание глубокого физического содержания идеи Прандтля, проведенное его учениками и им самим путем рассмотрения множества конкретных постановок задач [29, 41].

Соотношение теории и эксперимента всегда было дискуссионным пунктом философии науки. Обычно философы берут примеры из классической физики, опускающейся в глубины материи. Но отметим недавнюю книгу [51], где предметом рассмотрения стала именно наша наука.

И в дальнейшей работе – в теории крыла, и открывая законы турбулентности – Прандтль исходил в первую очередь из математики, рассматривая ее следствия из начальных физико-математических формулировок (законов). Свидетельствует Т. Карман: "Я помню, когда Прандтль работал над своей теорией несущих линий (крыла – автор) летом 1914 года... "Послушайте, – сказал мне Прандтль, – я рассчитываю эти проклятые вихри и не могу получить приемлемый результат для индуктивного сопротивления. Я попытался *заставить* подъемную силу падать до нуля на концевой части крыла, но индуцированная скорость становится бесконечной. Хорошо, подумал я, природе не нравится подобное нарушение непрерывности, поэтому я *заставил*<sup>5</sup> подъемную силу возрастать линейно с расстоянием... Это также не действовало... Прандтль продолжил работать над ней и позже нашел решение. Оно является более или менее математическим приемом..."

<sup>4</sup>уравнения Навье-Стокса, говорим мы сегодня.

<sup>5</sup>Выделенное авторами "заставить", "заставил" надо понимать в математическом смысле, как "принял граничное условие".

## 5.2. Роль математики в гидромеханике

При всем этом выглядит парадоксом критическое отношение Прандтля к чистой математике. Он считал лишь ту математику полезной, что дает конкретный инструмент инженеру. Курс, который он читал в Гёттингенском университете (1922 г.) вызывающе назывался "Интуитивная и полезная математика", [29], Wuest в [4]. Прандтль вряд ли прав в таком прагматизме: известны случаи в истории науки, когда чистая теория вдруг находила физические приложения (теория групп, например, в кристаллофизике или даже в гидромеханике). Это противоречит, кроме того, охарактеризованному выше методу мышления Прандтля. Можно предположить, что его неприятие вызвано некоторыми "перегибами" в современных ему дискуссиях в науке. Таким "раздражителем" мог быть для него гёттингенец Давид Гильберт, чья настойчивая формализация математики многими подвергалась критике. Вскоре она привела к возникновению во Франции группы формализаторов под именем Никола Бурбаки (1925 г.), чьи книги по математике до сих пор ссорят сторонников и противников [52].

До сих пор ответы на вопрос о взаимоотношении теории и эксперимента базировались на примерах из физики, а ситуация в гидромеханике осталась вне изучения. Способ мышления в этой науке, четко проведенный в знаменитом учебнике МЖГ Л.Г. Лойцянского [22], состоит в следующем: коль задача не решается в явном виде (а она не решается почти всегда) – сформулируй упрощающие гипотезы, которые выражают основные физические свойства течения и пренебрегают вторичными; получишь модель течения, которую и исследуй; помни при этом, что полученная теория – все-таки *модель*, все-таки приближенная. Прандтль и его школа способствовали осознанию такого пути познания, созданию системы моделей, которая и составляет основу современной МЖГ. Как снова свидетельствует Карман [5, 29], "его способность установить упрощенные уравнения, которые выражают существенные физические отношения и опускают несущественные, было уникальным – даже в сравнении с его великими предшественниками в механике Л.Эйлером и Д'Аламбером".

## 5.3. Компьютерная революция

Компьютерная революция перевернула нашу науку в первую очередь (первая программируемая вычислительная машина Конрада Цузе использовалась именно для аэродинамических ра-

счетов, 1940 г.). В программы наших вузов в настоящее время вводят курс CFD (Computer Fluid Dynamics). Это, безусловно, прогрессивное явление. Но, подобно возникшей социально-психологической болезни "компьютерная зависимость", данное явление имеет и негативную сторону. Теперь много легче и быстрее "сделать диссертацию" с помощью CFD-программ, не вникая в физический смысл большого количества получаемых "цифр", без анализа степени общности результатов (методом размерностей, например).

Современные философы пытаются понять, куда ведет нас компьютерная эра [51]. По мнению академика РАН В.И. Арнольда "Компьютерная революция позволяет заменить образованных рабов невежественными". Надеемся, что с нашей наукой такого не случится, и мы останемся учениками Л. Прандтля.

## 6. ГИДРОМЕХАНИКА В СССР

Конечно же, в СССР, где не меньшие энтузиасты не менее интенсивно, чем в Германии, развивали отечественную авиацию и ракетную технику, было хорошо и своевременно осведомлено о работах гёттингенских аэродинамиков. Не обошлось, как известно, без шпионов. Но главным источником информированности (и в какой-то мере – взаимодействия) были исторические научные связи двух стран, образованность и культура отечественных ученых.

Со времен Ломоносова и Эйлера русская техническая мысль и физическая наука творчески взаимодействовала с немецкой. Вплоть до разгрома нацистов советской армией, мы заимствовали немецкую организацию высшего образования, множество технических терминов (шлагбаум, шайба, арматура, шнек, цапфа, демпфер, шпиндель, циферблат и др.). А вот уважения к отечественным гениям русскому государству не хватало, и особенно – после 1917 года. Печальным примером является судьба гидромеханика Рябушинского, основателя, совместно с Н.Е. Жуковским, Аэродинамического института в Кучино (Московская обл.). Про "*схему Рябушинского*" читали мы в монографиях по кавитации, но о личности автора узнали лишь недавно [23, 53]. Механик С.П. Тимошенко, авиастроитель И.И. Сикорский и многие другие реализовали себя лишь за границей, в частности, в США.

Перевод книги Прандтля [21] появился на русском языке вскоре после издания в Германии с восторженной характеристикой автору Л.С. Лейбензона (тогда еще не академика и еще

не репрессированного). О развитии прандтлевской теории крыла советскими учеными можно прочитать в [7], о развитии ТПС – в [59].

Поездом в Японию Л. Прандтль посетил Москву в сентябре 1929 г. Об этом визите больше известно из немецких источников [2, 3], чем из современных русских или, тем более, советских. Кроме Большого театра и Третьяковской галереи, от которых гость был в восторге, Прандтль посетил Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), где беседовал с его директором С.А. Чаплыгиным<sup>6</sup>, и прочел несколько лекций. Гость был приятно удивлен, сколь серьезно советское правительство относится к аэродинамической науке. Подробности беседы с проф. Чаплыгиным неизвестны – а ведь они были "конкуренты" в создании теории крыла.

После Москвы, сообщает дочь [2, 3], было многодневное путешествие в закрытом вагоне через всю Россию. Затем – Япония (2 недели) и США. О пребывании в императорской Японии известно больше, чем в советской России. Интересно, как повлияло на восприятие России Прандтлем его близкое знакомство с проф. Сорбонского университета Д.П. Рябушинским, который до конца своих дней считал себя гражданином России [23]? А визит в США был организован по инициативе мецената Гугенхейма и физика Милликена: последние сочли в итоге, что пригласить на постоянную работу Т. Кармана – более практично для задуманного ими аэрокосмического центра [31].

Среди ученых СССР, развивавших теорию пограничного слоя, следует назвать Л.Г. Лойцянского [22], В.Я. Шкадова, чл.-корр. РАН В.Я. Нейланда, ряд других.

## 7. ГИДРОМЕХАНИКА И ТПС В УКРАИНЕ И ИГМ НАН УКРАИНЫ

Украина конца XIX века больше известна как черноземная житница Европы. Однако именно в тот период в ней родились бунтарские и светлые личности, внесшие величайший вклад в будущую авиацию и космонавтику – знаковые технику и науку недавно окончившегося XX века. Маленький провинциальный город Короп дал миру

<sup>6</sup>На имеющемся в Интернете фото сотрудников ЦАГИ с Прандтлем, проф. Чаплыгин, однако, отсутствует. Имена людей, окружавших Прандтля, неизвестны. Интересно бы также выяснить судьбу и роль русских, посещавших Прандтля в Гёттингене (6 человек с 1912 по 1921 годы); в их числе будущий чл.-корр. АН СССР Н.Г. Четаев. По-русски звучат имена и некоторых аспирантов Прандтля [30]: Борис Пуннис, Alexander von Baganoff – но о них ничего более не обнаружено.

Н.И. Кибальчича – изобретателя и народовольца, предложившего первый в мире проект летательного аппарата для космических перелетов. Уроженец Полтавы доброволец Украинской народной армии (УНР) Ю.В. Кондратюк (Шаргей) сумел как-то совместить строительство уникальных зернохранилищ с пионерскими решениями для космической техники, которую видел – увь! – только в мечтах.

Киевляне на год опередили жителей Гёттингена: полетом дирижабля с названием «Киев» они восхищались еще в 1911 году (конструктор Ф.Ф. Андерс [54]). Но и тогдашние власти предпочитали иноземные технические новинки. Вот отчего нас покинул знаменитый впоследствии авиаконструктор И.И. Сикорский. Житомирянин С.П. Королев ковал космический щит Родины сначала как заключенный спецтюрем НКВД (1938–1943 гг.), а позднее – как академик... О.К. Антонов, А.М. Макаров и ряд других незаурядных личностей уже в более позднее время сумели сделать свою страну признанной авиационно-космической державой, одной из немногих в мире.

Роль гидротехники в многовековом развитии общества столь велика, что это послужило основанием немецкому философу К. Виттфогелю для теории особого "Гидравлического государства" [55]. К сожалению, практика "великих сталинских строек коммунизма" подтвердила его выводы относительно СССР. Первоначально, для решения таких проблем в Киеве был создан НИИ водного хозяйства Украины (1926 г.). Два его первых директора – академик Е.В. Опшюков (двоюродный брат первого Президента Украины М.С. Грушевского) и проф. А.В. Огиевский – прошли через жернова сталинских лагерей. Позднее в проблематику исследований включили и кораблестроительные проблемы, что дало основание преобразовать НИИ в Институт гидромеханики НАН Украины (1934 г.). В нем продолжили разработку прикладных задач, начали развитие фундаментальных теорий.

Механика жидкости и газа в нашей стране, как и многое другое, развивалась по остаточному принципу. Лучшие умы уходили "в центр"; здесь же он размещал институции по своему усмотрению, исходя из своей политики конфронтации со всем миром. Не так было, не так есть в Германии, вдвое меньшей Украины по размерам: местный или центральный орган финансировал школу конкретной личности, конкретного ученого, обосновавшегося в том или ином университете.

Гидромеханики и аэродинамики Украины являются воспитанниками блестящей плеяды ученых-

механиков России и СССР, восходящей своими корнями к именам Н.Е. Жуковского, А.Н. Крылова, С.А. Чаплыгина, Н.Е. Кочина и других. Большинство из них воспитано на замечательном учебнике "Механика жидкости и газа" Л.Г. Лойцянского [22], который сам являлся блестящим продолжателем работ Л.Прандтля по теории пограничного слоя и турбулентности. В этом учебнике с предельной ясностью изложена "система мышления" гидромеханики, состоящая в формулировании моделей реальности, использующих те или иные упрощения "полных" уравнений Навье-Стокса.

Одна из первых научных школ МЖГ в Украине возникла в Харькове, будучи представленной такими именами, как Л.Д. Ландау и Н.И. Ахиезер, позднее – И.Е. Тарапов. Она, однако, не достигла необходимой степени единства и длительности совместной работы.

В Днепропетровске, бывшем секретном городе, мощная школа аэродинамиков возникла после 1951 года вокруг военно-космического производства ГKB "Южное". Донецкую школу гидромехаников, ведущую свое начало с 1961 года, связывают с именем проф. И.Л. Повха – коллеги Л.Г. Лойцянского по ленинградскому политехническому. Теплотехнические приложения МЖГ развивались в Институте технической теплофизики НАН Украины (ИТТФ).

Гидро- и аэромеханика страны обслуживает (точнее – могла бы обслуживать) кораблестроительную отрасль, авиационные предприятия в Киеве, Харькове, Запорожье, нужды гидротехники Украины. Средоточием теоретической аэродинамики в Киеве являются Национальный университет им. Т.Г. Шевченко (академик И.Т. Швец, проф. Ю.И. Шмаков) и Национальный авиационный университет. Последнюю школу справедливо связывают с именем проф. А.М. Мхитаряна [44]: по его инициативе написан ряд учебников, построены аэродинамические трубы. Непосредственно в теории пограничного слоя и турбулентности работает проф. В.Т. Мовчан и его школа. Они создали собственную модель турбулентности в ПС, которая обобщает прандтлевскую модель пути смешения и сближает ее с более универсальными и современными "дифференциальными моделями" [56]. Физическое понимание модели пути смешения Прандтля существенно продвинуто экспериментами проф. Е.П. Дыбана и Э.Я. Эпик (ИТТФ НАНУ).

Гидромеханические исследования в Институте гидромеханики НАН Украины были начаты академиком АН УССР Г.Е. Павленко (1898–1970) в

1930-х годах в направлении гидродинамики судна. Затем тематика института была значительно расширена как по инициативе ведущих сотрудников, так и решением Правительства СССР. Как мы указали в начале, теория ПС и турбулентности развивается в нашем институте в отделе физической гидромеханики (1964 г., основатель – проф. И.К. Никитин) и отделе гидробионики и управления пограничным слоем (1965 г., основатель – проф. Л.Ф. Козлов). Профессор Никитин повел деятельность своего отдела в направлении учета сложных физических процессов в пограничном слое, в частности, в атмосферном пограничном слое под воздействием различных техногенных факторов (например, мощных тепловых и влажностных выбросов тех или иных охладителей электростанций) [16, 17]. Одна из его новинок – предположение о зависимости стратифицированной турбулентности от числа Ричардсона,  $\kappa = \kappa(Ri)$ . Он не знал, скорее всего, что Прандтль думал так же [20]. Подготовленные проф. Никитиным специалисты имеют большой потенциал в применении гидромеханической науки к задачам окружающей среды.

Профессор Л.Ф. Козлов организовал широкий фронт исследований "технического" пограничного слоя: изучение его устойчивости, влияние кривизны поверхности, способов управления ПС, экспериментального и теоретического исследования "тонкой" структуры ПС и его восприимчивости к возмущениям, [59]. Одним из первых в СССР он начал работы в области гидробионики, которые получили всесоюзный резонанс, [57]. Эти исследования ныне продолжают его ученики проф. В.В. Бабенко и проф. Г.А. Воропаев.

Людвиг Прандтль как мыслитель широкого круга интересов, не мог не интересоваться и "смежными" научными проблемами. Некоторым диссонансом в его сугубо технической книге [20] смотрится рис. 8.18, который более не повторяется в других книгах Прандтля. Это – предполагаемое распределение скорости воздушного потока внутри и над виноградной плантацией, которое выглядит весьма необычно в сравнении с профилями скорости в технических течениях. В то время такого рода задачи (течения в окружающей среде, скажем мы обобщенно) почти не имели практического спроса. Однако Прандтль был убежден, что именно проблемами геофизическими, проблемами погоды и окружающей среды гидромеханика будет заниматься в будущем [29]. Им опубликованы две статьи разных лет по приземному пограничному слою и явлениям в атмосфере. Они вошли в фундамент современной метеорологии, что также

находит развитие в нашей стране. Проблематика "заторможенных" пограничных слоев начала интенсивно развиваться в 1960-х годах (преимущественно агрометеорологами) и сегодня принесла новые и необычные результаты [58]. В Институте гидромеханики это направление развивает проф. Е.А. Гаев.

Отдельное направление вел канд. физ.-мат. наук В.М. Солопенко [60]: он пытался дать обобщение уравнений Прандтля, более точно приближающее систему уравнений Навье–Стокса, развить методы линейной теории гидродинамической устойчивости для него.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня, после более чем ста лет бурного развития, наука о движении жидкостей и газов переживает кризис. Этот кризис, выражающийся в ее малой востребованности, недофинансировании, имеет место в мировом масштабе и вызван отказом большинства крупных государств мира от военного пути решения конфликтов. Особенно больно этот кризис коснулся украинской науки гидромеханики. Мы пока еще живы за счет былых достижений в оборонных задачах. Мы владеем как классическим инструментарием механики жидкости и газа, созданным Людвигом Прандтлем, как современными ему методами анализа гидромеханических проблем, так и достижениями последующих лет. Но может случиться, что новому поколению уже не к кому будет обратиться для получения знаний. Настоящая статья, возможно – последнее будущим поколениям от исчезнувшей научной "Атлантиды".

## Благодарности

Автор выражает благодарность известному российскому историку науки проф. Г.К. Михайлову за интерес к данной работе и ее поддержку множественностью полезных ссылок, а также доценту Национального университета водного хозяйства и природопользования (г. Ровно) доценту А.Е. Щодро за предоставленные материалы [36]. Особенно признателен автор академику В.Т. Гринченко за полезные и творческие обсуждения этой статьи в ходе ее развития.

1. Prandtl L. Ueber Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung.– Verhandlungen des III. Int. Mathematiker-Kongress zu Heidelberg 1904.: (Цитируется по: Prandtl L., Betz A. Vier Abhandlungen

- zur Hydromechanik und Aerodynamik. Band 2 in der Reihe "Goettinger Klassiker der Stroemungsmechanik", Univ. Göttingen.– 2010 p.
2. *Vogel-Prandtl J.* Ludwig Prandtl. – Ein Lebensbild, Erinnerungen, Dokumente.– Göttingen: Universitätsverlag Göttingen, 2005.– 218 p.
  3. *Vogel-Prandtl J.* Ludwig Prandtl. – A Biographical Sketch, Remembrances and Documents.– Trieste, Italy: The International Centre for Theoretical Physics, 2004.– 197 p.
  4. Ludwig Prandtl, ein Fuehrer in der Stroemungslehre. Biographische Artikel zum Werk Ludwig Prandtls.– (*Meier G.E.A.* Herausgeber.) Fr. Vieweg&Sohn Verlag: Braunschweig/Wiesbaden, 2000.– 220 p.
  5. *von Karman Th., Lee Edson.* Die Wirbelstrasse. Mein Leben für die Luftfahrt.– von Hoffmann u. Campe: , 1968.– 434 p. (Английский оригинал: The wind and beyond: Theodore von Karman: pioneer in aviation and pathfinder in space. Boston, Massachusetts: Little, Brown, 1967.)
  6. *Фабрикант Н.Н.* 4 февраля – 100 лет со дня рождения Л.Прандтля (1975 г.) // В сб. "Из истории авиации и космонавтики".– 1975.– вып. 27.– С. 7 – 11.
  7. *Апарин В.А.* 70 лет со времени публикации работы Л.Прандтля "Теория несущего крыла" (1918 – 1919 гг.) // В сб. "Из истории авиации и космонавтики".– 1989.– вып. 59.– С. 119 – 124.
  8. *Леонтьев А.И., Кавтарадзе Р.З.* Выдающийся гидромеханик // Исследования по истории физики и механики, 2001.– М.– Наука. 2002.– С. 153-179.
  9. *Меркулова Н.М.* Работы Л.Прандтля в области аэродинамики // Исслед. по истории и теории развития авиац. и ракет-космич. науки и техн.– М.– Наука. 1983. № 2.– С. 81-97.
  10. *Козлов Л. Ф.* Теоретические исследования пограничного слоя.– К.: Наук. думка, 1982.– 296 с.
  11. *Козлов Л. Ф.* Ламинарный пограничный слой при наличии отсасывания.– К.: Наук. думка, 1968.– 195 с.
  12. *Козлов Л. Ф., Бабенко В. В.* Экспериментальные исследования пограничного слоя.– К.: Наук. думка, 1978.– 184 с.
  13. *Козлов Л. Ф.* Теоретическая биогиродинамика.– К.: Вищ. шк., 1983.– 239 с.
  14. *Козлов Л. Ф.* Очерки по гидробионике.– К.: Наук. думка, 1985.– 112 с.
  15. <http://ru.wikipedia.org/>, статья "Прандтль, Людвиг".
  16. *Никитин И.К.* Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области.– К.: Изд-во АН УССР, 1962.– 142 с.
  17. *Никитин И.К.* Сложные турбулентные течения и процессы теплопереноса.– К.: Наук. думка, 1980.– 228 с.
  18. *Доманов В.Н., Гаев Е.А., Костин А.Г.* 90-летний юбилей профессора Ивана Кузьмича Никитина // Прикладна гідромеханіка.– 2001.– вып. 3.– С. 88-89.
  19. *фон Карман Т.* Аэродинамика: Избранные темы в их историческом развитии.– Ижевск: РХД, 2001.– 208 с.
  20. *Prandtl L., Oswatitsch K., Wiegardt K.* Führer durch die Strömungslehre.– F. Vieweg&Sohn: Braunschweig/Wiesbaden, 1990.– 647 p.
  21. *Прандтль Л., Титъенс О.* Гидро- и аэромеханика (В двух томах.) М.-Л. т. 1, 1922 и т. 2, 1925.
  22. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа.– М.: Наука, 1973.– 847 с.
  23. <http://ru.wikipedia.org/wiki/>, статья "Рябушинский, Дмитрий Павлович".
  24. *Ворович И.И.* Математические проблемы нелинейной теории пологих оболочек.– М.: Наука, 1989.– 376 с.
  25. *Васильева А.В., Бутузов В.Ф.* Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений.– М.: Высшая школа, 1990.– 208 с.
  26. <http://ru.wikipedia.org/wiki/>, "Эффект пограничного слоя".
  27. *Олейник О. А., Самохин В. Н.* Математические методы в теории пограничного слоя.– М.: Наука, 1997.– 512 с.
  28. <http://www.deutsche-biographie.de/sfz18772.html,sfz97108.html,sfz6752.html>, статьи
  29. *Oswatitsch K., Wiegardt K.* Ludwig Prandtl and his Kaiser-Wilhelm-Institut // Ann. Rev. Fluid Mech.– 1987.– 19.– P. 1 – 25.
  30. <http://www.genealogy.ams.org/id.php?id=51374>. Mathematics Genealogy Project. Ludwig Prandtl.
  31. *McGee H.* The Triple Alliance: Millikan, Guggenheim, and von Karman // Engineering and Science.– 1981.– 44.– P. 24 – 26.
  32. *Nikuradse J.* Gesetzmäßigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren.– Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens. В: Band 3, 1932.– 36 p.(Русс. перевод: Закономерности турбулентного движения жидкостей в гладких трубах. – В "Проблемы турбулентности", М.-Л.: ГНТИ, 1936. – 332 с.
  33. [http://de.wikipedia.org/wiki/Johann\\_Nikuradse](http://de.wikipedia.org/wiki/Johann_Nikuradse), статья "Johann Nikuradse".
  34. [http://de.wikipedia.org/wiki/Alexander\\_Nikuradse](http://de.wikipedia.org/wiki/Alexander_Nikuradse), статья "Alexander Nikuradse".
  35. <http://ru.wikipedia.org/wiki/>, статья "Никурадзе, Александр".
  36. *Hager W.H.* Hydraulicians in Europe, 1800–2000: a biographical dictionary of leaders in hydraulic engineering and fluid mechanics.– IAHR: Taylor & Francis, Madrid.– 2009 p.994
  37. *Бетяев С.К.* К истории гидродинамики: научные школы России XX века // Успехи физ. наук.– 2003.– 173.– С. № 4.419–446
  38. <http://ru.wikipedia.org/>, статья "Карман, Теодор фон".
  39. <http://ru.wikipedia.org/>, статья "Борн, Макс".
  40. *Gorm M.H.* The universal man: Theodore von Karman's life in aeronautics.– Washington, DC: Smithsonian, 1992.– 320 p.
  41. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя.– М.: Наука, 1969.– 387 с.
  42. <http://ru.wikipedia.org/wiki/>. Русскоязычные статьи про учеников Прандтля: "Шлихтинг, Герман", "Блазиус, Пауль Рихард Генрих", "Буземан, Адольф", "Аккерет, Якоб", "Мунк, Макс".
  43. <http://de.wikipedia.org/wiki/>. Немецкие статьи про учеников Прандтля: "Heinrich Blasius", "Jakob\_Ackeret", "Max\_Munk", "Adolf\_Busemann\_(Ingenieurwissenschaftler)", "Henry\_Görtler".
  44. *Мхитарян А. М.* Аэродинамика.– М.: Эколит, 2012.– 448 с.

45. *Munk M.M.* My early aerodynamic research – thoughts and memories // *Ann.Rev. Fluid Mech.*– 1981.– 12.– P. 1 – 7.
46. <http://ru.wikipedia.org/>, стаття "Гейзенберг, Вернер".
47. *Тимошенко С.П.* Воспоминания.– К.: Наукова думка, 1993.– 424 с.
48. *Prandtl L.* Mein Weg zu Hydrodynamischen Theorien // *Physikalische Bätter.*– 1948.– Н.2.– P. 89 - 92.
49. *Bloor D.* Sichtbarmachung, common sense and construction in fluid mechanics: the cases of Hele-Shaw and Ludwig Prandtl // *Studies in History and Philosophy of Science.*– 2008.– **29**.– P. 249–258.
50. *Вигнер Е.* Этюды о симметрии.– М.: Мир, 1971.– 218 с.
51. *Winsberg E.B.* Science in the Age of Computer Simulation.– Chicago: University of Chicago Press, 2010.– 152 p.
52. *Кутателадзе С.С.* Апология Евклида. Гл. 2 в кн. "Наука и люди".– Владикавказ: ЮМИ ВНЦ РАН и РСО-А, 2010.– 360 с..
53. *Михайлов Г.К.* Дмитрий Павлович Рябушинский (к 100-летию Кучинского аэродинамического института) // *Вопросы истории естествознания и техники.*– 2005.– № 3.– С. 101 – 129.
54. *Никитюк Т.* Взлет и забвение. Портрет Федора Андерса в интерьере истории воздухоплавания "Зеркало недели. Украина" №30, 15.08.2008. (<http://www.vozduhoplaviteli.ru/index.php?id=131>)
55. *Гества К.* Выстроенный на воде и крови. Гидротехнический архипелаг ГУЛАГ, 1931–1958 (<http://shalamov.ru/research/61/10.html>)
56. *Кулик Н.С., Мовчан В.Т., Шквар Е.А.* Математичні моделі пристійної турбулентності.– К.: НАУ, 2012.– 356 с.
57. *Барышников Н.С.* Тигре - дельфины!.– Л.: Гидрометеиздат, 1975.– 128 с.
58. *Flow and Transport Processes with Complex Obstructions: Applications to Cities, Vegetative Canopies, and Industry (Ye.A. Gayev and J.C.R. Hunt editors).* – NATO Science Series, Springer Publ., 2006, v. 236, 350 pp.
59. *Козлов Л. Ф., Бабенко В. В.* Развитие теории пограничного слоя // *Вестник АН УССР.*– 1985.– № 3.– С. 91–92.
60. *Солопенко В.М.* Приближенные модели динамики вязкой жидкости. Обоснование и методы расчета.– К.: Вища школа, 1980.– 241 с.