

УДК 629.127.001.11:532

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЛА ПРИ ЩЕЛЕВОМ ОТСОСЕ

Г. А. ВОРОПАЕВ*, А. Ф. ТАРАБАН**

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

**СВМИ им. П.С. Нахимова, Севастополь

Получено 10.12.2002

Экспериментально определено распределение статического давления на поверхности тела вращения, а также полное и статическое давление в сечении на срезе сопла при различных величинах отсоса жидкости. На основании интегрального уравнения Кармана сделана оценка влияния величины отсоса и формы кормового обвода на гидродинамическое сопротивление тела вращения. Предложен способ снижения гидродинамического сопротивления воды движению осесимметричного тела в вязкой жидкости, позволяющий существенно снизить потерю количества движения вязкой жидкости за счет взаимодействия пограничного слоя, отбора жидкости и формы кормовой оконечности корпуса, и условия его реализации.

Експериментально визначено розподіл статичного тиску на поверхні осесиметричного тіла, а також повного статичного тиску в перерізі на зрізі сопла при різних значеннях відбору рідини. На основі інтегрального рівняння Кармана зроблено оцінку впливу величини відбору рідини та форми кормової частини на гідродинамічний опір осесиметричного тіла. Запропоновано спосіб зниження гідродинамічного опору води руху осесиметричного тіла у в'язкій рідині, який дозволяє суттєво знизити втрати кількості руху в'язкої рідини за рахунок взаємодії пограничного шару, відбору рідини та форми кормової частини корпусу, і умов його реалізації.

Distribution of static pressure on the surface of a body of revolution has been measured experimentally, as well as full and static pressure in a cross section of a nozzle, at varied suction. On the basis of the integral Karman equation, influence of suction amount and the shape of rear part on hydrodynamic drag of the body has been estimated. Has been proposed a method of hydrodynamic drag reduction of water when a body of revolution moves in viscous fluid, that allows for essential reduction of momentum loss for account of boundary-layer interaction, fluid extraction and the shape of rear part, and its implementation.

ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований по снижению общего сопротивления осесимметричных тел, обтекаемых потоком вязкой жидкости, позволяют говорить о возможности значительного его уменьшения. К сожалению, для реальных объектов (подводные транспорты, подводные аппараты) использовать разработанные методы снижения сопротивления трения в большинстве случаев не целесообразно, так как для их реализации необходимо предусмотреть специальные системы (например, отсоса жидкости из пограничного слоя (ПС), вдува жидкости в ПС, ввода полимерных добавок и др.), что ведет к снижению полезного водоизмещения, дополнительным энергозатратам и требует размещения соответствующих систем. Оптимальное решение данного вопроса заключается в разработке метода снижения сопротивления осесимметричного тела, не требующего использования сложных специальных систем для его реализации. В статье представлены результаты экспериментальных исследований по снижению общего сопротивления тел вращения за счет управления пограничным слоем на кормовой части тела при

согласованном щелевом отборе жидкости и соответствующего выбора формы кормовой оконечности.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для анализа величины гидродинамического сопротивления тел, движущихся в вязкой несжимаемой среде, и его составляющих — сопротивления трения и сопротивления формы (давления) — применяется интегральное уравнение сохранения количества движения Кармана [1].

При обтекании осесимметричного тела потоком вязкой жидкости (рис. 1) это интегральное соотношение вдоль образующей контура тела имеет вид

$$\frac{d}{dx} [\theta_2 U_\delta^2] = r_w V_w U_\delta + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} \theta_1 + r_w \frac{\tau_w}{\rho}, \quad (1)$$

где $U_\delta(x)$ — скорость жидкости на внешней границе ПС; θ_1, θ_2 — площади вытеснения и потери импульса соответственно; V_w — нормальная скорость отбора (вдува) жидкости из (в) ПС через поверхность тела; τ_w — напряжение трения на поверхности тела; r_w — радиус тела.

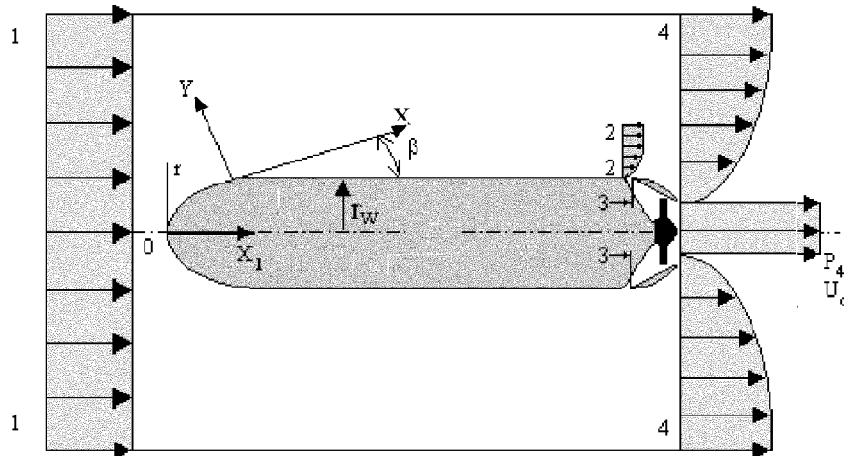


Рис. 1. Системы координат и схема движения осесимметричного тела в вязкой жидкости

Интегрирование (1) вдоль поверхности тела дает потерянное в ПС количество движения:

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

где $\int_{L_s} r_w V_w U_\delta dx$ – составляющая потери количества движения за счет отбора или подачи жидкости в ПС, $\frac{1}{\rho} \int_0^L \tau_w r_w dx$ – за счет вязкости,

$\frac{1}{\rho} \int_0^L \frac{dP}{dx} \theta_1 dx$ – влияние сил давления на потерю количества движения; L – длина контура обвода; L_s – ширина щели отбора.

Соотношение (2) определяет несколько направлений уменьшения потери количества движения жидкости в пограничном слое при обтекании тела потоком вязкой жидкости:

– отбор ($V_w < 0$) жидкости из ПС без изменения режима течения;

– изменение касательных напряжений на поверхности тела;

– управление распределением давления на поверхности и площадью вытеснения вдоль обвода тела.

В основу комбинированного способа снижения сопротивления воды движению осесимметричного тела положено управление пограничным слоем, формирующимся на поверхности тела, при отборе жидкости из пограничного слоя, и изменения градиента давления в кормовой части тела, обусловленного формой поверхности кормовой оконечно-

сти осесимметричного тела. Основное внимание при этом уделяется анализу формирования и спо-

собу снижения составляющей $\frac{1}{\rho} \int_0^L \frac{dP}{dx} \theta_1 dx$ в соот-

ношении (2). При формировании пограничного слоя на обтекаемой поверхности без управления ПС площадь вытеснения θ_1 положительна и растет вдоль обвода [2]. Поэтому знак произведения

$\frac{dP}{dx} \theta_1$ и величина интеграла $\frac{1}{\rho} \int_0^L \frac{dP}{dx} \theta_1 dx$ опреде-

ляются градиентом давления. Осесимметричное тело по характеру изменения градиента давления можно условно разбить на три части: носовую,

где $\frac{dP}{dx} < 0$; среднюю, где $\frac{dP}{dx} \approx 0$; кормовую,

где $\frac{dP}{dx} > 0$. В носовой части тела, где градиент давления большой и отрицательный по величине, но площадь вытеснения ничтожно мала, интеграл

$\frac{1}{\rho} \int_0^{L_n} \frac{dP}{dx} \theta_1 dx < 0$ и мал по величине. В средней части вследствие равенства нулю градиента давле-

ния интеграл $\frac{1}{\rho} \int_{L_n}^{L_k} \frac{dP}{dx} \theta_1 dx$ также равен нулю. В

кормовой части тела, где градиент давления большой и положительный по величине и площадь вы-

теснения велика, интеграл $\frac{1}{\rho} \int_{L_k}^L \frac{dP}{dx} \theta_1 dx > 0$ и до-

стигает значительной величины (L_n и L_k – рас-

стояние по обводу тела от передней критической

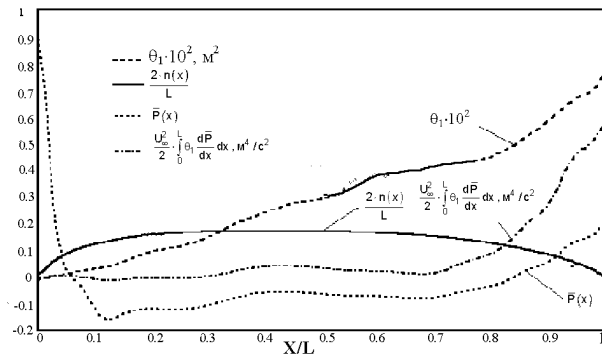


Рис. 2. Распределения давления и интегральных параметров ПС на выпуклом обводе

точки до начала цилиндрической части корпуса и до начала кормовой оконечности, соответственно).

Таким образом, основной вклад в $\frac{1}{\rho} \int_0^L \frac{dP}{dx} \theta_1 dx$

вносит кормовая оконечность тела. Резкое возрастание площади вытеснения в кормовой части тела с традиционными обводами объясняется развитием ПС в условиях положительного градиента давления, что соответствует телам с традиционными обводами (рис. 2)[3]. Следовательно, и снижение общего сопротивления возможно путем изменения распределения давления на кормовом обводе.

Для осесимметричных тел, кормовые оконечности которых имеют выпукло-вогнутую форму, в районе перехода основного тела в выпукло-вогнутую кормовую оконечность происходит восстановление давления, а затем на вогнутой части кормовой оконечности давление падает и пограничный слой развивается в условиях отрицательного градиента давления (рис. 3)[4].

В соответствии с характером изменения давления изменяются площадь вытеснения θ_1 и $\int \frac{dp}{dx} \theta_1 dx$ в кормовой части тела: в области восстановления давления величины θ_1 и $\int \frac{dp}{dx} \theta_1 dx$ возрастают, а далее на вогнутой части кормы их значения уменьшаются, что приводит к уменьшению потери количества движения жидкости в пограничном слое, т. е. к снижению общего сопротивления тела.

Характер распределения площади вытеснения θ_1 и интеграла $\int \frac{dp}{dx} \theta_1 dx$ на выпукло-вогнутой корме (см. рис. 3) показывают, что изменение знака градиента давления и его величины при переходе от основного тела к выпукло-вогнутой корме

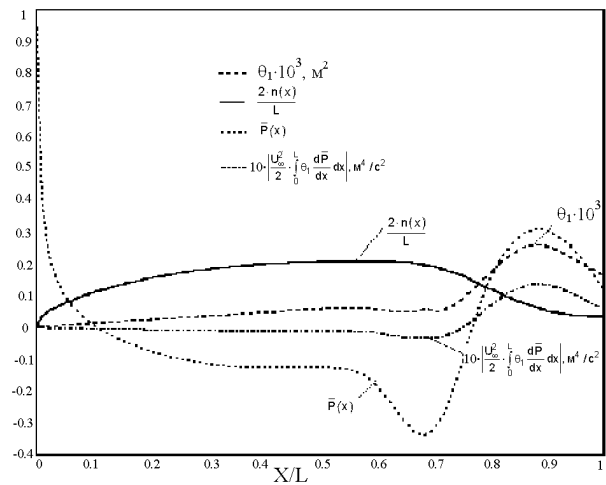


Рис. 3. Распределение давления и интегральных параметров ПС на выпукло-вогнутом обводе

происходит на коротком по протяженности участке корпуса и положительный градиент давления при этом имеет существенную величину, что может привести к отрыву пограничного слоя. Поэтому должны быть предусмотрены меры по предотвращению отрыва пограничного слоя. Наиболее легко реализуемым способом предотвращения отрыва является отбор жидкости из пограничного слоя, который также способствует снижению потери количества движения жидкости в ПС. Это является аргументом в его пользу при выборе способа предотвращения отрыва ПС.

Сопротивление формы при обтекании тел реальной жидкостью определяется перепадом давления между носовой и кормовой оконечностями, вызванным снижением давления в кормовой части из-за действия сил вязкости в жидкости (см. рис. 2).

Сопротивление формы тела определяется как интеграл от проекции нормальных напряжений на поверхности тела на направление движения:

$$F_x = 2\pi\rho \frac{U_\infty^2}{2} \int_0^L \bar{P} r \frac{dr}{dx_1} dx_1. \quad (3)$$

Таким образом, снижение сопротивления формы может достигаться максимальным восстановлением давления в кормовой части тела, где $\frac{dr}{dx} < 0$, и предотвращением отрыва ПС в этой области. Для этого осесимметричное тело должно быть большого удлинения $L/D = 8 \div 14$ и иметь достаточно протяженную, конусообразную кормовую оконечность $L_k/D = 4 \div 6$ с плавными изменениями кривизны обводов в носовой и кормовой

части [5].

Для таких тел при безотрывном обтекании распределение давления в кормовой части тела близко к значениям давления при обтекании его невязкой жидкостью.

Для тел вращения традиционных отводов с относительно длинной кормовой оконечностью $L_k/D = 4 \div 6$ конусообразной формы распределение давления в корме имеет небольшой положительный градиент давления, что позволяет ПС преодолевать его практически по всей длине кормы без отрыва (см. рис. 2). Но, тем не менее, положительный градиент давления приводит к возрастанию общего сопротивления тела.

Уменьшить влияние вязкости на распределение давления в корме можно за счет отбора жидкости из ПС и выбора такой длины кормы за местом отбора, чтобы влияние отбора было эффективным по всей длине кормы. Установлено [6], что для тел вращения эффективное влияние отбора жидкости распространяется на расстояние за местом отбора, не превышающее максимального диаметра тела. Для тел с традиционной кормовой оконечностью восстановление давления до потенциальных значений за счет одиночного дискретного отбора невозможно, а за счет распределенного отбора по длине не целесообразно с точки зрения гидродинамической эффективности движителя, так как в этом случае потери энергии на обеспечение отбора жидкости из ПС могут быть не меньшими, чем энергетический выигрыш от снижения сопротивления формы. Поэтому отбор жидкости должен быть дискретным, длина кормовой оконечности за местом отбора не должна превышать диаметра цилиндрической части корпуса.

Таким образом, суть комбинированного способа снижения сопротивления воды движению осесимметричного тела состоит в сочетании дискретного отсоса жидкости перед кормой и выпукловогнутой поверхности кормового обвода.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальную проверку предложенного способа снижения общего сопротивления осуществляли на модели тела вращения диаметром 0.14 м и относительным удлинением $L/D = 8$ в гидродинамической трубе квадратного сечения площадью 0.16 м² при числах Рейнольдса $Re_L = LU_\infty/\nu = 6 \cdot 10^6$. Кормовая оконечность модели представлена на рис. 4.

Измеряли величину давления на поверхности тела вращения, а также полное и статическое давле-



Рис. 4. Кормовая оконечность экспериментальной модели

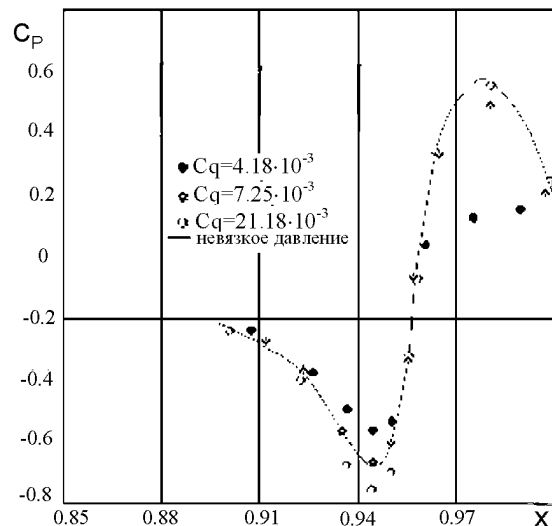
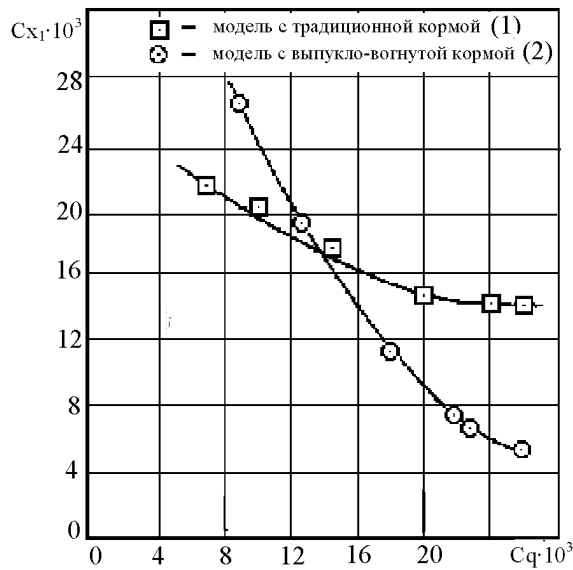
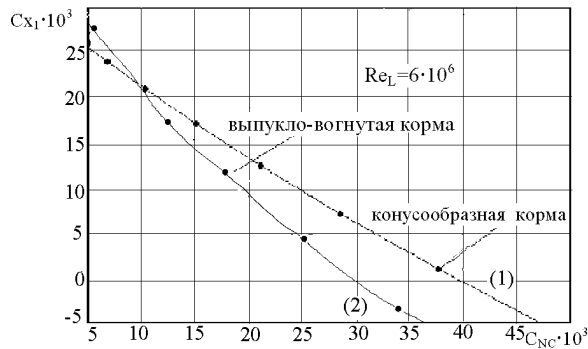


Рис. 5. Распределение давления на выпукловогнутой кормовой оконечности модели при отборе жидкости из пограничного слоя

ние на срезе сопла при различных расходах через щель. На рис. 5 представлен коэффициент давления $C_p = \frac{P - P_0}{1/2 \rho U_0^2}$ по длине кормы при потенциальном обтекании кормы, а также при трех значениях расхода.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. При толщине отбора жидкости, приблизительно соответствующей толщине вытеснения ($\delta^* = 3.45 \cdot 10^{-3}$ м, $Cq = Q/(U_\infty V^{2/3}) = 7.25 \cdot 10^{-3}$), распределение давления на корме соответствует распределению давления при обтекании кормы невязкой жидкостью [7]. При малых расходах ($Cq = 4.18 \cdot 10^{-3}$) распределение давления существенно отличается от не-


 Рис. 6. Зависимость Cx_1 от параметров отбора

 Рис. 7. Экспериментальные зависимости Cx_1 от C_{NC} для модели

вязкого, особенно в корме. При больших расходах ($Cq = 21.18 \cdot 10^{-3}$) распределение давления за щелью отбора совпадает с невязким, но отличается над щелью.

На рис. 6 представлены экспериментальные зависимости коэффициента сопротивления по следу Cx_1 , определенного по измерениям в пограничном слое на кромке сопла, для моделей с традиционной конусообразной и с выпукло-вогнутой кормой и вычисленного по формуле Джонса [2]

$$Cx_1 = \frac{2}{V^{2/3}} \int_{S_c} \sqrt{\overline{P^*} - \overline{P}} (1 - \sqrt{\overline{P^*}}) dS, \quad (4)$$

где $\overline{P^*}, \overline{P}$ – коэффициент полного и статического давления на кромке сопла; S_c – площадь следа на кромке сопла. Видно, что для нетрадиционной

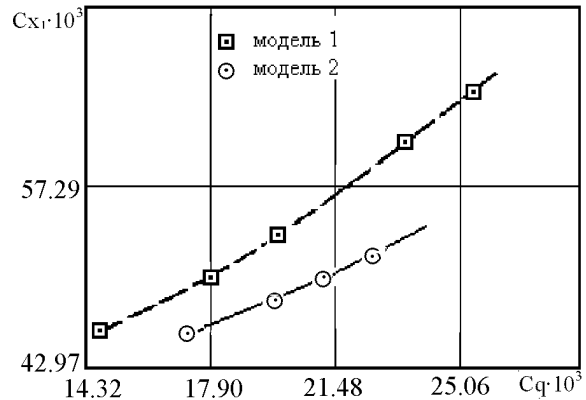


Рис. 8. Сравнительная характеристика коэффициента сопротивления для моделей с традиционной (N 1) и выпукло-вогнутой (N 2) кормовой оконечностью

выпукло-вогнутой кормы значение коэффициента сопротивления по следу почти в три раза меньше, нежели для модели с традиционной кормой.

Экспериментальные зависимости коэффициента общего сопротивления от коэффициента мощности струи $C_{NC} = Cq \cdot \overline{H}_{4C}$ (здесь \overline{H}_{4C} – коэффициент полного напора струи) для моделей с различной геометрией кормы приведены на рис. 7. Из результатов эксперимента следует, что установившийся режим обтекания модели (для $Cx_1 = 0$) для модели с выпукло-вогнутой кормой наступает при значениях коэффициента мощности струи на 22.8% меньше, чем для модели с традиционной конусообразной кормой. Характер зависимости $Cx_1 = f(C_{NC})$ для модели с выпукло-вогнутой кормой свидетельствует о существенном снижении сопротивления модели при отборе жидкости из ПС по сравнению с моделью, имеющей традиционную корму.

На рис. 8 представлены зависимости суммарного сопротивления по следу и стоку от коэффициента отбора жидкости для моделей с традиционной и выпукло-вогнутой кормой, полученные по результатам экспериментальных исследований в гидродинамической трубе. По данным эксперимента следует, что для модели с выпукло-вогнутой кормой эта величина примерно на 22 ÷ 25% меньше, чем для модели с традиционной кормой во всем диапазоне расходов. Экспериментальные зависимости на рис. 6 – 8 служат подтверждением реализации предложенного способа снижения общего сопротивления для тела с выпукло-вогнутой кормой.

В процессе экспериментальных исследований выделена составляющая, соответствующая сопро-

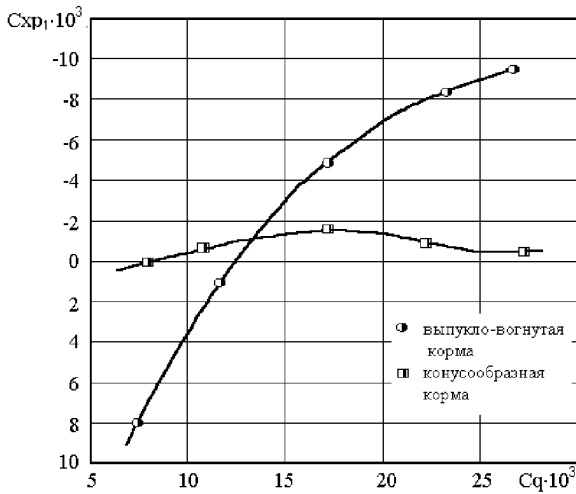


Рис. 9. Зависимость коэффициента C_{xP1} от геометрии кормовой оконечности и параметров отбора жидкости

тивлению формы в условиях реализации предложенного способа снижения общего сопротивления, коэффициент которой определялся по формуле

$$C_{XP1} = C_{xs} + Cq \cdot (1 - \overline{P}_2^*) - C_{x\tau_1}, \quad (5)$$

где \overline{P}_2^* – средний по расходу коэффициент полного давления в сечении перед отборной щелью, определяемый по формуле

$$\overline{P}_2^* = \frac{P_2^* - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} = \frac{\frac{2\pi}{Qc} \int_0^{Y_2} \left(P_2 + \frac{\rho U^2}{2} \right) U r dy - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2}. \quad (6)$$

Представленные на рис. 9 экспериментальные зависимости $C_{XP1} = C_{XP1}(Cq)$ для моделей с конусообразной и выпукло-вогнутой кормой показывают, что при реализации комбинированного способа снижения общего сопротивления имеет место существенное снижение общего сопротивления за счет трансформации сопротивления формы в "тягу от давления". При расходах, соответствующих установившемуся режиму обтекания модели ($Cq = 0.0228$), коэффициент силы от давления оценивается величиной $C_{XP1} = -0.0086$ и составляет 35% от сопротивления трения модели, равного $C_{x\tau_1} = 0.0245$. В то же время, для модели с традиционной конусообразной кормой данный коэффициент оценивается значением $C_{XP1} = -0.0008$ или на порядок меньше, чем при реализации комбинированного способа снижения общего сопротивления.

Для оценки гидродинамической эффективности данного способа использован пропульсивный коэффициент струи

$$\eta_C = \frac{C_{x0}}{C_{NC}}, \quad (7)$$

где $C_{x0} \approx 0.03$ – средний коэффициент буксировочного сопротивления хорошо обтекаемой модели, а C_{NC} – коэффициент мощности струи при $C_{x1} = 0$. Для модели с традиционной кормой пропульсивный коэффициент струи (рис. 7) оценивается величиной $\eta_C = 0.79$, а для модели с выпукло-вогнутой кормой – величиной $\eta_C = 0.98$.

ВЫВОДЫ

Представленные экспериментальные результаты по исследованию комбинированного способа снижения общего сопротивления воды движению на маломасштабной модели осесимметричного тела прогнозируют снижение общего сопротивления при реализации данного способа не менее чем на 22% без существенного усложнения конструкции осесимметричного подводного аппарата и повышение пропульсивных качеств гидродинамической системы "корпус-двигатель" на величину не менее 20% по сравнению с осесимметричным телом, имеющим традиционную конусообразную корму.

1. Федяевский К. К., Колесников И. М., Гиневский А. С. Расчёт турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости // Л.- Судостроение, 1970.– С. 13–17.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.– М.: Наука, 1969.– 758 с.
3. Goldschmied F.R. On a least-energy hypothesis for the wake of axisymmetric bodies with turbulent separation: pressure distribution prediction // AAIA 6th Appl. Conf., Williamsburg, Va, Sum.6–8.– 1998, Collect. pap.– P. 27–39.
4. Parsons J.S., Goodson R.E., Goldschmied F.R. Shaping of axisymmetric bodies for minimum drag in incompressible flow // J.:Hydroautics.– 1974, 8, N 3.– P. 100–107.
5. Грейнер Л. Гидродинамика и энергетика подводных аппаратов // Л.- Судостроение, 1978.– С. 54–159.
6. Куликов С.В., Хражкин С.И. Водометные двигатели.– Л.: Судостроение, 1980.– 380 с.
7. Воропаев Г. А., Птуха Ю. А. Моделирование турбулентных сложных течений.– К.: Наукова думка, 1991.– 168 с.