

УДК 532.5

**В.А. Плоткина**Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б**ТЕОРИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА РУБЕЖЕ XIX-XX ВЕКОВ**

*Представлен анализ развития теории гидродинамического и теплового пограничных слоев на стыке двух столетий. Основываясь на теоретических и экспериментальных исследованиях, приводится хронология исторических событий теории развития пограничного слоя. Рассматриваются аналитические предпосылки в исследовании пограничного слоя, сформулированные на основе теоретических и экспериментальных исследований известных ученых-экспериментаторов в области гидродинамики. Включены основные термины и определения, раскрывающие необходимость исследования теории развития пограничного слоя. Показана перспектива развития и целесообразность изучения исторического аспекта теории пограничного слоя.*

**Ключевые слова:** гидродинамический и тепловой пограничный слой, идеальная жидкость, сопротивление трению, отсос пограничного слоя, ламинарное и турбулентное течения.

**V.A. Plotkina****THEORY OF BOUNDARY LAYER ON THE TURN XIX – XX CENTURIES**

*The analysis of development of the theory is presented in this article hydrodynamic and thermal boundary layers on a joint of two centuries. Based on theoretical and experimental studies, a chronology of historical events of the theory of the boundary layer development. The analytical background in the study of the boundary layer, formulated on the basis of theoretical and experimental studies of known experimental scientists in the field of hydrodynamics. This article includes the basic terms and definitions reveal the necessity to study the development of the theory of the boundary layer. This publication shows the development prospects and feasibility of studying the historical aspect of the theory of the boundary layer.*

**Key words:** hydrodynamic and thermal boundary layer, ideal fluid, abrasion resistance, boundary layer suction, laminar and turbulent flow.

**Введение**

Современное разнообразие методов и способов управления пограничным слоем не дает четкого представления об истории развития теории исследования пограничного слоя вблизи поверхности тела. При этом в мировой практике стремятся совершенствовать навыки в разработке новых способов управления пограничным слоем.

Поэтому при всем разнообразии методов управления пограничным слоем вблизи поверхности корабельных судов общепризнанной характеристики исследования теории пограничного слоя в настоящее время еще не сложилось. Вследствие этого настоящая научная работа обобщает исторический процесс развития теории пограничного слоя на протяжении нескольких столетий.

При всем многообразии способов управления пограничным слоем исторический аспект не может быть проигнорирован. Именно научный анализ теории развития пограничного слоя способствует совершенствованию навыков в развитии новых способов и методов управления пограничным слоем.

**Объекты и методы исследований**

Для настоящего исследования был выбран исторический рубеж XIX-XX вв. не случайно, так как именно в данном промежутке времени формируются основные закономерности в истории развития теории пограничного слоя.

В первой половине XIX в. сформировавшиеся представления о теории механики вязкой жидкости отвечали практическим запросам со стороны энергично развивавшихся гидродинамики и гидромеханики, учения о трении в машинах, физики и химии нефтяных и других смазочных веществ.

Первые опыты, показавшие преобладающее влияние сил вязкости на сопротивление при малых скоростях, принадлежали французскому физику, военному инженеру Шарлю Огюстену Кулону (1801 г.). В развитии термина «пограничный слой» основное значение имели теоретические и экспериментальные исследования сопротивления в трубах и каналах при движении в них воды и других вязких жидкостей. Обстоятельные экспериментальные исследования движения вязкой жидкости в трубах очень малого диаметра были проведены французским ученым Жаном Луи Мари Пуазейлем в 1840-1842 гг.

Более ранние опыты были проведены немецким физиком и гидростроителем Людвигом Хагеном в 1839 г. В результате теоретических и экспериментальных исследований в конце 1839 г. был сформулирован закон, определяющий расход жидкости при установившемся течении вязкой несжимаемой жидкости в тонкой цилиндрической трубе круглого сечения: закон Хагена-Пуазейля.

Теоретическое решение задачи исследования движения вязкой жидкости было обосновано в 1846 г. математиком, механиком и физиком-теоретиком Джорджем Габриелем Стоксом [1]. Решение задач пограничного слоя сводится в общей постановке к интегрированию сложных дифференциальных уравнений. Данные уравнения представляют собой нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных и их интегрирование при заданных граничных условиях сопряженно с большими математическими трудностями не только в случае вязкого сжимаемого газа, но и в случае несжимаемой жидкости. Поэтому при решении задач пограничного слоя приходится прибегать к вычислению уравнений Навье-Стокса. Уравнения французского физика Анри Навье и британского математика Джорджа Стокса являются и в наши дни одними из важнейших в гидродинамике и применяются в математическом моделировании многих природных явлений и технических задач и в настоящее время.

Теория движения вязкой жидкости разрабатывалась главным образом в направлении изучения движения жидкости в тонком пограничном слое, образующемся вблизи поверхности тела при практически интересных скоростях и размерах тел.

По-видимому, шотландский инженер и физик Рэнкин Уильям Джон Макуори первый ввел понятие о пограничном слое. В своей записке, относящейся к 1864 г., он в следующих словах выражает происхождение сопротивления трения: «Это сопротивление представляет сочетание прямых и косвенных действий прилипания частиц воды к поверхности корабля, которую они обтекают; прилипание вместе с взаимной вязкостью частиц и производит бесчисленное множество мелких водоворотов в слое воды, непосредственно прилегающем к бортам судна» [2].

Возникновение термина «пограничный слой» уходит далеко вглубь истории образования отдельной науки гидродинамики. Традиционная гидродинамика сегодня находится на стадии насыщения, когда каждый шаг требует всевозрастающих усилий и затрат. Таким образом, без выдающихся открытий не возможно было бы создать отдельные науки по исследованию сопротивления трению.

В XVIII в. теоретические исследования движения жидкости проводились в большей части случаев на основе предположения, что жидкость является идеальной, т.е. не обладающей трением, и одновременно является несжимаемой. Только в XIX в. влияние трения и сжимаемости стали учитывать в большей мере. При движении жидкости без трения между отдельными ее соприкасающимися слоями возникают только нормальные силы (давления), касательные же силы (напряжения сдвига) отсутствуют.

Это означает, что идеальная жидкость не оказывает изменению формы никакого внутреннего сопротивления. Теория движения идеальной жидкости математически очень широко разработана и во многих случаях дает вполне удовлетворительную картину действительных движений. Такими случаями являются, например, волновое движение или движение с образованием струй. В то же время теория идеальной жидкости совершенно бессильна для решения проблемы вычисления сопротивления тела, движущегося в жидкости. В этом случае она приводит к результату, что тело, равномерно движущееся в неограниченно распространенной жидкости, не испытывает никакого сопротивления (это парадокс Жана Лерона Даламбера).

Важно отметить, что в формулировке парадокса говорится только об отсутствии составляющей силы, действующей на тело, которая параллельна потоку текучей среды на бесконечности (об отсутствии силы трения). Необходимо отметить то, что момент сил, действующих на тело со стороны потока, может быть отличен от нуля. Так, при безотрывном обтекании наклоненной к потоку пластинки или профиля тела даже при нулевой циркуляции скорости возникает момент сил, стремящийся повернуть пластинку или исследуемое тело поперек потока текучей среды.

При наличии объемных сил (например, силы тяжести) со стороны жидкости на тело может действовать сила Архимеда, однако ее нельзя считать составляющей силы сопротивления, ибо она не обращается в нуль в покоящейся жидкости.

В случае нарушения парадокса Жана Лерона Даламбера при обтекании тела реальным потоком жидкости всегда имеется ненулевая сила сопротивления, наличие которой объясняется нарушением тех или иных условий, входящих в формулировку парадокса Жана Лерона Даламбера [3]. В частности:

- если жидкость или текучая среда не является идеальной (обладает конечной вязкостью), может возникнуть сила сопротивления, прямо или косвенно связанная с действием вязкого трения;

- если движение тела в жидкости не является стационарным, то даже в модели невязкой жидкости возникает сила сопротивления инерционной природы, связанная с тем, что при движении тела с переменной скоростью кинетическая энергия окружающей жидкости меняется со временем;

- если течение не является непрерывным (например, в потоке имеются поверхности разрыва), то параметры потока далеко впереди и позади тела могут не совпадать, что приводит к ненулевому сопротивлению. Примером служит тело в плоском потоке, порождающее за собой цепочку сосредоточенных вихрей (модель вихревой дорожки Кармана);

- если жидкость не занимает все пространство вокруг тела, то парадокс Даламбера также может нарушаться. Типичными примерами являются: образование за телом уходящей в бесконечность полости, заполненной покоящейся жидкостью (схема струйных течений Кирхгофа – Гельмгольца, моделирующая кавитационную полость); образование волн на поверхности жидкости (гравитационные волны на воде), на создание которых требуются затраты энергии, что приводит к возникновению волнового сопротивления; аналогичную природу имеет сопротивление за счет возникновения внутренних волн при движении тела в стратифицированной жидкости (например, на границе двух слоев жидкости с разной плотностью);

- если параметры потока далеко впереди и позади тела не выравниваются, то сила сопротивления также может быть отлична от нуля. В частности, так обстоит дело при подводе тепловой энергии к потоку или при образовании за телом области («следа»), параметры в которой отличны от параметров в основном потоке на бесконечности.

В результате, если создать условия, в которых обтекание тела будет достаточно близко к условиям в формулировке парадокса Жана Лерона Даламбера, например, придать телу обте-

каемую (каплеобразную или эллипсоидальную) форму, то возможно добиться существенно – в десятки и сотни раз – снижения сопротивления по сравнению с плохообтекаемыми телами с тем же миделевым сечением.

В результате полученных как теоретических, так и экспериментальных изысканий согласно наблюдениям Менделеева и Даламбера возникли предпосылки в создании теории сопротивления тела в движущейся жидкости или текучей среде.

В продолжение исторического аспекта важно упомянуть то, что понятие ламинарное течение не применялось раньше, до 1917 г. в российской науке пользовались термином «струйчатое течение». Турбулентность экспериментально открыта английским физиком, механиком и инженером Осборном Рейнольдсом в 1883 г. при изучении течения воды в трубах.

Рейнольдс экспериментально установил (1876-1883 гг.) критерий перехода ламинарного режима движения жидкости, текущей в цилиндрической трубе, в турбулентный режим; данный критерий заключается в том, что введенная английским механиком безразмерная величина (названная в его честь числом Рейнольдса) превышает некоторое критическое значение. Применительно к турбулентному движению вывел дифференциальные уравнения осредненного движения жидкости, содержащие нерегулярные пульсационные добавки [4]. Ученый Осборн Рейнольдс сформулировал критерий подобия двух различных течений вязкой жидкости [5]. Критерий, или число Рейнольдса, приемлем при исследовании движения несжимаемой жидкости газа на малых и больших скоростях, в том числе и для установившегося движения.

Начало теории пограничного слоя положил в 1904 г. один из основателей прикладной гидромеханики, немецкий ученый, профессор Людвиг Прандтль.

Он определил пограничный слой как слой трения, или тонкий слой, на поверхности обтекаемого тела или летательного аппарата, в котором проявляется эффект вязкости. Пограничный слой характеризуется сильным градиентом скорости потока: скорость меняется от нулевой, на поверхности обтекаемого тела, до скорости потока вне пограничного слоя.

Понятие пограничного слоя было им впервые введено в статье «О движении жидкости при очень малом трении», представленной 12 августа 1904 г. на третьем Международном конгрессе математиков в Гейдельберге (Германия).

Возникновение пограничного слоя связано с явлением в жидкости количества движения, теплоты и массы, характеризуемых коэффициентом вязкости, теплопроводности и диффузии. Гидромеханик Прандтль, исследуя пограничный слой, выявляет зависимость коэффициента трения воды от числа Рейнольдса.

Немецкий ученый объясняет сопротивление формы (вихревое сопротивление) при обтекании тела жидкостью отрывом ее пограничного слоя (рис. 1). Отрыв пограничного слоя всегда связан с сильным образованием вихрей и с большой потерей энергии на кормовой части обтекаемого тела. Эти явления наблюдаются в первую очередь у плохо обтекаемых тел, например, у круглого цилиндра и шара (рис. 2).

В результате за кормовой частью таких тел образуется область сильно замедленного течения (так называемая застойная область), в которой распределение давления сильно отличается от распределения давления, соответствующего течению без трения. Именно это измененное, по сравнению со случаем идеальной жидкости, распределение давления, связанное с отрывом пограничного слоя, и является причиной большого сопротивления плохо обтекаемых тел.

Впоследствии Прандтлем будет предложен очень эффективный способ ламинаризации гидродинамического пограничного слоя с помощью его отсоса, который, в частности, эффективно реализован на «турбопарусе», установленном сначала на экспериментальном парусном катамаране «Moulin à Vent» (от французского «ветряная мельница») в 1983 г., а затем и судне Жака Кусто «Алсион» в 1985 г. (рис. 3) [6].

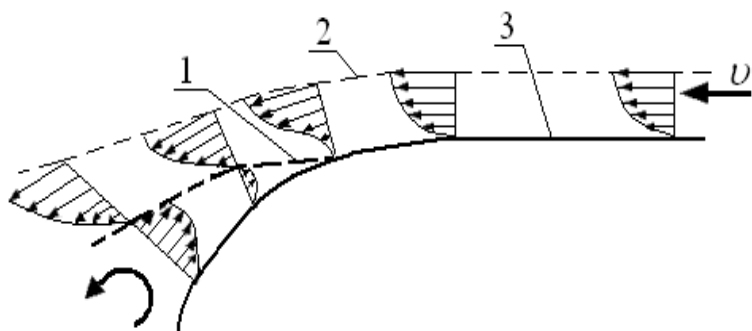


Рис. 1. Пограничный слой и его отрыв в кормовой оконечности судна:

1 – граница отрыва пограничного слоя;  
2 – граница пограничного слоя;  
3 – ватерлиния корпуса судна  
( $v$  – скорость набегающего потока)

Fig. 1. Boundary layer and its separation in the aft end of the vessel: 1 – boundary of the boundary layer separation;

2 – boundary of the boundary layer;  
3 – waterline hull ( $v$  – free-stream velocity)

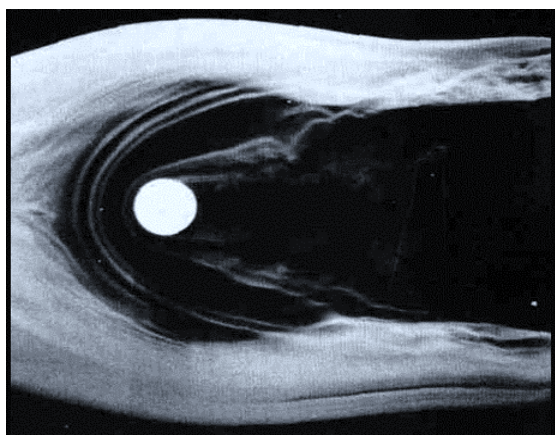


Рис. 2. Дымовая визуализация пограничного слоя перед цилиндром

Fig. 2. Smoke visualization of the boundary layer before the cylinder



Рис. 3. Французское научно-исследовательское судно «Алсион» ( $L = 27,4$  м;  $B = 9$  м;  $D = 76$  т;  $N = 230$  кВт), построенное по заказу Ж. Кусто для замены знаменитого «Калипсо», было оборудовано двумя турбопарусами, использующими для создания тяги отсос пограничного слоя

Fig. 3. French research vessel «Alsion» ( $L = 27,4$  м;  $B = 9$  м;  $D = 76$  т;  $N = 230$  кВт), built for the J. Cousteau to replace the famous «Calypso», was equipped with two turboparusami used to create traction boundary layer suction

Л. Прандтль указал направление гидродинамики, сделавшее доступным теоретическому исследованию течения жидкостей с очень малой вязкостью, из которых наиболее важными в техническом отношении являются вода и воздух. Для достижения этого достаточно было учитывать действие вязкости только там, где оно проявляется существенным образом, а именно в тонком «пограничном слое» вблизи стенки, обтекаемой жидкостью. Этот путь позволил дать теоретическое объяснение многим явлениям, ранее остававшимся совершенно непонятными.

Прежде всего, идея Л. Прандтля сделала доступными для теоретического исследования вопросы, связанные с сопротивлением, возникающим при обтекании жидкостью твердых тел. Бурно развивавшаяся судостроительная техника очень быстро извлекла из теоретических выводов многое, полезное для себя, и, в свою очередь, поставила перед новой теорией многочисленные проблемы. В настоящее время для инженера, работающего в области судостроения, понятие пограничного слоя стало настолько привычным, что без него он не может больше обойтись.

Дальнейшее развитие теория пограничного слоя получает в трудах (период 1923-1933 гг.) американского ученого Теодора фон Кармана – выдающегося механика, внесшего большой вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований в области гидродинамики. Наиболее популярные работы Кармана заключаются в исследовании автоколебательных движений в воде вертикальных круговых цилиндров. Позднее своеобразный след сорванного пограничного слоя за цилиндром получит название «вихревая дорожка Кармана». Как писал Т. фон Карман, «... Расположение вихрей, изображенных на рисунке (рис. 4), связано с моим именем; обычно его называют вихревая дорожка Кармана или вихревой след Кармана. Но я не претендую на открытие этих вихрей; они были известны задолго до моего рождения. ... Переменные вихри позади препятствий наблюдал и фотографировал английский ученый Генри Реджинальд Арнулфт Маллок, а затем профессор из Франции Анри Бенар. Бенар раньше меня проделал много работы, но он в основном наблюдал вихри в любой вязкой жидкости или коллоидных растворах и рассматривал их с точки зрения экспериментальной физики, а не аэродинамики. Тем не менее он отчасти ревновал, что вихревую систему связали с моим именем и несколько раз, например на Международном конгрессе по прикладной механике в Цюрихе (1926 год) и в Стокгольме (1930 год), настаивал на своем приоритете за первым наблюдением этого явления. В ответ я однажды сказал: «Согласен, то, что в Берлине и Лондоне называется «Карман – стрит», в Париже следует назвать «Авеню Авен Бернар». После этой остроты мы заключили мир и стали хорошими друзьями»<sup>1</sup> [7].

Несомненно, фундаментальный вклад в теорию исследования пограничного слоя внес Теодор фон Карман. Он первый доказал, что симметричное расположение вихрей, которое является очевидной заменой вихревого слоя, неустойчиво. Выдающийся механик Карман установил, что устойчивым может быть только асимметричное расположение переменных вихрей, и только для соотношения между рядами и расстояния между двумя последовательными вихрями каждого ряда (рис. 5).

Таким образом, теория пограничного слоя позволяет объяснить не только сопротивление трения, но – путем исследования отрыва – и сопротивление давления. Опасность отрыва пограничного слоя всегда существует в областях возрастания давления, и притом тем большая, чем резче происходит возрастание давления.

---

<sup>1</sup> Игра слов: вихревая дорожка по-английски называется «vortex street», как и «улица». Соответственно по-французски слово улица звучит как «avenue» – «авеню».



Рис. 4. Двойной ряд переменных вихрей позади кругового цилиндра  
 Fig. 4. Double row variables vortices behind a circular cylinder

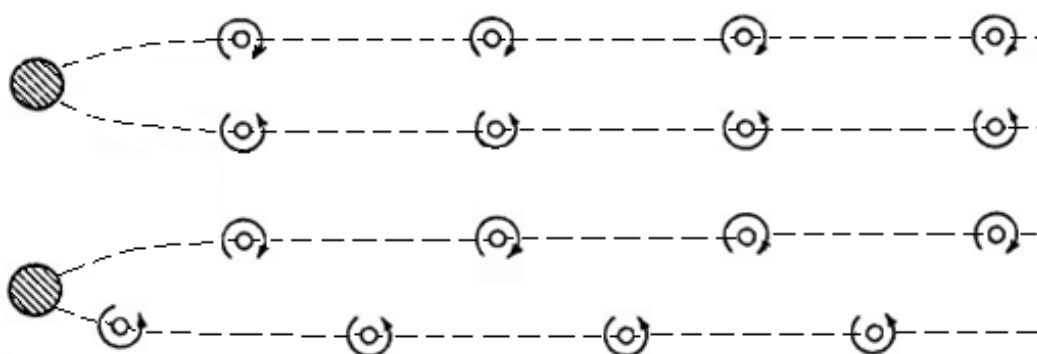


Рис. 5. Двойные ряды переменных вихрей: симметричное (вверху) и асимметричное (внизу) расположения  
 Fig. 5. Double rows of variables vortices symmetrical (top) and asymmetric (bottom) location

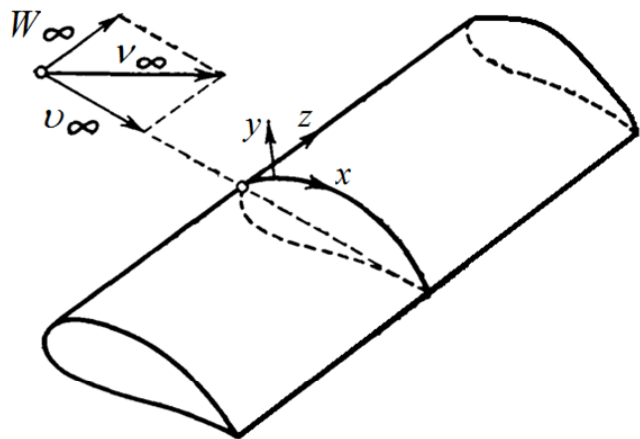
С этого момента проблема сопротивления в принципиальном отношении была решена, и началось бурное развитие теории пограничного слоя (невязкой и вязкой текучей среды): углублялись знание и понимание исследуемых явлений, разрабатывались эффективные методы анализа и успешно решались прикладные задачи, а теоретическая гидродинамика оказывала все большее влияние на формирование облика обтекаемых тел.

С 1934 по 1941 гг. советские ученые-гидродинамики Константин Федяевский и Лев Лойцянский создают современную теорию пограничного слоя, причем последний детально исследует физическую природу вихревого сопротивления. К.К. Федяевский и Л.Г. Лойцянский в своих трудах описывают результаты экспериментального анализа ламинарного и турбулентного пограничных слоев. Советские ученые разработали теорию плоского (составляющие вектора скорости зависят только от двух координат, в направлении третьей координатной оси никакой скорости нет) и пространственного пограничного слоя (составляющие скорости имеются во всех трех координатных направлениях и при этом зависят от всех трех координат, рис. 6). До середины XX в. способы расчета общего случая пространственного пограничного слоя вызывали у ученых математические трудности.

До недавнего времени при расчете пограничных слоев ограничивались исключительно случаями плоского и осесимметричного течений. В случае анализа течения вблизи диска, вращающегося в покоящейся жидкости, теория плоского пограничного слоя неприемлема, так как она не раскрывает причину возникновения вторичных течений. При течении в межлопаточном канале турбинной или насосной решетки и при обтекании поворотной лопатки в пограничных слоях на боковых стенках лопаток возникают вторичные течения. Причиной их

возникновения является кривизна линий тока внешнего сечения. В межлопаточном канале вторичное течение направлено от напорной поверхности одной лопатки к подсасывающей поверхности соседней лопатки. К этому вторичному течению, вызванному обтеканием боковой стенки, присоединяется еще влияние пограничного слоя на самих лопатках, вследствие чего течение через межлопаточный канал представляет собой весьма сложную трехмерную задачу [8]. Данный пример свидетельствует о необходимости экспериментальной теории пространственного пограничного слоя.

Рис. 6. Система координат для трехмерного пограничного слоя  
Fig. 6. The coordinate system for three-dimensional boundary layer



В конце XX в. ученые в области гидродинамики заинтересовались явлением теплопередачи между твердым телом и жидкой или газообразной текучей средой. Явление теплопередачи между твердым телом и жидкой или газообразной текучей средой представляет собой проблему механики потоков. В рассматриваемой задаче на механическое течение налагается тепловой поток, и в общем случае два потока влияют один на другой. Для того чтобы найти распределение температуры, необходимо знать гидродинамические уравнения движения с уравнениями теплопроводности. Из чисто наглядных соображений понятно, что распределение температуры около нагретого тела, обтекаемого жидкостью, часто должно обладать особенностями, характерными для пограничного слоя.

В итоге в конце 1960 г. Георгием Никитичем Кружилиным было введено понятие «тепловой пограничный слой», аналогичное понятию «гидродинамический пограничный слой». Что положило начало детальному исследованию ламинарного и турбулентного пограничных слоев. Труды Г.Н. Кружилина посвящены экспериментальному установлению распределения коэффициента теплоотдачи по поверхности тела, расчетам теплового пограничного слоя, теории теплоотдачи при конденсации пара и кипении жидкости и исследованиям уноса влаги паром в котлах.

Исследования перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный впервые были выполнены И. М. Бюргерсом и М. Ханзенем. Эти исследования показали, что для такого перехода наиболее характерным признаком является внезапное резкое увеличение толщины пограничного слоя и касательные напряжения на стенке обтекаемого текучей средой тела вращения.

Проблемой сопротивления трения в жидкостях и газах занимались многие ученые еще до появления теории пограничного слоя. Среди них Ш.О. Кулон, Ж.Л.М. Пуазейль, Д.И. Менделеев и др. Теоретические разработки теории пограничного слоя были начаты Прандтлем и развиты А. Бенаром, Т. фон Карманом и др. Развитию теории пограничного слоя посвящено большое количество работ советских исследователей: К.К. Федяевского,



Л.Г. Лойцянского, Г.Н. Кружилина и др. Отечественные ученые провели ряд важных теоретических и экспериментальных исследований пограничного слоя, разработали рациональные формы тел, имеющих малое сопротивление трения и обтекаемых без срыва потока до больших углов атаки.

### **Результаты и их обсуждение**

Формирование пограничного слоя на поверхности – это явление, с одной стороны, доставляющее немало хлопот и проблем в гидродинамике, а с другой стороны – лежащее в основе формирования физических и химических свойств воды в живом организме.

В процессе работы над исследованием теории пограничного слоя в приложении гидравлики, целью которого является изучение актуальности таких исследований, была выявлена разносторонняя направленность теории пограничного слоя. Данные результаты определяются прогрессом научных направлений и совершенствованием измерительной техники.

Сравнительный анализ экспериментов, сложившихся исторически, привел к сравнительной хронологии событий, выдержанных аспектами развития направленности особенностей поведения жидкостного слоя по отношению к обтекаемым поверхностям.

Обсуждение данных аспектов приводится в результате исследования поведения вязкого пограничного слоя и в настоящее время. Примером таких исследований и результатом обсуждений является одно из научно-исследовательских направлений, в частности «Изучение пограничного слоя ламинарного потока жидкости в гладкой трубе методом фотокоррекцияционной спектроскопии ламинарного пограничного слоя» [9]. При данном научном направлении не исключается и направленность научного познания в сфере турбулентности пограничного слоя.

На данном этапе результативными являются работы, изложенные в патентных изысканиях.

Содержание статьи охватывает только основополагающие аспекты теории пограничного слоя на рубеже XIX-XX вв. Обсуждение данного научного аспекта продолжает свое развитие в таких экспериментальных результатах, как способы управления пограничным слоем в условиях как ламинарного течения, так и турбулентного течения. Данный результат позволяет в дальнейшем продолжить научный анализ результатов и их обсуждений на хронологическом этапе в биотехнологических исследованиях.

### **Выводы**

Исследования теории пограничного слоя в настоящее время являются актуальными, так как большинство ученых все чаще и чаще обращают свое внимание на поиск новых методов и способов управления пограничным слоем. Основываясь на исторических фактах, ученые-экспериментаторы ищут пути совершенствования управления жидкой и газообразной текучими средами.

Особое внимание привлекает гидродинамический пограничный слой, так как отрыв пограничного слоя влечет за собой образование турбулентности при изменении скорости симметричного или асимметричного тела вращения с удобовыгодным миделевым сечением.

Теория пограничного слоя широко используется в авиастроении и судостроении. Подчас именно теория сопротивления трению при движении летательного аппарата или судна характеризует внешний облик данных объектов, что существенно сказывается на стадии проектирования летательного аппарата и судна в целом. Понять прикладной характер теории пограничного слоя невозможно без анализа исторического развития теории сопротивления трению.

Насущной задачей исследования теории пограничного слоя является подготовка и настройка специализированных методов и программ, необходимых для достоверной оценки нетрадиционных методов управления пограничным слоем, которые должны появиться в недалеком будущем.

### Список литературы

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газов. – М.: Дрофа, 2008. – 928 с.
2. Тюлина И.А. История и методология механики. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. – 282 с.
3. Grimberg G., Pauls W., Frisch U. Genesis of d'Alembert's paradox and analytical elaboration of the drag problem // *Physica D*. – 2008. – Т. 237. – Р. 1878-1886.
4. Боголюбов А.Н. Математики. Механики. Биографический справочник. – Киев: Наукова думка, 1983. – 639 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – 3-е изд. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
6. Мытник Н.А. Краткая история корабельных наук (хронология событий с комментариями). – Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2004. – 12 с.
7. Карман Т. Аэродинамика. Избранные темы в их историческом развитии. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 208 с.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / пер. с нем. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
9. Пат. 2117828 Российская Федерация, F15D1/02, F17D1/18. Устройство для снижения трения в трубопроводах и шлангах; заявитель и патентообладатель А.А. Титов; Н.И. Жданов; Г.С. Ляпин. – № 96111737/06; заявл. 10.06.1996; опубл. 20.08.1998, Бюл. № 13 (II ч.).

**Сведения об авторе:** Плоткина Виктория Александровна, старший преподаватель,  
e-mail: vika\_plotkina@mail.ru.