

УДК 532.526 + 629.12:620.1

**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>Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова,  
690062, г. Владивосток, Камский переулок, 6

## **СОПРОТИВЛЕНИЕ ФОРМЫ СУДОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ В МОРСКОЙ СРЕДЕ**

*Объектом исследования является корпус морского судна. Рассматриваются факторы, влияющие на характер течения вблизи морского судна. Раскрывается актуальность исследовательских процессов в области теории пограничного слоя, а также приводится аналитический метод оптимизации формы корпуса судна. Результат исследований раскрывает пути решения проблемы сопротивления формы судов при движении в морской среде.*

**Ключевые слова:** пограничный слой, морское судно, сопротивление жидкости.

## **V.A. Plotkina, P.A. Starodubtcev RESISTANCE FORMS OF VESSELS WHEN DRIVING IN THE MARINE ENVIRONMENT**

*The object of study is the hull of a marine vessel. This article discusses the factors affecting the nature of the flow near a ship. Reveals the relevance of the research processes in the field of boundary layer theory and provides an analytical method of optimization of the hull form. The result of this research reveals the ways of solving the problem of resistance to forms of ships when moving in the marine environment.*

**Key words:** boundary layer, a ship, the resistance of the liquid.

### **Введение**

Современные представления о механизме сопротивления при движении жидкости основываются на теории пограничного слоя.

В большинстве задач прикладной газовой динамики приходится иметь дело с маловязкими жидкостями, движущимися с относительно большими скоростями. Характерной особенностью таких течений является относительно большое число Рейнольдса (числа Re).

Как показывают опыты, при больших числах Рейнольдса влияние вязкости существенно проявляется лишь в области течения, непосредственно прилегающей к поверхности обтекаемого тела (внешняя задача) или стенки канала (внутренняя задача). Эта область имеет малую по сравнению с длиной судна протяженность в направлении нормали к поверхности, т.е. представляет собой достаточно тонкий слой жидкости возле поверхности, и называется пограничным слоем.

В пограничном слое скорость течения возрастает от нуля на поверхности до своего конечного значения во внешней (по отношению к пограничному слою) области течения. Ввиду малой толщины пограничного слоя поперечный градиент скорости  $\partial v/\partial y$  в нем очень велик и сколь бы малой ни была вязкость жидкости, напряжения трения, возникающие в пограничном слое, будут оказывать существенное влияние на движение жидкости. Наоборот, в области вне пограничного слоя силы инерции во много раз превосходят по величине бесконечно малые силы вязкого трения (большие числа Re), здесь жидкость можно рассматривать как идеальную, а течение – как квазипотенциальное, т.е. безвихревое и при отсутствии сил трения.

Сопротивление трения существенно зависит от режима течения в пограничном слое. Течение в пограничном слое может быть ламинарным, переходным и турбулентным, независи-

мо от режима течения невозмущенного потока вне пограничного слоя. Как показывают эксперименты, переход ламинарного течения в пограничном слое в турбулентное определяется критическим числом Рейнольдса.

В направлении течения вдоль поверхности толщина пограничного слоя  $\delta$  увеличивается, и режим течения в пограничном слое изменяется. На начальном участке течения толщина пограничного слоя мала ( $\delta < \delta_{кр}$ ), и в пограничном слое сохраняется устойчивое ламинарное течение с молекулярным механизмом переноса. При увеличении толщины ламинарного пограничного слоя до критической величины  $\delta_{кр}$  устойчивость ламинарного течения нарушается, и на небольшом участке возникает переходный режим. За переходным участком развивается устойчивый турбулентный пограничный слой с турбулентным механизмом переноса.

Переходный режим сопровождается хаотическим чередованием во времени ламинарного и турбулентного режимов течения. Поскольку течение на переходном участке исследовано недостаточно, обычно в расчетах принимают, что ламинарный пограничный слой в критическом сечении сразу переходит в турбулентный.

Существенное влияние на переход (положение критического сечения) оказывает степень турбулентности невозмущенного потока, продольный градиент давления  $\partial p / \partial x > 0$  и шероховатость поверхности.

Закон изменения скорости по нормали к поверхности и, соответственно, завихренность и механизм переноса различны для ламинарного и турбулентного режимов течения в пограничном слое.

Турбулентный пограничный слой имеет более полный (более наполненный) профиль скорости. При одинаковых числах Рейнольдса сопротивление трения в турбулентном пограничном слое существенно выше, чем в ламинарном пограничном слое, и эта разница возрастает с увеличением числа Re. Поэтому для уменьшения сопротивления трения корпуса морского судна или канала следует «затягивать» ламинарный пограничный слой, сдвигая как можно дальше по потоку критическое сечение, т.е. осуществлять искусственную ламинаризацию пограничного слоя, которая заключается в уменьшении толщины  $\delta$ , интенсивности турбулентности невозмущенного потока, продольного градиента давления  $\partial p / \partial x > 0$  и шероховатости.

### **Объект и методы исследований**

В результате на характер течения жидкости и пограничного слоя (ламинарный или турбулентный) определяющее влияние оказывает не только число Рейнольдса, но и изменение давления вдоль потока, зависящее, в свою очередь, от формы обтекаемой поверхности.

Сопротивление формы зависит от конфигурации движущегося в жидкости тела. Как и сопротивление трения, оно обусловлено вязкостью жидкости.

Посмотрим на вид сверху двух типов судов, при этом один из которых – длинный и узкий, с плавными формообразованиями; второй имеет полные формообразования и широкую корму (рис. 1).

Частицы воды, находящиеся в слоях, ближайших к поверхности корпуса морского судна, движутся по отношению к нему с очень малой скоростью и, следовательно, приобретают небольшую кинетическую энергию. Двигаясь от носа к корме, где давление больше, чем в средней части, частицы, потеряв из-за вязкости воды часть своей кинетической энергии, не в состоянии преодолеть повышенное давление в кормовой оконечности судна. Израсходовав всю энергию, частицы останавливаются, а затем под воздействием повышенного встречного давления начинают двигаться назад, навстречу потоку, отрывая пограничный слой от поверхности корпуса. За точкой, в которой происходит отрыв пограничного слоя, зарождаются и образуются вихри – добавочное сопротивление (рис. 2).

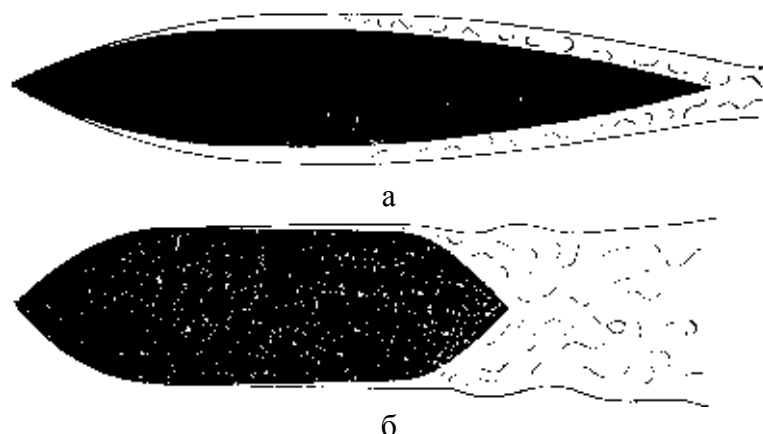


Рис. 1. Вид сверху: а – форма корпуса судна узкая с плавными формообразованиями;  
б – форма корпуса судна широкая с полными формообразованиями  
Fig. 1. Top view: а – shape of the hull are narrow with smooth morphogenesis;  
б – the hull shape is wide with full formation

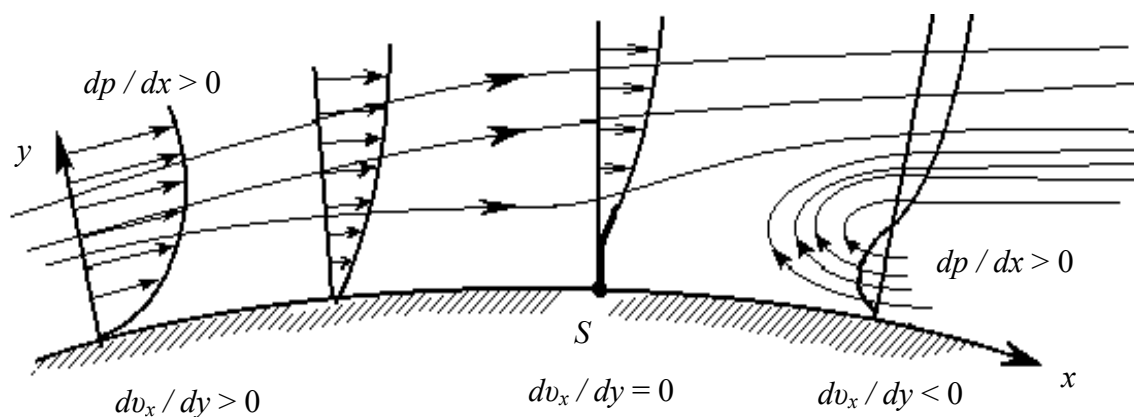


Рис. 2. Отрыв пограничного слоя (точка  $S$  – точка отрыва)  
Fig. 2. Separation of the boundary layer (point  $S$  – the point of separation)

У первого судна (см. рис. 1, а) пограничный слой простирается вдоль бортов с плавным переходом в попутный поток, у второго (см. рис. 1, б) – как бы отрывается от корпуса, образуя широкий след. В зоне отрыва обтекающие корпус потоки резко срываются и превращаются в завихрения. Происходит отрыв пограничного слоя (см. рис. 2).

Именно этим объясняется интенсивный отрыв пограничного слоя у морских судов с тупой кормовой оконечностью, и наоборот, незначительный отрыв, а порой и полное его отсутствие у судов с большим отношением длины к ширине и узкой кормой. У некоторых типов судов, а особенно у барж, сопротивление формы может составлять около 50 % полного.

При этом полное сопротивление включает в себя следующие составляющие: сопротивление трения; добавочное сопротивление шероховатостей; сопротивление формы и волновое сопротивление [1].

### Результаты и их обсуждение

Каждому типу судна соответствует особая форма корпуса, зависящая от многих факторов: назначения судна, условий его эксплуатации, скорости хода, качества судна и др.

Корпуса движущихся судов представляют собой удлиненное тело, ограниченное кривыми поверхностями, создающими обтекаемую форму, уменьшающую сопротивление воды и воздуха его движению. Корпуса таких судов имеют заостренные оконечности и плавные переходы боковых поверхностей в днищевые плоскости. Корпуса стояночных судов или судов, скорость транспортировки которых не имеет большого значения, наоборот, делают для упрощения технологии постройки прямоугольными или плоскостной формы с резко выраженными гранями.

Корма судна имеет более сложную конфигурацию, чем носовая оконечность, так как в кормовой оконечности размещаются различные устройства, обеспечивающие маневренность судна (гребные винты, рули и т.д.), которым необходимо обеспечить наилучшие условия работы.

Для того чтобы судно, идущее по сильно взволнованной водной поверхности, не зарывалось оконечностями в волну, борта корпуса в носовой оконечности по высоте расширяют (разваливают).

В итоге формы обводов современных судовых корпусов созданы в результате долголетней отработки с учетом сопротивления жидкости.

Появление опытовых бассейнов позволило обеспечить выбор оптимальной формы корпуса судна на научной основе при использовании метода моделирования сопротивления движению морского судна.

В результате появились характерные формы миделевых обводов судов разных типов, в том числе, посредством теории пограничного слоя. Из них наиболее характерны:

- а) морские транспортные суда – с вертикальным бортом и с подъемом днища;
- б) морские быстроходные суда – с хорошо обтекаемыми обводами, большим углом подъема днища и большим скуловым закруглением;
- в) ледокольные суда со скругленными бортами и развалом в подводной части и завалом в надводной части. Такая форма поперечного сечения увеличивает поперечную жесткость корпуса, и в случае сжатия судна в ледяных полях лед вдвигается по наклонным бортам или под судно, выжимая его из воды, или поднимается вверх;
- г) быстроходные суда малого водоизмещения (или катера), в большинстве случаев имеющие прямые с развалом борта, переходящие под углом в днище с большим подъемом слегка изогнутой формы;
- д) быстроходные суда внутреннего плавания – с плоскодонным днищем, с циркульной скулой, переходящей в борта с развалом. Такие образования увеличивают площадь палубы и помещения в надводной части корпуса;
- е) речные плоскодонные суда – с горизонтальным днищем, с вертикальными бортами и с малым радиусом закругления скулы. Такой профиль поперечного сечения обеспечивает максимальный объем корпуса и предусматривается на тихоходных судах с минимальной осадкой.

Эффективность морских коммуникаций и океанского рыболовства в северных широтах Тихого океана обеспечивается целевым проектированием океанских судов, специально оптимизированных для сложных условий работы в штормовых и ледовых условиях дальневосточных морей России [2].

Оптимизация в морской технике опирается также на основах эффективности использования аналитических данных по преодолению сопротивления движению жидкости морского судна.

В результате для построения оптимизированной формы корпуса с учетом общинженерных и навигационных требований перспективному кораблю повышенной мореходности необходимо исключение отрыва пограничного слоя в районе руля и движителей. Данное усло-

вие достигается за счет крейсерской кормы с плавными кормовыми рыбинами на теоретическом чертеже, способствующими малости градиентов и завихренности потока в зоне действия движителей, а также с помощью ламинизации пограничного слоя с использованием соответствующих методов управления.

В итоге на обводы корпуса судна влияет и способ ламинизации пограничного слоя вблизи корпуса морского судна. Возможным способом ламинизирования пограничного слоя является создание воздушной прослойки («воздушной смазки») между корпусом и забортной текучей средой (рис. 3).

Суть идеи состоит в создании между обшивкой корпуса и текучей средой тонкой воздушной прослойки с замкнутой циркуляцией воздуха. За головной частью корпуса через щель отсасывается вода, чтобы не допустить формирование турбулентного пограничного слоя. Через следующую щель подается воздух для образования воздушной прослойки. Этой же цели служат и щели, расположенные на днище. Внутри прослойки воздух перемещается вверх, что влечет за собой неравномерное распределение толщины прослойки по обводам корпуса. Чтобы помешать перетеканию воздуха, на боковой поверхности имеются выступы, не соприкасающиеся с водой. Таким образом, вся средняя часть корпуса обтекается тонким слоем. Когда рой пузырьков быстро поступает из небольших отверстий в днище судна, образуется слой толщиной 1–2 см, покрывающий днище (рис. 3), что снижает сопротивление, поскольку воздух обладает в 850 раз меньшей плотностью в сравнении с водой.

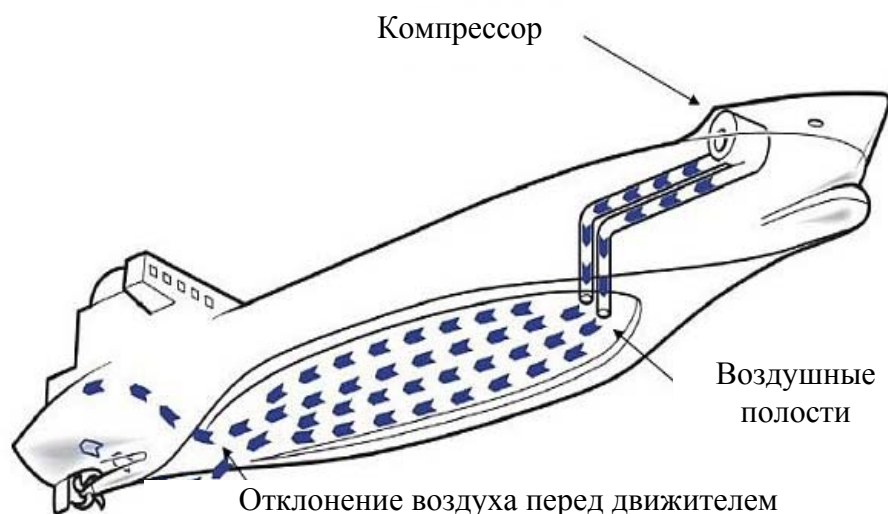


Рис. 3. Создание «воздушной прослойки» между корпусом и забортной текучей средой  
Fig. 3. The creation of the «air gap» between the body and outboard the fluid

### Выводы

Причиной низкой популярности системы воздушной смазки является настороженность, присущая морякам.

Море – суровая стихия, и некоторые люди опасаются, что полости (их площадь покрывает примерно две трети днища) будут оказывать негативное воздействие на управляемость судном. Это так: и в чем-то даже к лучшему, поскольку полости являются своеобразными поглотителями ударов, снижающими бортовую и килевую качку. Однако при сильном шторме это может оказаться проблемой. Если в полость вместо воздуха попадет вода, судно действительно будет испытывать усиленную качку.

Для обхода подобного явления нужно применить новые технологии, например, использовать систему лазерных датчиков для определения места, куда в следующий момент ударит волна, с таким расчетом, чтобы подать в эти полости большой объем воздуха для компенсации удара.

Следуя данной тенденции, в недалеком будущем применение системы воздушной смазки, возможно, будет более распространенным.

Вследствие указанных выше аспектов на сопротивление движения судна в первую очередь влияют сущность режима движения жидкости внутри пограничного слоя и особенности распределения давления по поверхности судна.

В результате проблему сопротивления формы судов при движении в морской среде обязательно решать с помощью активных методов при проектировании судна.

Успешное внедрение современных технологий в судостроительную отрасль позволяет совместить методы управления пограничным слоем с основами проектирования судов различного назначения с целью оптимизации формы обводов судна. Интересен уже сам факт обращения специалистов не только к гидродинамике в более широком смысле, но и к смежным областям науки, в том числе к теории пограничного слоя, в поисках решения проблемы сопротивления судов при движении в морской среде.

### Список литературы

1. Плоткина, В.А. Теория пограничного слоя: монография / В.А. Плоткина. – Владивосток: ТОВВМУ им. С.О. Макарова, 2015. – 120 с.
2. Храмушин, В.Н. Концептуальные проекты рыболовных, спасательных и патрульных судов для Сахалина и Курильских островов / В.Н. Храмушин // Мореходство и морские науки. – 2011. – С. 64–81.

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

Стародубцев Павел Анатольевич, доктор технических наук, профессор.