

УДК 532.528

ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Ю. Н. САВЧЕНКО

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 23.08.99

Приведен краткий обзор некоторых публикаций по исследованию снижения гидродинамического сопротивления, инициированных в СССР и получивших дальнейшее развитие в странах СНГ. Проанализированы методы воздействия на пограничный слой, использование МГД - эффектов, снижения волнового сопротивления и сопротивления формы. Анализируются возможные пути дальнейшего развития методов снижения гидродинамического сопротивления и их возможного использования на транспортных средствах.

Приведено стислий огляд деяких публікацій по дослідженню зниження гідродинамічного опору, яке було розпочато в СРСР і одержало подальший розвиток в країнах СНД. Розглянуті методи впливу на пограничний шар, використання МГД - ефектів, зниження хвильового опору і опору форми. Проведено аналіз можливих шляхів подальшого розвитку методів зниження гідродинамічного опору та їх можливе застосування на транспортних засобах.

A brief review of some publications on research of the hydrodynamic drag reduction, which were initiated in USSR and received the further development in the countries of the independent states, is given in this paper. Methods of action on the boundary layer, use of MHD - effects, reduction of the wave drag and shape drag are considered. Possible ways of the further development of methods of the hydrodynamic drag reduction and their feasible application on vehicles are analyzed.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема снижения гидродинамического сопротивления приобрела первостепенное значение, поскольку дальнейшее повышение мощности силовых установок, использующих атомную энергию, оказалось не в состоянии обеспечить технически оправданное повышение скорости движения транспортных средств.

Следует отметить, что снижение гидродинамического сопротивления важно не только для повышения скорости транспортных средств, но и для снижения шумов и возмущений в окружающей жидкости, а также для снижения экологической нагрузки на водную среду.

Полное гидродинамическое сопротивление объектов принято разделять на три части:

1. Сопротивление трения;
2. Сопротивление формы или давления;
3. Волновое сопротивление.

Такое разделение обусловлено различной природой возникновения этих составляющих и удобно для целей научного анализа. Соответственно этому разделению сопротивления разделяются и методы снижения сопротивления. Отметим, что составляющие волнового сопротивления и формы поддаются частичному восстановлению на корпусе движущегося объекта в отличие от сопротивления трения, которое необратимо и непосредственному восстановлению не поддается.

Сопротивление трения обязано своим происхождением свойством прилипания и вязкости μ , которая делает жидкость способной передавать касательные напряжения τ при относительном сдвиге ее слоев. Закон трения Ньютона выражает это свойство равенством [34]

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \nu \rho \frac{du}{dy}.$$

Теоретические разработки способов снижения гидродинамического сопротивления всегда были связаны с большими трудностями, к которым относятся сложность отыскания решений уравнений вязкой жидкости при больших числах Рейнольдса и при наличии во внешней области течения разрывов поля скоростей, застойных областей или каверн.

Однако именно анализ теоретических схем течений позволил предложить ряд методов для снижения гидродинамического сопротивления [7, 15, 17, 33, 40].

Известный с 1745 г. парадокс Даламбера – Эйлера устанавливает, что в идеальной жидкости любое тело конечных размеров будет обтекаться безотрывно с нулевым сопротивлением. С 1904 г. разработана теория пограничного слоя (ПГС) [34]. Эти теоретические предпосылки указали основные направления, по которым разворачивались исследования по снижению гидродинамического сопротивления в реальной жидкости:

1. Устранение эффекта прилипания или реали-

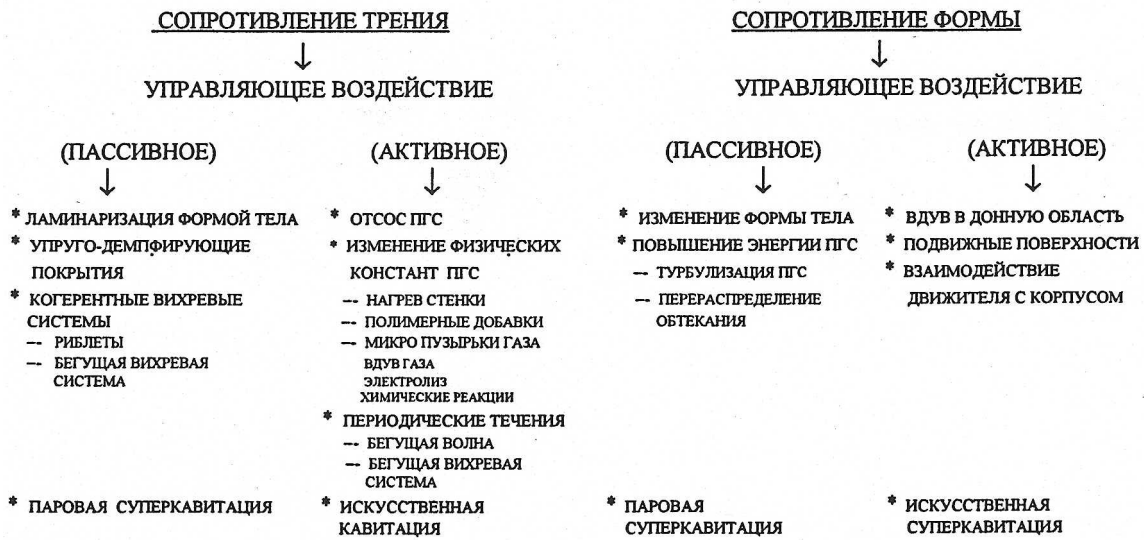


Рис. 1. Методы снижения гидродинамического сопротивления

зация проскальзывания жидкости вдоль поверхности тела.

2. Реализация подвижной границы на поверхности тела. При этом скорость движения каждой точки подвижной границы при обтекании вязкой жидкостью должна быть равна скорости течения при обтекании идеальной жидкостью.

3. Изменение физических констант пристеночного слоя.

4. Изменение характеристик течения в пристеночном слое.

Другим важным источником методов снижения сопротивления были гидробионические исследования [15, 18, 24, 38]. Они стимулировали исследования эффектов упругих покрытий [22, 23], бегущих волн и влияния слизи [2–4], [24] на снижение гидродинамического сопротивления.

Многочисленные и разнообразные способы снижения сопротивления требуют реализации управляющих воздействий, которые могут быть условно разделены на активные и пассивные (рис. 1):

– пассивное управляющее воздействие обеспечивает снижение сопротивления без затрат энергии либо за счет энергии потока;

– активное управляющее воздействие обеспечивает снижение гидродинамического сопротивления трения или формы за счет расхода энергии либо расхода специальных веществ.

Большую сложность представляет также выбор оптимального управляющего воздействия на поток жидкости с целью стабилизации специальной

схемы обтекания с малым гидродинамическим сопротивлением, которая без этого воздействия не реализуется. При этом под оптимальным управляющим воздействием понимается минимум отношения затрат энергии на управляющее воздействие E_c к выигрышу в полном гидродинамическом сопротивлении объекта ΔR [7]:

$$\overline{E}_c \min = \frac{E_c}{\Delta R V_\infty}$$

ГРЯЗЬ ПОДВИЖНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ НИЦЕ ТЕЛА

Хорошим примером реализации безотрывного обтекания может служить течение при обтекании вращающегося цилиндра, расположенного поперек потока. При этом заметим, что безотрывной формы обтекания невращающегося цилиндра в реальной жидкости не существует. Однако картины циркуляционного обтекания вращающегося цилиндра в вязкой жидкости и идеальной очень близки.

Впервые влияние движущейся стенки на обтекание крыла самолета исследовалось А.Фавром в 1938 г. [41].

Серия экспериментов по влиянию подвижных границ на безотрывное обтекание проведена в ИГМ НАН Украины [35]. В экспериментах исследовалась модель, составленная из плоской пластины, поставленной поперек потока. Подвижные

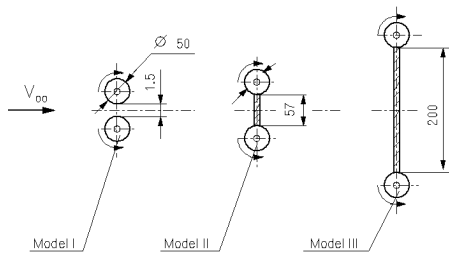


Рис. 2. Модели с подвижной границей

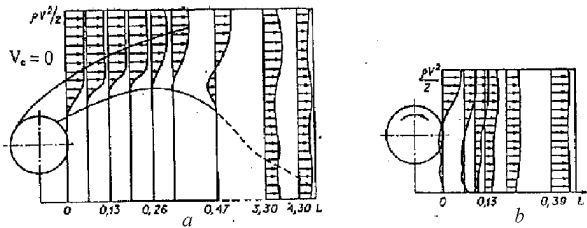


Рис. 3. Течение за моделью

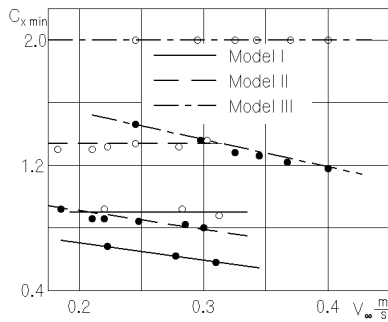


Рис. 4. Снижение сопротивления за счет вращения цилиндров:

○ – $-V_c = 0$; ● – $-V_c \neq 0$

участки границы получены путем установки вращающихся цилиндров вдоль ребер пластинки (рис. 2). Размеры пластинки выбраны такими, чтобы постановка цилиндров не улучшала обтекания пластины и коэффициенты сопротивления модели с неподвижными цилиндрами и одной пластины были одинаковыми и равны $C_x = 2$. При вращении цилиндров сопротивление модели резко падало до некоторого минимума, а отрыв и застойная область за моделью резко сокращалась (рис. 3). Важно, что при этом коэффициент сопротивления такой модели не оставался постоянным, а стремился к нулю как $O(1/\sqrt{Re})$ (рис. 4).

Теоретический анализ показал, что тело произвольного сечения при подходящем выборе управляющей функции $U(\xi)$ может иметь безотрывную

форму обтекания, а коэффициент сопротивления может быть представлен в виде [7, 35]

$$C_x = \frac{1}{\sqrt{\pi Re}} \int_0^a \frac{W^2(\xi, 0) - U(\xi)W(\xi, 0)}{\sqrt{a - \xi}} d\xi,$$

где $W(\xi, 0)$ – скорость потенциального течения на границе тела, Re – число Рейнольдса.

2. ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ПГС

Изменение физических свойств ПГС может вызывать:

- повышение устойчивости ПГС и затягивания перехода ламинарного ПГС в турбулентный;
- снижение касательных напряжений за счет уменьшения плотности и вязкости жидкости в пределах ПГС;
- снижение уровня турбулентности в турбулентном ПГС.

Стабилизирующее влияние градиента вязкости легко обнаруживается при анализе уравнений пограничного слоя с переменной вязкостью:

$$u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dx} = \frac{1}{\pi} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\pi} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

где u и v – компоненты вектора скорости течения жидкости вдоль осей OX и OY ; ρ – массовая плотность; μ – динамическая вязкость жидкости. Первое уравнение можно записать в виде

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + \left(v - \frac{1}{\pi} \frac{\partial \mu}{\partial y} \right) \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2},$$

где $\nu = \mu/\rho$ – кинематическая вязкость.

Анализ этого уравнения показывает, что наличие положительного градиента вязкости эквивалентно отрицательной скорости $-v$. При достаточно большом положительном градиенте вязкости $\partial \mu/\partial y$ можно получить отрицательные значения выражения, стоящего в скобках, что эквивалентно отсосу жидкости из ПГС, влияние которого на устойчивость ламинарного ПГС хорошо изучено [7, 18, 34].

Положительный градиент вязкости в ПГС можно обеспечить нагревом стенки для жидкостей, коэффициент вязкости которых снижается с возрастанием температуры. Кривизна профиля скоростей у стенки будет определяться величиной

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_{CT} = -\frac{1}{\mu_{CT}} \left(\frac{\partial \mu}{\partial y} \right)_{CT} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{CT}.$$

В случае нагрева стенки профиль скоростей будет более полным и, следовательно, более устойчивым [34]. Эксперименты на моделях с подогревом стенки, проведенные в ИГМ НАН Украины [8], позволили обнаружить существенное снижение сопротивления $9 \div 16\%$ при числах Рейнольдса от $Re = 0.9 \cdot 10^6$ до $2.7 \cdot 10^6$ и подводимой мощности $N = 12$ кВт.

Естественно, что затраты мощности на нагрев поверхности при этом значительно превосходили выигрыш в гидродинамическом сопротивлении.

Исследовался также и другой способ создания положительного градиента вязкости в пограничном слое, основанный на известном свойстве некоторых полимеров создавать раствор меньшей вязкости, чем вязкость воды. Так, исследование свойств рыбьей слизи [18, 20] и малых добавок полимера [4, 19] показали возможность снижения сопротивления трения до 30 %.

Совершенно другой механизм действия раствора полимера обнаружен при снижении напряжения трения в турбулентных течениях. Этот эффект впервые обнаружил В. Томс и впоследствии исследовался многими авторами [4, 15, 19, 29].

Общее мнение исследователей таково: эффект снижения турбулентного трения проявляется при сравнительно больших концентрациях полимера (0.1 ÷ 10%) с большим молекулярным весом. На таких сравнительно больших и длинных образованиях могут гаситься турбулентные пульсации либо за счет дробления, либо за счет релаксации напряжения, либо за счет анизотропии вязкости, обусловленной ориентацией полимерных молекул.

3. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ В ПГС

Результаты исследований нестационарных течений в ПГС при наличии небольших периодических возмущений показывают, что под действием касательных напряжений в ПГС могут возникать вторичные течения, изменяющие стационарное основное течение, хотя сами возмущения имеют чисто периодический характер. Такие течения вида

$$v(x, t) = u(x) + u_1(x) + u_1(x) \sin nt$$

рассмотрены в монографии Шлихтинга [34]. Характерными периодическими течениями являются также течения Куэтта, Кельвина-Гельмгольца (рис. 5) [36]. Интерес к периодическому течению в ПГС, как к возможному способу снижения гидродинамического сопротивления, впервые был вызван бионическими исследованиями Эссапиана и

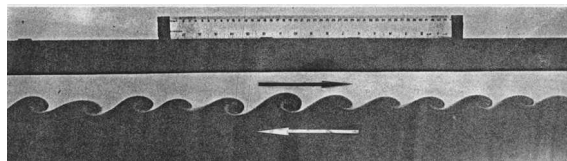


Рис. 5. Вихревая система Кельвина - Гельмгольца [36]



Рис. 6. Вихревая система, генерируемая бегущими волнами [5]

Крамера [38], высказавшими предположение, что бегущие складки на поверхности кожи дельфинов могут влиять на гидродинамическое сопротивление.

Последующие эксперименты, проведенные в ИГМ НАН Украины показали, что во впадинах бегущих волн может возникать периодическое вторичное течение в виде вихрей, расположенных во впадинах между бегущими волнами (рис. 6) [3, 5, 7].

Интересно, что коэффициент сопротивления такой поверхности при фазовой скорости бегущих волн становится меньше, чем у гладкой пластины в турбулентном потоке и перестает зависеть от числа Рейнольдса. Последнее обстоятельство свидетельствует о формировании периодического течения, не зависящего от длины модели.

К сожалению, трудности технической реализации бегущей волны на поверхности тел делают невозможной практическую реализацию этого метода снижения гидродинамического сопротивления.

В связи с этим большой интерес вызывают исследования по непосредственной генерации аналогичных вихревых систем на телах вращения [37].

В соответствии с этой схемой в носовой части тела должен быть установлен генератор системы кольцевых или спиральных вихрей, которые будут сноситься вниз по потоку и снижать касательные напряжения на корпусе аналогично вихревой системе, возникавшей во впадинах между бегущими волнами (рис. 7, 8).

Сравнение энергии, требующейся на создание

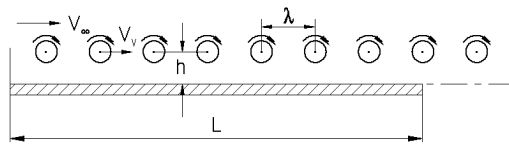


Рис. 7. Схема вихревой цепочки [37]

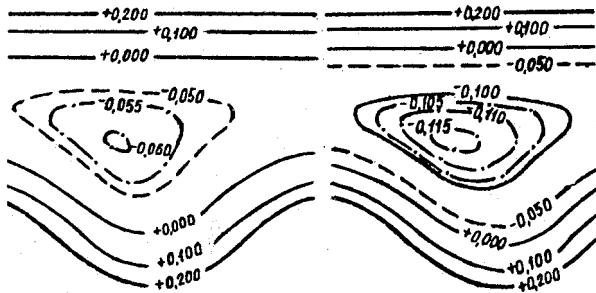


Рис. 8. Компьютерное моделирование [2]

вихревой системы с диаметром вихрей R и расстоянием между вихрями λ ,

$$E = \frac{\pi \rho \nu L V_\infty^2}{\lambda} \left[1 + \frac{7}{32} \left(\frac{R}{L} \right)^2 Re_L \right],$$

с энергией турбулентного пограничного слоя

$$E_T = 0.0307 L \rho V_\infty^3 0.5 Re_L^{-1/7}$$

даёт величину

$$\frac{E}{E_T} = 44.7 \frac{R^2}{\lambda L} Re_L^{-1/7}.$$

Легко видеть, что выигрыш в энергии может быть достигнут при достаточно большой длине пластины L , при условии, что на ней сохранится вихревая система с неизменными первоначальными параметрами ω, R, λ – угловой скоростью, радиусом вихрей и шагом между вихрями соответственно.

Однако эксперименты показали, что вихри с необходимыми параметрами в пограничном слое не могут существовать достаточно долго, они существуют $25 \div 30$ диаметров и затем распадаются. Поэтому на телах большого удлинения необходимо устанавливать достаточно большое количество генераторов, чтобы вихри покрывали всю поверхность.

Для практической реализации это довольно сложно, хотя имеется возможность использовать

энергию, затраченную на генерацию вихревой системы от пульсатора или турбины, использующихся в качестве вихревых генераторов [37].

СЛОЙ ГАЗА В ПОГРАНИЧНЫЙ

Особенно привлекательным для снижения сопротивления трения выглядел метод вдува газа в пограничный слой и создание воздушной смазки, так как плотность воздуха в 800 раз меньше плотности воды.

Впервые изменение гидродинамического сопротивления при вдуве газа в ПГС рассмотрено Л.Г.Лойцянским и К.К.Федяевским [40]. В этих работах сделаны допущения о монотонном изменении параметров двухфазной смеси, которая имеет свойства газа на стенке и свойства воды на границе ПГС. При таких допущениях рассчитан коэффициент сопротивления при турбулентном обтекании плоской стенки, который был в 130 раз меньше соответствующего коэффициента трения однородной жидкости.

Последующие эксперименты показали, что снижение сопротивления при турбулентном обтекании составляет величину $30 \div 40\%$, что находится в явном противоречии с рассчитанными величинами.

Экспериментальные исследования И.Д.Желтухина [39] показали, что в ПГС свойства двухфазной среды могут изменяться скачкообразно. При этом возможны качественно отличные механизмы трения, чем в однородной жидкости.

Согласно закону трения Ньютона, касательные напряжения в жидкости определяются как

$$\tau = \mu \frac{du}{dy},$$

где μ – динамическая вязкость, которая для смеси воды и газа при малом взаимодействии пузырьков будет

$$\mu_m = \mu_w \left(1 + 25 C_G \frac{\mu_G + 0.4 \mu_w}{\mu_G + \mu_w} \right).$$

Как видно из этой формулы вязкость смеси μ_m всегда остается больше вязкости воды μ_w и может достигать величины $\mu_m / \mu_w \approx 70$ при изменении концентрации газа C_G .

Дальнейшие исследования снижения сопротивления при насыщении ПГС микропузырьками воздуха, проведенные в ЦНИИ им. Крылова, показали возможность снижения сопротивления трения на $30 \div 50\%$ в диапазоне чисел $Re = 10^7$ при

расходе воздуха $q \approx \text{дм}^3/\text{см}^2 \cdot \text{час}$ через пористое покрытие с диаметром пор $d \approx 2 \mu\text{к}$ [28] (рис. 9, а).

Применение щелевого газонасыщения ПГС, как показали эксперименты, связано с повышением расхода воздуха в $10 \div 20$ раз при достижении того же эффекта снижения сопротивления (рис. 9, б).

Эксперименты с газонасыщением ПГС имеют свое продолжение в методе искусственной кавитации, когда при вдуве воздуха за кавитационной кромкой поток отрывается от тела и может образовывать каверны большой протяженности, где свободная поверхность воды вообще не касается поверхности тела (рис. 9, в) [32, 33].

Теоретически такой процесс можно реализовать со сколь угодно малым воздушным зазором между свободной границей воды и телом.

Однако на практике приходится считаться с естественным процессом разрушения свободной поверхности каверны и влиянием течения газа в зазоре.

В такой схеме течения приходится рассматривать уже не пузырьковое течение, а капельное течение в зазоре, в котором может осуществляться перенос импульса со свободной границы жидкости на твердую поверхность через капли.

Расчеты и эксперименты с капельными течениями в зазорах, проведенные в ИГМ НАН Украины показали, что процесс переноса импульса каплями может быть очень интенсивным. Уже при концентрации капель $C_F = 10^{-3}$ коэффициент гидродинамического сопротивления пластинки в брызговом потоке может иметь тот же порядок, что и коэффициент сопротивления при сплошном обтекании. При этом толщина жидкой пленки z_0 на пластинке может быть сравнима с толщиной δ турбулентного ПГС [9]:

$$\frac{z_0}{\delta} = 27.8 C_F Re^{0.2} \text{tg} \alpha.$$

Однако в гидромеханике известны примеры течений с газовыми малыми зазорами, где зазор поддерживается автоматически – это пленочный эффект парообразования возле горячей стенки.

В этой связи представляет интерес создание поверхности с автоматическим сдувом капель и поддержания малого зазора с водной поверхностью на скоростях до 10 м/с .

Интересно отметить, что при скоростях более 70 м/с этот процесс может реализовываться за счет естественного парообразования, когда газовая фаза будет поступать в зазор не через проникаемую поверхность, а со свободной поверхности каверны (рис. 9, д).

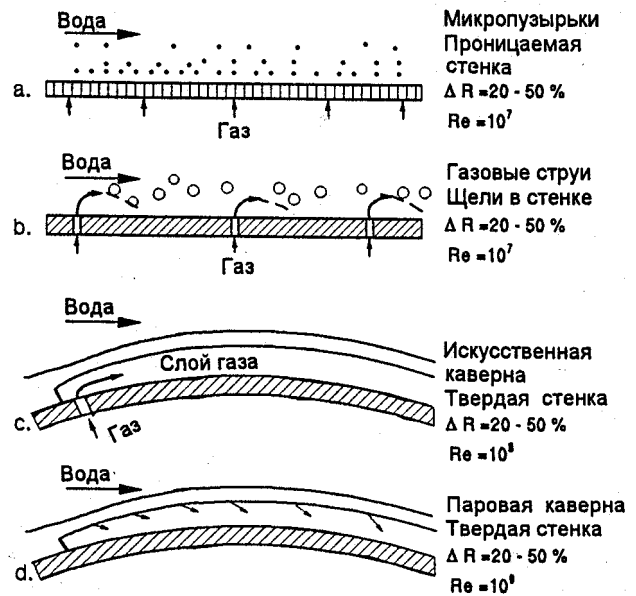


Рис. 9. Поддув газа в пограничный слой

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОЙСТВ МОРСКОЙ ВОДЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Электропроводность морской воды дает возможность создавать объемные силы с помощью электромагнитных и электрических полей подобно тому, как работают магнетогидродинамические (МГД) насосы.

Такой экспериментальный МГД движитель для судна создан японскими исследователями из Университета торгового судостроения в Кобе [42] с использованием эффекта сверхпроводимости в электромагнитах МГД движителя.

Этот же принцип можно использовать для управления течением жидкости.

При этом сравнительно малой электропроводности морской воды может оказаться достаточно для реализации малых управляющих воздействий для компенсации диссипации уже известных вторичных течений в ПГС, например, бегущих вихревых систем или предотвращения отрыва ПГС.

Такие возможности рассмотрены в монографии В.И. Меркулова для создания вихревых течений в ПГС с помощью бегущего магнитного поля, а также магнетодинамического безотрывного обтекания сферы и эллипсоидов вращения [1, 6].

Однако технические ограничения по реализации этих способов пока остаются серьезным препят-

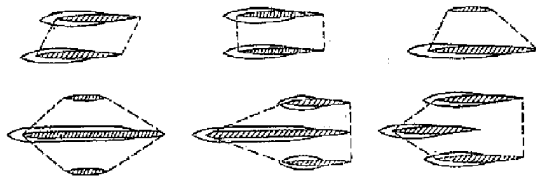


Рис. 10. Варианты SWATH судов

ствием на пути практического их использования.

Другим естественным свойством морской воды разлагаться на водород и кислород под действием электрического тока можно воспользоваться для уже известного способа снижения сопротивления путем газонасыщения ПГС. Однако этот способ по отношению к прямому способу газонасыщения через пористую поверхность представляется слишком энергоемким [27].

6. СНИЖЕНИЕ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ФОРМЫ

Согласно традиционным способам снижения волнового сопротивления в гидромеханике судов применяются двух- или трехкорпусные суда [12]. В случае многокорпусного судна используется возможность создать особую форму корпусов и расположить их таким образом, чтобы за счет интерференции свести к минимуму внешние волновые возмущения (рис. 10).

Эта задача подробно исследовалась в связи с разработкой судов с малой площадью ватерлинии (SWATHS) [10 - 13, 17].

К недостаткам этого метода следует отнести то, что конструкции многокорпусного судна рассчитываются на определенный режим движения и по существу этот метод является однорежимным.

Для обеспечения условий невозмущающего движения водоизмещающего тела в жидкости в Сибирском Отделении АН СССР и ИГМ НАН Украины разрабатывались модели проточных корпусов, которые на любых режимах движения не создавали возмущений в окружающей жидкости [9].

Так, в ИГМ НАН Украины испытывались две схемы обтекания "Тело в канале" и "Тело с каналом" (рис. 11). Эксперименты показали, что обе конструкции в самоходном режиме движения вблизи свободной границы не образуют поверхностных волн, а следовательно, не имеют волнового сопротивления. Однако такие схемы обтекания име-

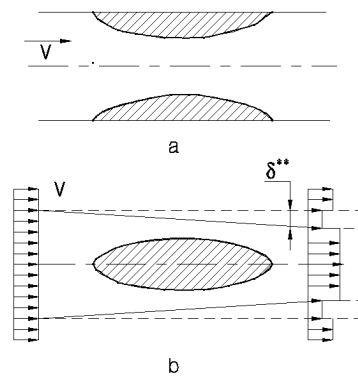


Рис. 11. Невозмущенное движение:
а - Схема "Тело с каналом";
б - Схема "Тело в канале"

ют в 2 – 3 раза большую смоченную поверхность, что обуславливает относительно большие затраты энергии на прокачку жидкости внутри корпуса.

7. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

На практике развитие транспортных средств диктуется тем полезным эффектом, который достигается при эксплуатации транспортного средства.

Для транспортных судов полезный эффект состоит в перевозке грузов. Эффективность судна как транспортного средства будет определяться коммерческой эффективностью [31]:

$$K_p = \frac{PV}{N},$$

где P – полезный груз; V – скорость; N – мощность.

Для средств, используемых в военных и спасательных целях, определяющими показателями будут скорость и дальность. При этом можно видеть, что снижение гидродинамического сопротивления положительно влияет на все основные характеристики, увеличивая коэффициент коммерческой эффективности за счет снижения потребляемой мощности или повышения скорости и дальности.

Для надводных транспортных средств четко прослеживается тенденция снижения площади ватерлинии и смоченной поверхности корпуса за счет динамических средств поддержания корпуса над водой. Это суда с малой площадью ватерлинии SWATHS, суда на подводных крыльях СПК,

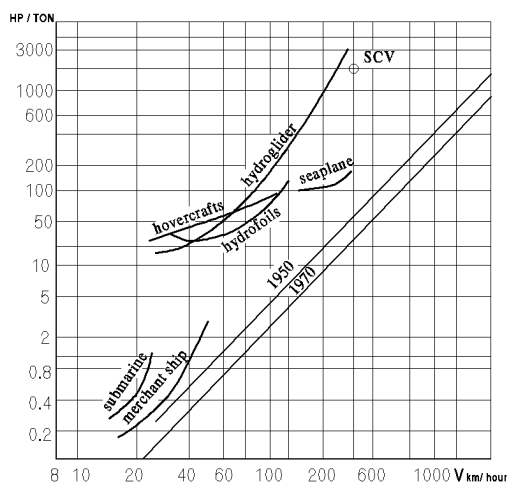


Рис. 12. Универсальная диаграмма судов [31]

суда на воздушной подушке СВП, экранопланы и гидросамолеты.

При этом затраты энергии на реализацию динамических способов поддержания корпуса над водой можно отнести к управляющему воздействию для снижения сопротивления.

По рис. 12 можно проследить, как по мере выхода корпуса из воды растут скорость и энерговооруженность транспортных средств.

Для подводного движения можно использовать тот же путь сокращения смоченной поверхности корпуса с помощью развитой искусственной или паровой кавитации – суперкавитации [30, 32].

Расчеты показывают, что на скорости 100 м/с при числе кавитации $\sigma = 0.01$ можно получить 20-кратный выигрыш в гидродинамическом сопротивлении, а при числах кавитации $\sigma = 10^{-4}$ можно получить 1000-кратный выигрыш в сопротивлении [30]:

$$\sigma = \frac{P_0 - P_K}{\frac{\rho V^2}{2}},$$

P_0 – гидростатическое давление; P_K – давление в каверне, при паровой кавитации равно давлению насыщенных паров воды $P_K = P_{\text{П}}$.

Сравнивая эффективность различных способов снижения гидродинамического сопротивления с эффективностью искусственной и паровой суперкавитации, можно видеть преимущество суперкавитации, а следовательно и перспективность ее использования. К тому же наличие парового слоя между водой и корпусом характерно для многих методов снижения сопротивления, таких как:

– снижение прилипания воды к поверхности или проскальзывание;

– эффект подвижной поверхности (скорость течения газа в зазоре может быть равна скорости течения воды);

– изменение физических констант ПГС (здесь снижение плотности среды);

– вдув газа в пограничный слой (в случае искусственной суперкавитации газ вдувают через твердую поверхность объекта; в случае паровой суперкавитации газ поступает с поверхности суперкаверны).

Однако использование суперкавитационных схем обтекания требует соответственно высокой энерговооруженности транспортного средства. Так, для скоростей 100 м/с при числах кавитации $\sigma = 0.05 \div 0.01$ удельная энерговооруженность будет порядка $2 \cdot 10^3$ л.с./т, что сравнимо с энерговооруженностью глиссирующих судов на универсальной диаграмме Габриэлли – Кармана [31].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обзор методов снижения гидродинамического сопротивления позволяет сделать следующие выводы:

– В настоящее время имеется большой выбор методов снижения гидродинамического сопротивления, которые обеспечивают надежное снижение гидродинамического сопротивления на величину 10% – 40% в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 10^5 \div 10^7$.

В то же время, управляющие воздействия этих методов не всегда удобны, достаточно дешевы и безопасны для реализации при нынешнем уровне развития техники.

– Тенденция развития гидротранспортных средств демонстрирует использование метода сокращения смоченной поверхности корпусов путем подъема их из воды. Для этого используются гидроаэродинамические методы создания сил, которые компенсируют вес объекта, а энергия, расходуемая на их создание, может считаться энергией на управляющее воздействие по снижению сопротивления.

– В настоящее время перспективными для практической реализации можно считать способы снижения сопротивления с активным управляющим воздействием, использующим воздух для вдува в пристеночный слой, по причине простоты, относительной дешевизны и экологической безопасности.

– К перспективным для дальнейших исследований могут быть отнесены все способы снижения сопротивления с пассивным управляющим воздей-

ствием, а также те активные, где могут быть использованы остаточные или сбрасываемые низкопотенциальные потоки тепловой энергии или газа от основного движителя транспортного средства.

1. Пинчук В.И., Ткаченко В.Ф. Численный расчет течения проводящей жидкости в бегущем магнитном поле // Бионика.– 4.– 1970.– С. 111 – 116.
2. Калугин И.Н., Пинчук В.И. Течение вязкой несжимаемой жидкости вдоль бегущей волны // Бионика.– 4.– 1970.– С. 104 – 110.
3. Меркулов В.И., Савченко Ю.Н. Экспериментальное исследование течения жидкости вдоль бегущей волны // Бионика.– 4.– 1970.– С. 116 – 120.
4. Баренблатт Г.И., Булина И.Г., Мясников В.П., Шаламович Г.И. О влиянии малых добавок растворимых высокомолекулярных соединений на режиме движения жидкости // ПМТФ.– 4.– 1965.– С. 137 – 139.
5. Савченко Ю.Н. Гидродинамические эффекты бегущей волны // Бионика.– 4.– 1979.– С. 19 – 24.
6. Меркулов В.И. О возможности невозмущающего движения тела в жидкости // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.– Вып. 2.– 1986.– С. 37 – 44.
7. Меркулов В.И. Управление движением жидкости.– Новосибирск: Наука, 1983.– 174 с.
8. Савченко Ю.Н., Козлов Л.Ф., Меркулов В.И. Влияние подогрева на гидродинамическое сопротивление пластины // Гидромеханика.– Вып. 29.– 1974.– С. 50 – 51.
9. Savchenko Yu.N. Some Special Cases of flows over bodies // Fluid Mechanics – Soviet Research.– vol. 211.– Jan. 1992.– С. 56 – 61.
10. Дубровский В.А. Исследование волнового сопротивления катамаран // Л.: Судостроение.– 7.– 1968.– С. 23 – 27.
11. Numata E. Predicting Hydrodynamic Behavior of Small – Waterline – Area Twin Hull Ships // Marine Technology.– vol. 18.– 1981.– С. 45 – 53.
12. Дубровский В.А. Многокорпусные суда // Л.: Судостроение.– 6.– 1978.– С. 31 – 37.
13. Leibenberg L., Bunt E.A. Wave drag coefficient of a model "Busemann biplane catamaran" // Experiments in fluid.– 9.– 1990.– С. 352 – 354.
14. Грейнер Л. Гидродинамика и энергетика подводных аппаратов // Л.: Судостроение.– 9.– 1978.– С. 153 – 157.
15. Петрова И.М. Гидробоники в судостроении // Л.: ЦНИИТЭИС.– 4.– 1970.– С. 272.
16. Девнин С.И. Аэродинамический расчет плохообтекаемых судовых конструкций // Л.: Судостроение.– 4.– 1967.– С. 22 – 24.
17. Павленко Г.Е. Сопротивление воды движению судов.– М.: Морской транспорт, 1956.– 508 с.
18. Меркулов В.И., Хотинская В.Д. Механизм уменьшения гидродинамического сопротивления у некоторых видов рыб // Бионика.– Вып. 3.– 1969.– С. 90 – 96.
19. Кобец Г.Б. О механизме влияния растворенных макромолекул на турбулентное трение // Бионика.– Вып. 3.– 1969.– С. 72 – 80.
20. Савченко Ю.Н., Пятацкий В.Е. О влиянии слизи на гидродинамическое сопротивление рыб // Бионика.– 3.– 1969.– С. 90 – 96.
21. Semenov V.N. The influence of the Elastic Coatings on the Turbulent Boundary Layer in Research in Control of the Boundary Layer // Novosibirsk.– 4.– 1976.– С. 92 – 101.
22. Korotkin A.L. Stability of the Laminar Boundary Layer in an Incompressible Fluid over an Elastic Surface // Izvestiya AN SSSR MJG.– 3.– 1966.– С. 39 – 44.
23. Voropaev G.A., Ptuha Yu.A. Modeling of Turbulent flows over Deformable Surfaces.– К: Naukova dumka, 1991.– 165 с.
24. Babenko V.V. Hydrobionics principles of drag reduction // High Seed Body Motion in Water.– AGARD, Rep. 827.– 1998.– С. 3.1 – 3.14.
25. Babenko V.V. Boundary layer on elastic plates.– К: Naukova dumka, 1996.– 264 с.
26. Babenko V.V. Problem of friction drag reduction in turbulent flows // Intern. Shipbuild. Conf.– St.-Petersburgh, Russia.– 8-12 Oct.1994.– С. 96 – 102.
27. McCormick M., Bhattacharyya R. Drag Reduction of a Submersible Hull by Electrolysis // Naval Engineers Journal.– 8.– April 1993.– С. 11 – 16.
28. Barbanel B.A., Bogdevich V.G., Maltsev L.I., Malyuga A.G. Some Practical Applications of Boundary Layer Control Theory.– St.-Petersburg: Malaxit, 1994.– 47 с.
29. Basin A.M., Korotkin A.I., Kozlov L.F. Control of Ship Boundary Layer // L.: Sodoostreniye.– 7.– 1968.– С. 492.
30. Савченко Ю.Н. О движении в воде на суперкавитационных режимах обтекания // Гидромеханика.– 70.– 1996.– С. 105 – 116.
31. Gabrielli Y., Von Karman Th. What price speed // Mechanical Engineering.– USA, Oct. 1950.– Т. 72, 10.– С. 775.
32. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами.– К.: Наук. думка, 1969.– 208 с.
33. Егоров И.Г., Садовников Ю.М., Исаев И.И. и др. Искусственная кавитация.– Л.: Судостроение, 1971.– 284 с.
34. Shlichting H. Theory of Boundary Layer.– М.: Наука, 1974.– 425 с.
35. Савченко Ю.Н., Меркулов В.И. О безотрывном обтекании тел малого удлинения // Гидродинамика больших скоростей.– Вып. 2.– 1966.– С. 129 – 138.
36. Van Dyke M. An Album of Fluid Motion the Parabolic Press.– Stanford: California, 1982.– 181 с.
37. Savchenko Yu., Korennaya L., Savchenko V. Skin friction drag with special vortex systems in boundary layer // Euromech Colloquium 327.– Effects of organized vortex motion on heat and mass transfer Book of abstracts.– 1994.– С. 59 – 61.
38. Essapian F.S. Speed – Induced skin folds in the bottle – nosed porpoise // Tursiops Teuncatus Breviora Mus. Compar. Zool.– 43.– 1955.– С. 123 – 134.
39. Желтухин И.Д. Газонасыщенный ПГС на пористой поверхности // Тр. ЦНИИ им. Крылова.– Вып. 219.– 1965.– С. 55 – 69.
40. Лойцянский Л.Г. Об изменении сопротивления тел путем заполнения погранслоя жидкостью с другими физическими константами // Прикл. математика и механика.– 6.– 1942.– С. 114 – 125.
41. Favre A.I. Contribution a letude experimentale des mouvements hydrodynamiques a deux dimensions // These Universite de Paris.– 10.– 1938.– С. 1 – 192.
42. Ивата А., Тада Е., Саи И. Экспериментальное и теоретическое исследование сверхпроводимости электромагнитного судового движителя // Тр. 5-го Симпозиума по судовым движителям.– Нидерланды.– 1983.– С. 2 – 3.