

УДК 629.127.001.11:532

ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДВОДНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ

Якимов В.А., Тарабан А.Ф.

На основе анализа интегрального соотношения количества движения Кармана рассмотрен комплексный способ управления пограничным слоем осесимметричного подводного аппарата, позволяющий оптимизировать суммарное сопротивление его движению путем трансформации сопротивления формы в силу тяги от давления на корпусе и повысить пропульсивные характеристики гидродинамической системы «корпус-двигатель».

Проблема освоения Мирового океана и совершенствование организации транспортных перевозок на море не могут решаться без разработки и эксплуатации подводных аппаратов различного назначения. Коммерческая целесообразность их использования определяется не только способностью выполнения поставленных задач с наибольшей экономичностью. В частности, давно рассматривается вопрос об использовании подводных аппаратов различного водоизмещения для транспортировки грузов, в первую очередь, жидких. Основные преимущества использования подводных аппаратов:

- удаление с оживленных морских транспортных коммуникаций потенциально опасных объектов – наливных танкеров;
- повышение безопасности мореплавания из-за снижения числа надводных объектов на морских транспортных коммуникациях;
- повышение экономичности перевозок вследствие снижения потребляемой мощности подводного транспорта по отношению к надводному.

Снижение суммарного сопротивления движущихся в воде аппаратов остается важнейшей задачей динамики корабля. Из теории корабля известно, что буксировочное сопротивление F_x для надводного и подводного судна определяется формулами

$$F_x = F_{x\tau} + F_{xp} + F_{x\text{ волн}},$$

$$F_x = F_{x\tau} + F_{xp},$$

причем, для надводного судна волновое сопротивление $F_{x\text{ волн}}$ имеет существенную величину (до 40% от общего сопротивления). Используя подводный транспорт, имеющий примерно одинаковое водоизмещение с надводным судном, можно существенно снизить мощность его энергетической установки для обеспечения заданной скорости хода.

Одним из важнейших показателей, определяющих целесообразность использования транспортного судна, является его экономичность, которая в значительной степени определяется двумя основными элементами ходкости судна: сопротивлением движению и эффективностью его двигателей.

Традиционное представление о капле как наиболее оптимальной с точки зрения общего сопротивления форме корпуса подводного аппарата основывается на обеспечении безотрывного обтекания кормы и минимального значения величины сопротивления формы F_{xp} такого тела при приоритетном вкладе сопротивления трения F_{xt} в общее сопротивление тела. Поэтому снижение сопротивления формы рассматривалось с точки зрения максимального восстановления давления в кормовой части тела с целью приближения его к потенциальным значениям. При этом величина сопротивления формы составляет 12...18% от общего сопротивления тела, а сопротивление трения – 78...85%.

Имеются разработки по значительному снижению сопротивления трения, однако в большинстве случаев они имеют более научный, чем практический характер, предполагают установку специальных систем или устройств на судне, и их постоянная эксплуатация экономически нецелесообразна. Однако имеется практическая возможность существенного снижения общего сопротивления движущегося в вязкой жидкости погруженного осесимметричного подводного аппарата, не требующая каких-либо специальных систем и устройств, основанная на оптимизации взаимодействия пограничного слоя (ПС), отбора жидкости из пограничного слоя и градиента давления в кормовой части тела, обусловленного формой его кормовой оконечности, и на этой основе оптимизировать параметры пропульсивной системы «корпус-двигатель» подводного аппарата.

Известное интегральное соотношение сохранения количества движения Кармана [1] для пограничного слоя у поверхности движущегося в вязкой жидкости осесимметричного тела при наличии отбора жидкости через его поверхность

$$\theta_2 \cdot U_\delta^2 = \int_{L_{ш}} r_w V_w U_\delta \cdot dx + \frac{1}{\rho} \cdot \int_0^L \frac{dP}{dx} \cdot \theta_1 \cdot dx + \frac{1}{\rho} \cdot \int_0^L \tau_w r_w dx \quad (1)$$

позволяет более детально разобраться с условиями формирования общего сопротивления тела.

В соотношении (1) приняты следующие обозначения:

$\theta_2 = \int_0^\delta U/U_\delta (1 - U/U_\delta) r dy$ – площадь потери количества движения (импульса); $r = r_w + y \cdot \cos \beta$ – радиус произвольной точки ПС; y – расстояние произвольной точки ПС от поверхности тела; β – угол между касательной к поверхности тела и осью его симметрии; U_δ – скорость жидкости на внешней границе ПС; r_w – местный радиус тела; V_w – скорость отбора жидкости из ПС; x – координата по обводу тела; $L_{ш}$ – длина щели отбора жидкости из ПС; U – скорость жидкости в ПС; ρ – плотность жидкости; L

– длина тела по обводу; P – давление на внешней границе ПС; τ_w – касательные напряжения на поверхности тела; $\theta_1 = \int_0^{\delta} (1 - U/U_{\delta}) r dy$ – площадь вытеснения.

В левой части (1) произведение $\theta_2 U_{\delta}^2$ характеризует потерянное в ПС количество движения, а слагаемые в правой части характеризуют составляющие этой потери:

$\int_{L_{ш}} r_w V_w U_{\delta} \cdot dx$ – учитывает влияние отбора или подачи жидкости в ПС

на потерю количества движения жидкости в ПС;

$\frac{1}{\rho} \cdot \int_0^L \tau_w r_w dx$ – учитывает влияние сил вязкости на потерю количе-

ства движения жидкости в ПС и пропорциональна сопротивлению трения;

$\frac{1}{\rho} \cdot \int_0^L \frac{dP}{dx} \cdot \theta_1 \cdot dx$ – учитывает влияние сил давления на потерю количе-

ства движения жидкости в ПС и пропорциональна сопротивлению формы.

Не останавливаясь на первых двух интегралах, рассмотрим подробнее влияние сил давления на общее сопротивление тела. Для снижения потери

количества движения интеграл $\frac{1}{\rho} \cdot \int_0^L \frac{dP}{dx} \cdot \theta_1 \cdot dx$ должен быть отрицатель-

ным. Из теории ПС известно, что толщина вытеснения θ_1 всегда положительна. Поэтому знак интеграла определяет знак градиента давления на поверхности тела. Для каплеобразного тела в носовой его части градиент дав-

ления отрицательный, интеграл $\frac{1}{\rho} \cdot \int_0^L \frac{dP}{dx} \cdot \theta_1 \cdot dx < 0$, но вследствие малости

θ_1 он имеет малую величину. В кормовой части градиент давления положительный и θ_1 существенна по величине, вследствие чего и интеграл

$\frac{1}{\rho} \cdot \int_0^L \frac{dP}{dx} \cdot \theta_1 \cdot dx > 0$ и имеет большую величину. Сумма интегралов от сил

давления на участках тела положительна и обуславливает рост потери количества движения жидкости в ПС и общего сопротивления тела. Следует отметить особенность изменения площади вытеснения θ_1 в ПС: на участках тела, где градиент давления положительный, площадь вытеснения начина-

ет интенсивно расти. Для тела традиционной формы этим участком является кормовая оконечность тела, и интеграл $\frac{1}{\rho} \cdot \int_0^L \frac{dP}{dx} \cdot \theta_1 \cdot dx$ увеличивает общую потерю количества движения жидкости в ПС и общее сопротивление тела. Однако это не в полной мере отражает влияние сил давления на формирование общего сопротивления тела. Представив распределение коэффициента давления на корпусе в координатах $\bar{P} - \bar{r}^2$ (рисунок 1), где $\bar{r}^2 = (r_W/r_{WMAX})^2$; $\bar{P}_{КП}, \bar{P}_{КР}, \bar{P}_{НП}, \bar{P}_{НР}$ – потенциальный и реальный коэффициент давления в корме и в носу тела; $Re_L = \frac{U_\infty \cdot L_1}{\nu}$ – число Рейнольдса для модели; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, можно выделить две области:

- область сопротивления, где давление в носу выше, чем давление в корме;
- область тяги, где давление в корме выше, чем в носу.

Для невязкой жидкости площади областей равны, и суммарная сила от давления равна нулю. Для вязкой жидкости площадь области сопротивления

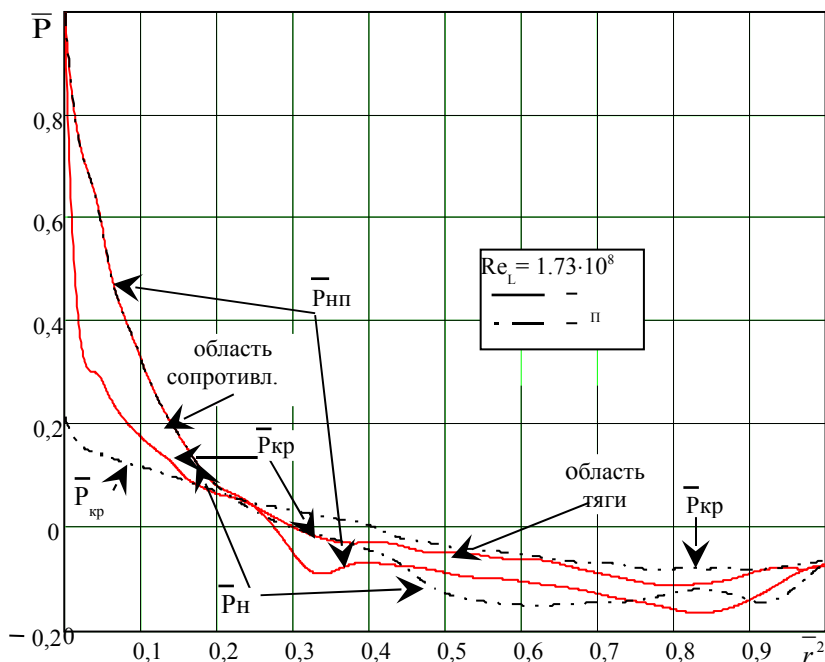


Рисунок 1 – Распределение потенциального и реального давления на модели «Акрон» [2]

больше, чем область тяги, и суммарная сила от давления является сопротивлением. Если в области сопротивления изменение давления в корме подчиняется потенциальному закону, то возможно в условиях обтекания тела вязкой жидкостью обеспечить превышение площади области тяги над площадью области сопротивления и не просто снизить до нуля сопротивление тяги, но и получить на корпусе силу тяги от давления. Следовательно, возможно снижение общего сопротивления полностью погруженного осесимметричного тела, движущегося в вязкой жидкости за счет двух факторов:

– снижения потери количества движения в пограничном слое измене-

нием знака интеграла $\frac{1}{\rho} \cdot \int_0^L \frac{dP}{dx} \cdot \theta_1 \cdot dx$ на отрицательный;

– обеспечением восстановления давления в корме в области сопротивления по закону, близкому к потенциальному.

Практически это реализуется следующим:

а) заменой конусообразной кормовой оконечности подводного аппарата длиной 4...5 максимальных диаметров выпукло-вогнутой кормовой оконечностью длиной до одного максимального диаметра, что позволяет обеспечить на ней отрицательный градиент давления;

б) оптимизацией отбора жидкости непосредственно перед кормовой оконечностью в области скачка давления от отрицательного к положительному при переходе от основного тела к кормовой оконечности, что позволяет обеспечить распределение давления на кормовой оконечности по закону, близкому к потенциальному, предотвратить существенный рост площади вытеснения и отрыв ПС;

в) размещением внутри кормовой оконечности рабочего колеса осевого насоса водометного движителя, обеспечивающего отбор жидкости из ПС и выброса ее в виде кормовой реактивной струи для обеспечения движения тела.

Это позволяет реализовать следующие факторы:

а) снизить общее сопротивление подводного аппарата по сравнению с буксировочным сопротивлением “голого корпуса” на 25...35%;

б) повысить полезное водоизмещение подводного аппарата на 15...18% без применения каких-либо специальных систем и устройств, а также без усложнения конструкции корпуса подводного осесимметричного аппарата;

в) оптимизировать гидромеханические характеристики водометного движителя подводного аппарата:

– приблизить параметры реактивной струи водометного движителя к параметрам окружающего потока за пределами пограничного слоя и реактивной струи;

– пропульсивный коэффициент реактивной струи водометного движителя

$$\eta_C = \frac{F_{XO} \cdot V_O}{N_C} \quad (2)$$

приблизить к единице. В соотношении (2) введены следующие параметры: F_{XO} – буксировочное сопротивление “голого корпуса” подводного аппарата; V_O – скорость движения подводного аппарата; $N_C = \rho g Q H_C$ – гидравлическая мощность реактивной струи водометного движителя; ρ – плотность воды; g – ускорение свободного падения; Q – расход воды через водометный движитель; H_C – гидродинамический напор в реактивной струе водометного движителя на выходе из сопла.

Библиография

1 Федяевский К.К. Расчёт турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости / К.К. Федяевский, И.М. Колесников, А.С. Гиневский. — Л., 1970. — С. 13–17.

2 Goldschmied F.R. On a least-energy hypothesis for the wake of axisymmetric bodies with turbulent separation: pressure distribution prediction / F.R. Goldschmied // AIAA 6th Appl. Conf., Williamsburg, Va, Sum. 6-8, 1998 y. Collect. pap. — Williamsburg, 1998. — P. 27–39.

Поступила в редакцию 1.03.2001 г.