

УДК 532.526 + 656.61

**В.А. Плоткина<sup>1</sup>, П.А. Стародубцев<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр Военно-Морского флота «Военно-морская академия  
имени адмирала флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова» (филиал, г. Владивосток),  
690006, г. Владивосток, Днепровский переулок, 6

## МЕТОДЫ И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ В МОРСКОЙ ТЕХНИКЕ

*Рассматривается концепция способов и методов управления пограничным слоем в приложении механики жидкости морской техники. Раскрывается актуальность исследовательских процессов в области теории пограничного слоя.*

**Ключевые слова:** пограничный слой, морская техника, невязкая и вязкая жидкости.

**V.A. Plotkina, P.A. Starodubtcev**

## METHODS AND MEANS OF BOUNDARY LAYER MARINE APPLICATIONS

*This article examines the concept of means and methods of controlling the boundary layer in the application of fluid mechanics marine equipment. Revealed the relevance of research in the field of boundary layer theory.*

**Key words:** boundary layer, marine engineering, in viscid and viscous fluids.

Управление пограничным слоем характеризует исследовательский аспект выявления гидродинамических свойств подвижных объектов. Одной из основных задач при увеличении скорости движения судна остается влияние сил трения на ход движения при одновременном увеличении сопротивления движению, которые возникают в результате вязкости жидкости.

Как известно, свойство жидкости оказывать сопротивление перемещению одной части относительно другой проявляется способностью быть вязкой. Вязкость отражает свойство жидкости сопротивляться относительному перемещению или сдвигу соседних частиц.

Для иллюстрации эффекта вязкости рассматривается обтекание плоской твердой поверхности потоком невязкой и вязкой жидкости в том числе. В невязкой (идеальной) жидкости (рис. 1, а) скорость потока по мере приближения к стенке не изменяется, жидкость свободно проскальзывает вдоль нее. Во втором случае (рис. 1, б) ближайšie к твердой поверхности частицы жидкости в результате трения «прилипают» к ней, так что скорость потока на ней становится равной нулю. По мере удаления от стенки частицы жидкости сдвигаются друг относительно друга, так как силы взаимного притяжения между молекулами самой жидкости меньше сил притяжения между молекулами и твердой стенкой. Однако эти силы будут препятствовать сдвигу, благодаря чему между слоями возникают касательные напряжения. По мере удаления от стенки скорости жидких частиц постепенно нарастают до заданной скорости набегающего потока (рис. 1, б). При умеренных давлениях вязкость жидкости, в частности воды, с повышением температуры падает.

Основной закон вязкого течения (жидкости) был установлен английским физиком, астрономом и математиком Исааком Ньютоном в 1687 г. для тонкого слоя жидкости, зажатою между пластинами, движущимися параллельно с разными скоростями  $v_1$  и  $v_2$ . Векторы скорости по всему слою жидкости направлены параллельно, модуль скорости линейно зависит от поперечной координаты (рис. 2). Закон утверждает, что на пластины будет действовать сила, величина которой определяется формулой

$$\tau = F_{\tau} = \mu \frac{v_1 - v_2}{\Delta Z} \cdot S,$$

где  $\tau$  – касательные напряжения;  $F_{\tau}$  – касательная к поверхности пластин сила, вектор которой совпадает по направлению с векторами  $v_1$  и  $v_2$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $v_1$  – скорость движения тонкого слоя жидкости относительно движения второго (последующего) слоя;  $v_2$  – скорость движения второго слоя жидкости (рис. 2);  $S$  – площадь слоя, по которому происходит сдвиг;  $\Delta Z$  – поперечная толщина исследуемого слоя.

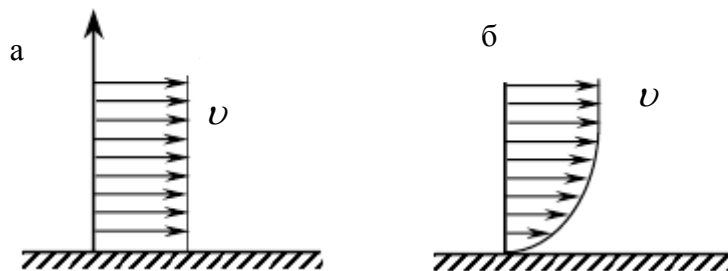


Рис. 1. Эпюры скоростей обтекания стенки жидкостью:  
а – невязкой жидкостью; б – вязкой жидкостью

Fig. 1. Flow velocity profile wall liquid: a – a non-viscous liquid, б – a viscous liquid

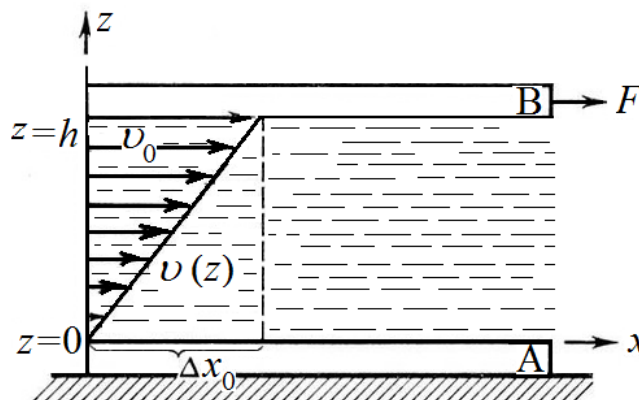


Рис. 2. Схема однородного вязкого течения слоя жидкости высотой  $h$ , заключенного между двумя твердыми пластинками, из которых нижняя А неподвижна, а верхняя В под действием тангенциальной силы  $F$  движется с постоянной скоростью  $v_0$ ;

$v(z)$  – зависимость скорости слоя от расстояния  $z$  до неподвижной пластинки

Fig. 2. Schematic of a homogeneous viscous flow of the liquid layer height  $h$ , enclosed between two solid plates, of which the lower A is fixed, and the top B in under the action of the tangential force  $F$  moves with constant velocity  $v_0$ ;  $v(z)$  – dependence of the velocity layer the distance  $z$  from the fixed plate

Коэффициент пропорциональности  $\mu$  называется коэффициентом динамической вязкости или просто вязкостью. Он характеризует сопротивление жидкости смещению ее слоев относительно кормовой части судна. Кинематической вязкостью  $\nu$  называется отношение динамической вязкости к плотности жидкости. В гидромеханике жидкости широко используется понятие кинематической вязкости.

У реальных жидкостей в основе вязкого трения лежит процесс обмена импульсами молекул, поэтому кинематическую вязкость часто называют в теории пограничного слоя коэффициентом кинематической молекулярной вязкости [1].

В развитие методов и способов управления пограничным слоем в приложении гидродинамики жидкости, подчиняющиеся основному закону вязкости жидкости или закону трения Ньютона, называются ньютоновскими жидкостями. Существуют и неньютоновские жидкости, у которых вязкие свойства более сложны (например: масла, пасты, смолы и др.). Ньютоновские и неньютоновские жидкости в последнее время вызывают активный интерес не только ученых, но и простых людей. Это связано с тем, что неньютоновская жидкость легко изготавливается своими руками и подходит для домашних опытов.

Формирование методов и способов управления пограничным слоем на этапах развития механики жидкости позволяет ученым-мыслителям и изобретателям-экспериментаторам провести теоретические выводы и лабораторные исследования в приложении развития теории сопротивления движения судов. Сопротивление жидкости, в частности воды, движению судов характеризуется необходимостью введения в практическую гидравлику отдельной теории, изучающей движение жидкости. В результате исторически возникла необходимость в выявлении теории гидродинамики жидкости, которая берет свое начало в результате развития гидростатических основ гидравлики как целостной науки. В свою очередь основы, положенные в развитие гидродинамики, служат первоначальным этапом возникновения необходимости в выделении отдельного направления, такого как «теория пограничного слоя».

Важно отметить следующее: рассмотренные предпосылки являются основополагающими как в дальнейшем развитии гидродинамики, так и в необходимости выделения отдельного научного направления под названием «теория пограничного слоя».

В настоящее время ученые, изобретатели и соискатели стремятся совершенствовать методику и способы управления пограничным слоем вблизи кормовой оконечности судна. При этом немаловажную роль играет исторический аспект формирования обводов корпуса корабля. Внешние очертания корпуса корабля задаются теоретическим чертежом корабля при проектировании и зависят от назначения судна, его размеров, скорости, района плавания, автономности и других условий. В значительной степени методы и способы управления пограничным слоем в кормовой оконечности судна определяются сопротивлением пограничного слоя воды его движению, напрямую связанным со свойством жидкой (морской или речной) среды быть вязкой.

XXI в. дал толчок совершенствованию различных методик по управлению пограничным слоем. Самыми актуальными являются методики, разработанные в совокупности сопоставления гидродинамических и аэродинамических аспектов исследовательской деятельности изобретателей.

Таким образом, современные экспериментальные исследования разграничивают теорию пограничного слоя на ламинарную и турбулентную. Данные исследования теории ламинарного пограничного слоя развиваются и ставят перед собой задачу определять новую методику измерений при сравнении их с классической методикой, т.е. совершенствование методов измерений параметров пограничного слоя. При всем многообразии методов исследования пограничного слоя до сих пор остается актуальным поиск методов, конкретизирующих реалистичность их применения. Поэтому группа ученых Калининградского государственного технического университета: А.В. Гриценко, Н.А. Мыслицкая, А.М. Иванов, И.Г. Самусев – на основе данных экспериментальных измерений методом фотонной корреляционной спектроскопии получили оценочные значения коэффициентов диффузии в 2–3-миллиметровом участке вязкого пограничного слоя для ламинарного потока при малых значениях числа Рейнольдса  $Re$ .

Метод фотонной корреляционной спектроскопии хорошо зарекомендовал себя в исследованиях микроструктуры жидкости в силу следующих особенностей: высокая пространственная и временная разрешающая способность ( $\Delta r \sim 0,1$  мм;  $\Delta t \sim 10^{-9}$ – $10^3$  с), оптическое из-

лучение не возмущает исследуемую среду, отсутствие инерционности. Благодаря этим преимуществам метод получил широкое распространение в гидродинамических исследованиях, связанных с развитием морской техники.

Калининградские ученые для проведения исследований собрали экспериментальную установку (рис. 3). В процессе эксперимента исследовались процессы, протекающие в пристеночном слое ламинарного потока при малой скорости направленного переноса. В результате проведенных исследований ламинарного потока при малых значениях  $Re$  было получено подтверждение ранее полученных экспериментальных и теоретических результатов, т.е. отчетливое разделение потока на слои – вязкий подслой, буферная зона и ядро. Большая разрешающая способность и другие свойства фотонной корреляционной спектроскопии позволили провести исследования потока. В результате обнаружили хороший потенциал метода применительно к дальнейшим исследованиям пограничного слоя в развитии морской техники, процессов седиментации или осаждения (оседание частиц дисперсной фазы в жидкости или газе под действием гравитационного поля или центробежных сил) и деседиментации частиц, взвешенных в потоке жидкости [2]. Данный эксперимент раскрыл потенциал исследовательской базы ламинарного пограничного слоя применительно к нуждам морского рыболовства Российской Федерации.

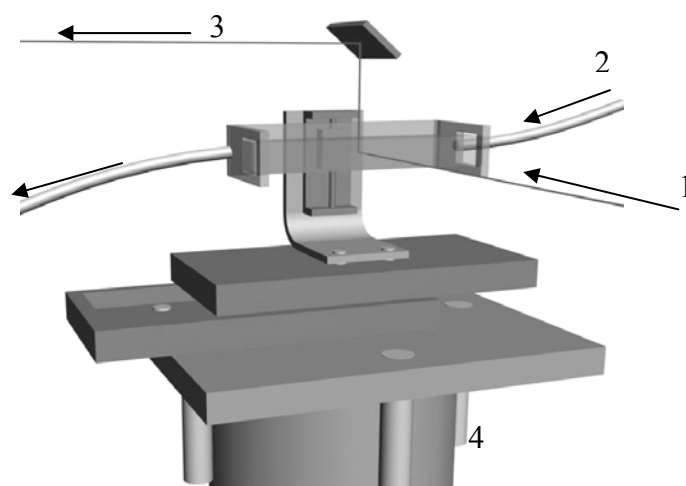


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – источник излучения: одномодовый He-Ne лазер (15 мВт; 632,8 нм); 2 – кювета размером (150/20/20 мм) с рассеивающими на входе и выходе сетками, через которые проходил поток дистиллированной воды; 3 – фотоэлектронное устройство «Photocor Instruments», работающее в режиме счета фотонов; 4 – коррелятор «Photocor-FC» 32-битный 282-канальный (разрешающая способность 25 нс), подключенный к компьютеру  
Fig. 3. Experimental setup: 1 – light source: a single-mode He-Ne laser (15 mW, 632.8 nm); 2 – cell size (150/20/20 mm) with scattering at the entrance and exit grids through which a stream of distilled water; 3 – photoelectron device «Photocor Instruments», working in photon counting mode; 4 – correlator «Photocor-FC» 32-bit 282-channel (25 ns resolution) connected to a computer

В морской отрасли результативными являются исследования турбулентных течений. Исследование турбулентных пограничных слоев без градиента давления позволяет определить предельную высоту элементов шероховатости, которая при обтекании корпуса корабля не вызывает увеличения сопротивления. Для кораблей допустимая высота шероховатости составляет несколько сотых миллиметра. Практически такая степень гладкости для судна неосуществима. Поэтому при проектировании кораблей необходимо считаться со значитель-

ным повышением сопротивления вследствие шероховатости, что влияет на маневренные качества кораблей. В морских силах для оценки ходовых качеств корабля целесообразно рассматривать трехмерные пограничные слои. Исследование пограничного слоя на телах вращения или турбулентного трехмерного пограничного слоя позволяет выявить влияние центробежных сил гребного винта на управляемость корабля.

Связь между распределением скоростей и распределением температуры раскрывает теория турбулентного пограничного слоя с учетом сжимаемости течения. Корпус кораблей представляет собой сложное инженерное сооружение, которое должно учитывать взаимосвязь всех факторов. На практике кормовая часть и обводы корпуса судна диктуются требованиями: минимальное сопротивление при движении и минимальный уровень создаваемого гидроакустического давления. Результативность данных требований на морских кораблях решается конструктивно. А именно, у морских кораблей передняя часть носа заострена (рис. 4). Именно возникающее внутренне трение в жидкости характеризует наличие данных конструктивных решений.



Рис. 4. Фотографии рыболовецких судов с заостренной кормовой частью  
Fig. 4. Photos of fishing vessels with a pointed aft

Турбулентность возникает самопроизвольно, когда соседние области морской среды следуют рядом или проникают один в другой, при наличии перепада давления или при наличии силы тяжести, или когда области среды обтекают непроницаемые поверхности. Она может возникать при наличии вынуждающей случайной силы. Обычно внешняя случайная сила и сила тяжести действуют одновременно. Например, при маневрировании рыболовного судна по акватории внутри морской воды возникают силы, способствующие перемешиванию частиц жидкости, вызывающие впоследствии турбулентность. Мгновенные параметры потока (скорость, температура, давление, концентрация примесей) при этом хаотично колеблются вокруг средних значений, что может привести к гидравлическим потерям, например, в трубопроводе корабельных систем, появлению неустановившегося движения жидкости и другим нежелательным явлениям. Теоретические основы турбулентности как основополагающей теории турбулентного пограничного слоя далеки до завершения, поэтому широкое распространение в морской области нашли полуэмпирические феноменологические модели.

Разработанные математические модели позволили сформировать математическую теорию пограничного слоя. При этом большой вклад на начальном этапе внес российский ученый, профессор, доктор физико-математических наук Сергей Александрович Ломов. Впервые теория пограничного слоя излагается с позиции особых точек теории дифференциаль-

ных уравнений. С.А. Ломов предложил новый подход к понятиям асимптотического ряда и псевдоаналитической функции. Пограничный слой представляется в виде псевдоаналитической функции. Новый подход на базе метода регуляризации сингулярных возмущений позволил сформулировать критерий правильности математического описания пограничного слоя и развить регулярную теорию для сингулярно возмущенных задач [3]. Ученик С.А. Ломова Г.С. Каниев в своей кандидатской диссертации продолжил развитие метода регуляризации на параболические задачи с дискретным и непрерывным спектром.

Большинство математических моделей, которые используются в инженерных расчетах, относятся к моделям турбулентной вязкости для исследования простых и сложных течений, окружающих корабль. А также к моделям турбулентной теплопроводности, моделям для учета шероховатости поверхности корабля, моделированию двухфазного турбулентного пограничного слоя, моделированию эффектов воздействия на пограничный слой слабых растворов полимерных и других добавок и многим другим моделям.

Математическим моделированием теории турбулентного пограничного слоя занимаются и зарубежные ученые. В частности, украинские ученые Национального авиационного университета В.Т. Мовчан и Е.А. Шквар сформулировали основные вехи исследований в области моделирования турбулентных течений вязкой жидкости. Учеными была предложена алгебраическая модель с поправочными коэффициентами на исследование отрывного течения пограничного слоя. Полученные результаты В.Т. Мовчан и Е.А. Шквар сравнили посредством сопоставления выполненных расчетов с экспериментальными данными турбулентных пограничных слоев. В итоге украинские исследователи представили результаты моделирования турбулентной вязкости, продемонстрировав преимущества разработанной математической модели [4]. Как следует из представленных результатов, расчеты в целом адекватно воспроизводят тенденции изменения рассчитываемых параметров турбулентного течения.

Гидравлические системы характеризуют совокупность элементов, воздействующих на текучую среду таким образом, что свойства каждого элемента оказывают влияние на состояние текучей среды во всех элементах системы. В гидросистемах уменьшение гидравлического напора характеризуется потерей энергии движущейся жидкости. Источником потерь во всех случаях является вязкость жидкости. В результате в данных системах возникает увеличение гидравлического сопротивления при перекачивании жидкости, например по трубопроводу. В итоге возникает необходимость в дополнительных устройствах, назначение которых снижать гидравлическое сопротивление. При наличии большого гидравлического сопротивления в трубопроводах корабельных систем может возникнуть обводнение, изнашивание и другие нежелательные явления, приводящие к нарушению работоспособности всех агрегатов корабля в целом. В рыболовецком деле данные явления недопустимы, поэтому ученые выполняют дополнительно поиск решения данной проблемы. Данными изысканиями озабочены многие ученые-экспериментаторы. В частности, в 2005 г. группа ученых Волгоградского государственного технического университета: А.Б. Голованчиков, Л.А. Ильина, А.В. Ильин, Н.А. Дулькина, А.Б. Дулкин, Д.С. Карашук – запатентовали устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе (рис. 5) может применяться в гидравлической, химической, нефтехимической, фармакологической и других отраслях промышленности, связанных с гидротранспортом вязких ньютоновских и неньютоновских жидкостей, суспензий и растворов [5]. Но особенно данное устройство актуально в трубопроводах гидросистем морских кораблей. При этом нельзя исключать и возможность применения других запатентованных устройств.

Предложенное устройство позволяет создать в трубопроводах корабельных систем устойчивый пристенный газовый слой из электролитических газов при небольших расходах электроэнергии и параметрах электричества. Таким образом, осуществляя управление пограничным слоем с помощью изменения токовых параметров, можно оптимизировать процесс

перекачивания жидкости с образованием устойчивого газового или жидкого слоя необходимой толщины в зависимости от удельного электрического сопротивления текучей среды, давления и расхода.

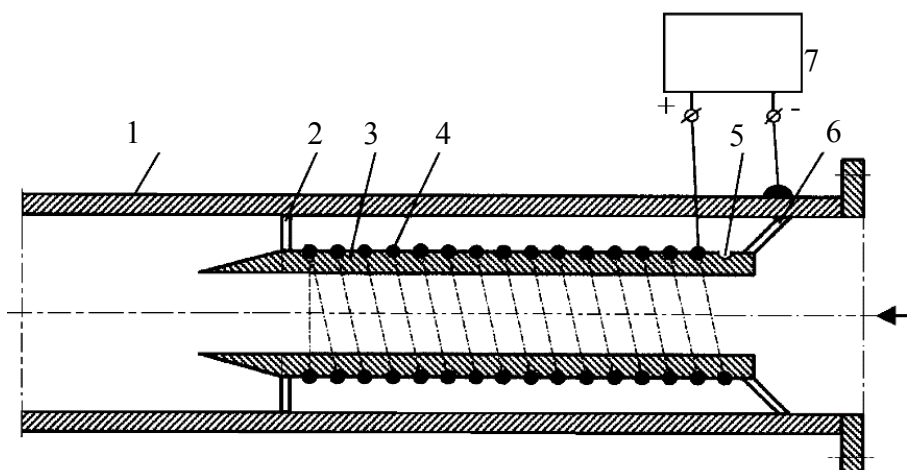


Рис. 5. Схема устройства для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе: 1 – трубопровод; 2 – опора; 3 – трубки; 4 – проволока; 5 – спиральные канавки; 6 – опора; 7 – источник тока  
 Fig. 5. Diagram of the device to reduce the hydraulic losses in the pipeline: 1 – line; 2 – suspension; 3 – tube; 4 – wire; 5 – spiral groove; 6 – bearing; 7 – current source

С характером распределения давления в пограничном слое связано явление отрыва пограничного слоя от стенки трубопровода. При утолщении пограничного слоя вниз по течению в нем возникает возвратное течение. Это влечет за собой вынос гидравлической жидкости, заторможенной в пограничном слое, во внешнее течение, вследствие чего последний оттесняется от тела – эффект отрыва пограничного слоя (рис. 6). На диффузорном участке давление увеличивается, а скорость уменьшается. Так как у поверхности стенки трубопровода частицы газа обладают малой кинетической энергией, то в некоторой точке частицы не могут преодолеть давление и останавливаются. Отрыв потока возникает также при течении жидкости в канале, резко расширяющемся в направлении течения. При расширении канала трубопровода происходит возрастание давления в направлении течения, что приводит к отрыву потока с образованием вихрей. Но если на стенках производится отсасывание пограничного слоя, то отрыв не возникает.

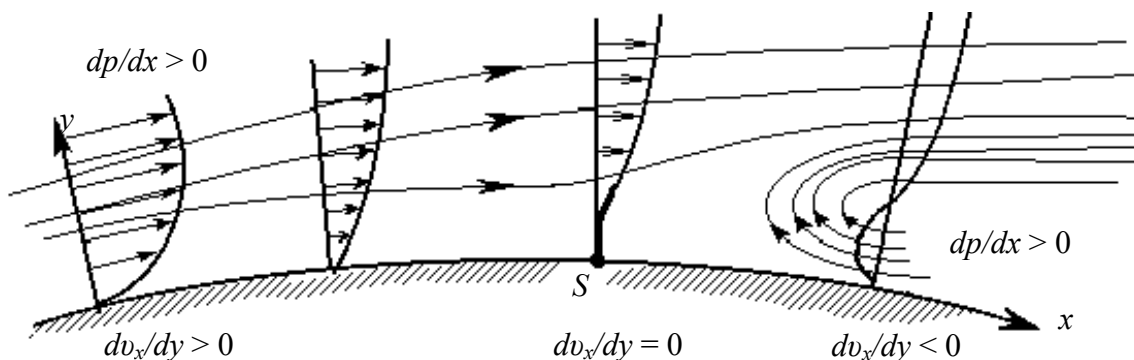


Рис. 6. Отрыв пограничного слоя (точка S – точка отрыва)  
 Fig. 6. Separation of the boundary layer (point S – the point of separation)

С проблемой отрыва пограничного слоя от стенки обтекающего тела, например, рыболовецкого корабля, столкнулись еще в древности, но успешных решений в данной области достигнуто было мало. Поэтому данным направлением успешно занялись исследователи Казанского федерального университета. В частности Рамиль Аделевич Валитов занялся вплотную проблемой отрыва пограничного слоя и высказал предположение о необходимости активного управления потоком в целях предотвращения отрыва и уменьшения сопротивления движению текучих сред [6]. Кроме этого, его сподвижники Д.Ф. Абзалилов и Н.Б. Ильинский занялись поиском оптимальных решений для устранения отрыва пограничного слоя. Выполнив ряд расчетов, ученые-исследователи на примере движущейся стенки поставили и решили задачу нахождения оптимальных параметров данной стенки, при которых достигается безотрывное течение и минимальная величина результирующего коэффициента сопротивления. При этом параметрами поставленной задачи являлись положение движущейся стенки, продольный размер стенки и скорость движения [7].

Данные выводы позволили аргументировать необходимость изучения эффекта отрыва пограничного слоя, например, от корпуса рыболовного корабля. Результаты многолетних исследований показали, что величина сопротивления трения зависит от скорости движения корабля, от размеров и степени шероховатости подводной части корабля, а также от физических свойств жидкости – плотности и вязкости морской воды. На сопротивление трения большое влияние оказывает режим движения жидкости внутри пограничного слоя вдоль поверхности корпуса корабля.

В результате в XXI в. проводятся численные и экспериментальные исследования в области изучения свойств температурного и диффузионного пограничных слоев. Данные исследования затрагивают больше аэродинамическую область науки, где зачастую рассматривается влияние термоэффекта на структуру пограничного слоя вблизи летательных аппаратов. В гидродинамике эти исследования затруднены из-за отсутствия больших опытовых бассейнов, моделирующих структуру жидкого теплового и диффузионного пограничных слоев. В то время как данная проблема в аэродинамике решается с помощью аэродинамических труб. Данные аспекты ни как не являются отрицательной стороной исследований пограничного слоя в гидродинамике. Это утверждение только раскрывает перспективное направление в развитии теории пограничного слоя на рубеже XXI в., особенно в морских нуждах страны. Особый интерес вызывают исследования истечения струи газа через слой жидкости (рис. 7). Моделирование многофазных (гетерогенных) течений является одним из современных направлений, которому в последнее время уделяется большое внимание в военном деле. Этот подход позволяет изучать на современном уровне двухфазные течения в различных технологических гидравлических устройствах, поскольку методики, основанные на теории однофазных жидкостей, не всегда дают необходимые прогнозные оценки параметров потоков.

Сочетание гидродинамических и аэродинамических исследовательских направлений позволяет совершенствовать способы и методы управления пограничным слоем. Методы управления пограничным слоем для уменьшения или увеличения сопротивления тел и тепло-, массообмена между телами и потоками указывает теория пограничного слоя. На практике применяются два способа управления пограничным слоем. Первый: искусственная ламинаризация пограничного слоя заключается в увеличении точки перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный для уменьшения трения и тепло-, массообмена между поверхностью тела и потоком жидкости, которая заключается в уменьшении толщины пограничного слоя, интенсивности турбулентности набегающего потока, градиента давления и высоты гребешков шероховатости. Эффективными методами уменьшения толщины ламинарного пограничного слоя является охлаждение обтекаемой стенки, удаление с поверхности тела наиболее заторможенных слоев отсосом или сдувом пограничного слоя перед ожидаемой точкой перехода, а также



применение ламинаризованных устройств. Второй способ приемлем для увеличения трения, теплообмена и диффузии. При этом следует турбулизовать пограничный слой.

На основании всех данных, приведенных выше, можно видеть, что гидравлика занимает одну из ведущих позиций в современной морской технике, без которой невозможно было бы обойтись в современном мире. Без гидравлических компонентов и систем невозможно было бы судостроение и многое другое.

Анализ полученных результатов в приложении развития теории по исследованию движения тела в жидкости показал, что высокая эффективность изучения поведения тела в движении относительно текучей среды возможна только в целенаправленном исследовании теории пограничного слоя. Целью данного анализа является изучение основных вопросов, связанных в концептуальном приложении с исследованием задач взаимодействия структуры течения в пограничном слое с реальными движущимися объектами в жидкой или газообразной среде.

Выявленные предпосылки влекут за собой направленный интерес ученых и экспериментаторов в обнаружении новых методов и способов управления пограничным слоем. В итоге были выделены такие способы управления пограничным слоем, как отсос, вдув, математическое моделирование и многие другие. При этом особый интерес представлен работами по исследованию гидродинамических свойств морских подвижных объектов с применением систем автоматизированного проектирования судна, которые осуществляются с помощью гидродинамических расчетов, основанных на основных известных пакетах гидродинамического анализа FlowVision, SolidWorks+COSMOSEloWorks, ANSYS. При данных исследованиях определение гидродинамической силы, включающей инерционную и вязкостную составляющие, осуществляется аналитическими или экспериментальными методами с использованием систем автоматизированного проектирования [8]. При этом выбор систем автоматизированного проектирования характеризуется как с экономическим фактором, так и с возможностью интеграции с уже внедренными средствами на предприятии средствами проектирования.

Проведенный анализ способов и методов управления пограничным слоем в морской технике раскрывает перспективность исследовательского научного направления. В то же время позволяет продолжить исследования в данной области, ориентируясь на современные технологии. При этом содержание статьи раскрывает лишь некоторые из существующих методов и способов управления пограничным слоем.

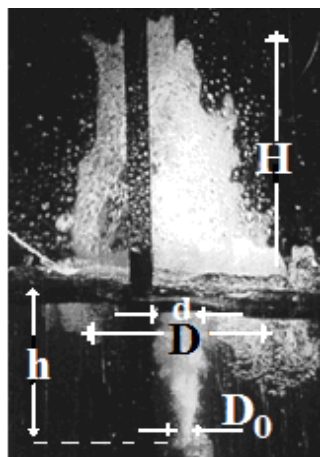


Рис. 7. Фотография истечения газа через слой жидкости  
Fig. 7. Photo expiration gas through the fluid layer

Предложенные способы и методы дают возможность совершенствовать и «оттачивать» методику исследовательских процессов в области ламинарного и турбулентного пограничного слоя. Благодаря теории пограничного слоя появляется необходимость учитывать влияние вязкой жидкости на кормовую часть и обводы морского судна. Развитие современных способов и методов управления пограничным слоем позволит охарактеризовать улучшение мореходных качеств морской техники, в том числе и в промышленный период. При всем многообразии методов и способов управления пограничным слоем насущной задачей исследования теории пограничного слоя является подготовка и настройка специализированных методов и программ, необходимых для достоверной оценки всевозможных методов управления пограничным слоем, которые могут повлиять на конструктивные особенности морских судов и характер их движения в морской акватории.

### Список литературы

1. Плоткина В.А., Стародубцев П.А. Зарождение и развитие теории пограничного слоя в гидравлике // История науки техники. – 2014. – № 5. – С. 10-20.
2. Гриценко А.В. Исследование пограничного слоя ламинарного потока жидкости в гладкой трубе методом фотонной корреляционной спектроскопии / А.В. Гриценко, Н.А. Мыслицкая, А.М. Иванов, И.Г. Самусев // Изв. КГТУ. – 2009. – № 16. – С. 197-203.
3. Ломов С.А., Ломов И.С. Основы математической теории пограничного слоя. – М.: Изд-во Московского ун-та, 2011. – 456 с. – <http://www.knigafund.ru/books/138665/read>.
4. Мовчан В.Т., Шквар Е.А. Математическое моделирование пограничных слоев // Прикладная гидромеханика. – 2005. – Т. 7 (79), № 3-4. – С. 73-85.
5. Пат. 2241868 Российская Федерация, F15D1/06, F17D1/20. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе; заявитель и патентообладатель / Голованчиков А.Б., Ильин А.В., Ильина Л.А., Лобойко В.Ф., Якушко М.В. Волгоградский гос. техн. ун-т; № 2003110552/06; заявл. 14.04.2003; опубл. 10.12.2004, Бюл. № 12.
6. Валитов Р. А. Применение устройств активного управления пограничным слоем с учетом энергетических затрат для предотвращения отрыва потока // Тр. Математического центра имени Н.И. Лобачевского: материалы Восьмой молодежной научной школы-конференции «Лобачевские чтения – 2009»; Казань, 1-6 ноября 2009 г. – Казань: Казан. матем. об-во, 2009. – Т. 39. – С. 147-148.
7. Абзалилов Д.Ф., Валитов Р.А., Ильинский Н.Б. Поиск оптимальных параметров движущейся стенки для устранения отрыва пограничного слоя // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике: тез. докл. Междунар. конф., посвященной 110-летию академика М.А. Лаврентьева. – Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2010. – С. 55.
8. Маттис А.В., Коптилкин А.А. Исследование гидродинамических свойств морских подвижных объектов с применением САПР // Автоматизация процессов управления. – 2011. – № 2. – С. 39-42.

**Сведения об авторах:** Плоткина Виктория Александровна, старший преподаватель,  
e-mail: vika\_plotkina@mail.ru;  
Стародубцев Павел Анатольевич, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: spa1958@mail.ru.