

УДК 629.12.037.21

О ВЫБОРЕ ПРОФИЛЯ РУЛЕВОГО КОМПЛЕКСА СУДНА

В. В. БАБИЙ *, В. В. МОРОЗ **

* Центральное конструкторское бюро "Шхуна", Киев

** Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 21.02.2000

Приводятся результаты исследований по определению влияния формы профиля рулевого комплекса на его эффективность. Исследования проводились путем модельного эксперимента в гидродинамической трубе. Объектом исследований был рулевой комплекс, содержащий полубалансирный руль за кронштейном. Модель позволяла при неизменной форме пера руля устанавливать кронштейны с различными профилями. На основе анализа формы корпуса пингвинов разработан и испытан профиль кронштейна рулевого комплекса, обеспечивающий более высокую по сравнению с традиционными профилями эффективность всего рулевого комплекса в широком диапазоне углов атаки.

Наведені результати досліджень впливу форми профілю рулевого комплексу на його ефективність. Дослідження проводилися шляхом модельного експерименту в гідродинамічній трубі. Об'єктом досліджень було вибрано рульовий комплекс, утворений напівбаланси́рним рулем і кронштейном. Модель дозволяла при сталій формі руля встановлювати кронштейни з різними профілями. Шляхом аналізу форми корпусу пінгвінів розроблено і досліджено профіль кронштейна рулевого комплексу, який забезпечує більш високу в порівнянні з традиційними профілями ефективність всього рулевого комплексу в широкому діапазоні кутів атаки.

The outcomes of researches on definition of influence of the profile shape of a control complex on its efficiency are resulted. The researches were conducted by a model experiment in a hydrodynamic tunnel. Object of researches was a control complex inclusive semi-balanced rudder behind a bracket. The model allowed at the invariable shape of a rudder blade to establish brackets with a different profiles. On the basis of the analysis of the penguin body share the bracket profile of a rudder complex ensuring higher as contrasted to by conventional profiles efficiency of all control complex in a broad band of angles of attack is designed and tested.

ВВЕДЕНИЕ

Судовой руль является важным элементом движительно-рулевого комплекса [1]. Общее число модификаций рулей насчитывает многие десятки, однако по способу создания на них подъемной силы все рули могут быть разделены на три типа (рис. 1) [2]: а) - полностью подвижные (баланси́рные) рули, подъемная сила на которых развивается за счет изменения собственных углов атаки руля; б) - рули за рудерпостом, подъемная сила на которых развивается за счет изменения кривизны профиля "перо руля + рудерпост"; в) - полубалансирные рули за кронштейном, представляющие собой комбинацию двух предыдущих типов рулей.

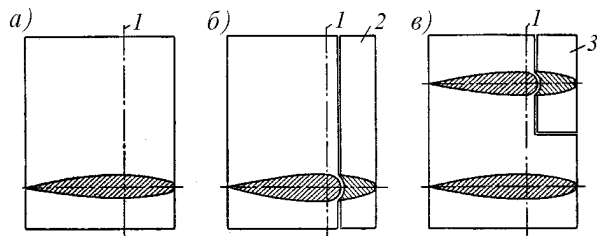


Рис. 1. Типы рулей: а - баланси́рный руль; б - руль за рудерпостом; в - полубалансирный руль за кронштейном; 1 - ось вращения; 2 - рудерпост; 3 - кронштейн

Общим требованием при выборе элементов рулевого устройства является необходимость обеспечения максимальной подъемной силы во всем диапазоне углов перекаладки при минимальных значениях крутящего момента.

Для оценки эффективности того или иного варианта рулевого устройства существуют комплексные критерии эффективности [1], однако чаще всего в качестве сравнительного критерия эффективности рулевого устройства используется производная коэффициента подъемной силы по углу перекаладки ($\partial C_y / \partial \alpha$). Желание получить высокую эффективность руля вынуждает применять рули большого удлинения ($\lambda \geq 2$), однако они имеют малый критический угол атаки (угол при котором происходит отрыв потока). Уменьшение же удлинения приводит к снижению крутизны зависимости коэффициента подъемной силы от угла перекаладки, и тем самым - к снижению эффективности руля.

Полностью подвижные рули отличаются простотой, обладают высокой эффективностью, но имеют малый критический угол атаки. В то же время применение рудерпоста (или кронштейна) несколько усложняет конструкцию, но приводит к стабилизации потока, набегающего на руль, и тем самым отделяет кризис обтекания руля. В практике судостроения в качестве формообразую-

сих профілей найбільше розповсюдження получили симметричні профілі NACA, максимальна товщина у яких розположена на 0,30 довжини хорди від носика. Для побудови симметричного профіля NACA будь-яких розмірів по заданим найбільшій товщині і довжині хорди використовується формула [2]

$$\delta = \pm t_{max} [1,4845 \sqrt{\frac{x}{b}} - 0,63 \frac{x}{b} - 1,758 (\frac{x}{b})^2 + 1,4215 (\frac{x}{b})^3 - 0,5075 (\frac{x}{b})^4];$$

де b - довжина хорди; t_{max} - найбільша товщина профіля; x - абсциси профіля; δ - ординати по товщині профіля.

Радіус носика профіля знаходиться по формулі

$$R = 1,10 \frac{(t_{max})^2}{b}.$$

Профіль рудерпоста або кронштейна визначається відповідним діленням загального формообразуючого профіля на складові частини ("руль+рудерпост" або "руль+кронштейн").

Крім цього, відомі і інші спроби створення на базі крильов великого удлиннения рулевих комплексів, у яких відсутній відрив потоку до кутів атаки 30...35°. Профілі деяких з них 1

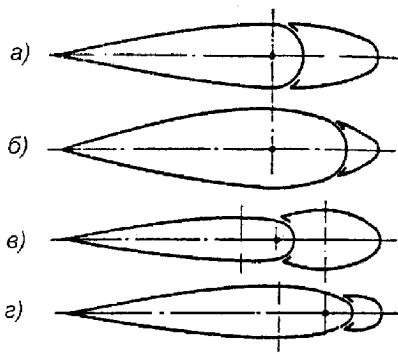


Рис. 2. Профілі рулевих комплексів "руль + рудерпост": а) - профіль Эрц; б) - профіль Зеебек; в) - профіль Зеебек-Эрц; г) - профіль Гамбургского опытового бассейна

Отрыв потока на этих рулях не происходит благодаря специально подобранной профилировке рудерпоста - при больших углах перекладки засасывающая сторона профіля руля сохраняет свой плавный контур. Кроме этого, применение широкого рудерпоста способствует также снижению момента на баллере из зависимости коэффициента подъемной силы для рулей некоторых типов удлиннением $\lambda = 2$ (рис. 3) следует, что наибольшей эффективностью обладает пластинчатый руль с

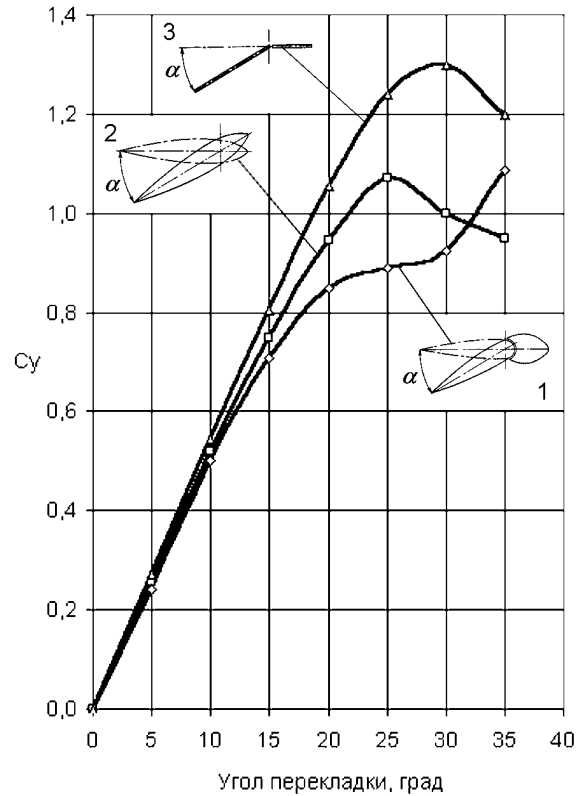


Рис. 3. Гидродинамические характеристики некоторых типов рулевых комплексов: (здесь a - относительная ширина рудерпоста) 1 - руль Зеебек-Эрц, $a = 0,33l$; 2 - балансирный руль, $a = 0,22l$; 3 - пластинчатый руль с рудерпостом, $a = 0,33l$.

рудерпостом, однако коэффициент момента на баллере у него тоже наибольший. Профилированные рули имеют меньший коэффициент момента на баллере, но и эффективность их тоже ниже. Кроме этого, рули с развитым рудерпостом (кронштейном) имеют одну негативную особенность в зависимости коэффициента подъемной силы от угла атаки - при угле атаки в 20...25° график зависимости коэффициента подъемной силы от угла атаки имеет перегиб, причем с тенденцией к снижению коэффициента подъемной силы. Причина этого явления кроется в том, что существует разрыв поверхности формообразующего профіля, обусловленный переходом от поверхности рудерпоста (кронштейна) к поверхности пера руля. В этом месте в пограничном слое возникают сильные возмущения, которые и приводят к образованию локального отрыва потока. В практике судостроения для устранения этого явления рекомендуется применять короткие рудерпосты (кронштейны) с относительной длиной не более 20 % от длины хорды формообразующего профіля. В этом

случае возникающие на переходе "рудерпост-перо руля" возмущения гасятся отрицательным градиентом давления на поверхности пера руля. Однако при этом существенно возрастает коэффициент момента на баллере.

Из гидробионики известно [3], что в поисках оптимальной формы профиля обстоятельно обследованы обводы различных морских и пресноводных рыб и морских млекопитающих. В результате создано несколько хорошо обтекаемых ламинаризованных профилей. Это так называемые профили NASA: серия профилей NASA-63 близка к форме туловища форели, серии NASA-66 и NASA-67 - соответственно форме тела дельфина и тунца. Основным отличием этих профилей от стандартных профилей NASA является то, что форма носовой оконечности делается менее полной, а сечение максимальной толщины сдвигается в сторону кормы.

Представляет также интерес результаты работы Баннаша Р. [4] по изучению гидродинамики плавания пингвинов. В частности, на основе анализа геометрических характеристик пингвинов различных видов им был построен эквивалентный корпус пингвина (рис. 4).

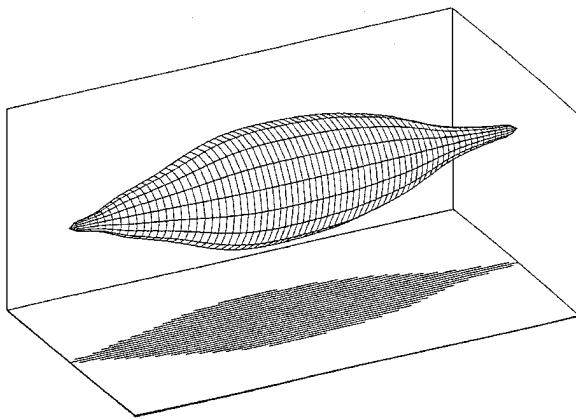


Рис. 4. Форма корпуса осесимметричной модели пингвина

Особенностью профиля корпуса пингвина является то, что его носовая оконечность образована не монотонно возрастающей формообразующей линией, а наоборот - имеет несколько участков (по крайней мере два) резкого увеличения площади поперечного сечения. Исследуя параметры течения в пограничном слое на модели пингвина, Баннаш показал, что на этих участках происходит уплотнение пограничного слоя, которое приводит если не к полной ламинаризации погранич-

ного слоя, то, по крайней мере, к значительному увеличению протяженности зоны ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое. В результате наблюдается снижение общего сопротивления воды движению пингвина. Этот механизм ламинаризации пограничного слоя представляется интересным для использования в рулевых комплексах с целью предотвращения отрыва потока на переходе "рудерпост - перо руля".

В настоящей работе изложены результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение принципиальных возможностей построения рулевого устройства с рудерпостом (кронштейном) на основе крыльев большого удлинения, которые имели бы крутой подъем коэффициента подъемной силы от угла атаки и критический угол атаки более 35° .

ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования проводились в малой гидродинамической трубе отдела гидробионики и управления пограничным слоем ИГМ НАН Украины [4]. Для исследований была изготовлена модель полубалансирного руля за кронштейном, общая схема которого показана на рис.5.

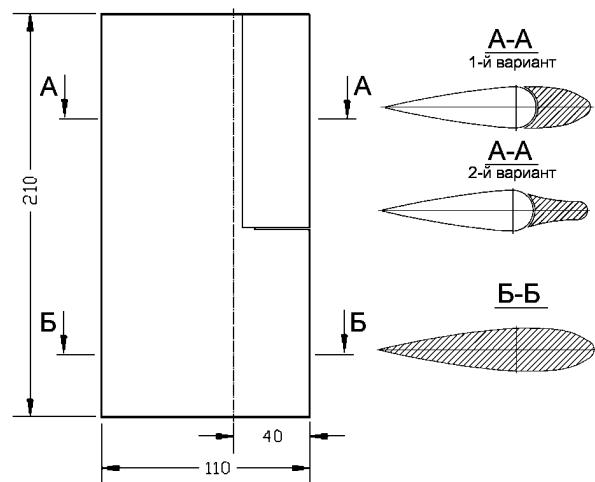


Рис. 5. Общая схема модели полубалансирного руля за кронштейном

Основным формообразующим профилем элементов рулевого комплекса был выбран профиль NASA0020. Ось вращения руля была расположена на $0,364$ длины хорды от носика профиля. Модель позволяла при неизменной форме пера руля устанавливать различные виды взаимозаменяемых кронштейнов, которых было изготовлено два

варианта. Формообразующим профилем первого варианта кронштейна был профиль *NACA0020*. В соответствии с этим носовая кромка профиля кронштейна была образована радиусом ≈ 5 мм, а расположенная за кронштейном часть профиля пера руля - радиусом ≈ 11 мм. Межцентровое расстояние при этом составляло около 35 мм. Схема построения формообразующего профиля второго варианта кронштейна приведена на рис. 6.

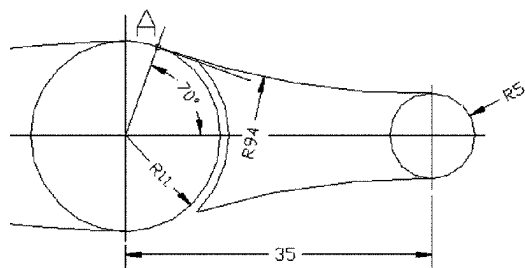


Рис. 6. Схема построения профиля кронштейна

Суть трансформации состоит в том, что пограничный слой, образующийся на кронштейне, все время поджимается, причем, тем интенсивнее, чем ближе он находится к месту перехода "кронштейн - перо руля".

Во втором варианте радиусы формообразующих окружностей носовых частей пера руля и кронштейна, а также их межцентровое расстояние полностью сохранены. Обе эти окружности сопряжены между собой по радиусу таким образом, что касательная в точке притыкания ("А") сопрягающей дуги к формообразующей окружности носовой части пера руля находится под углом 70° к продольной оси руля. Таким образом, мы имеем кронштейн, носик которого образован окружностью радиусом ≈ 5 мм, а основное тело представляет собой расширяющийся участок по дуге сопрягающего радиуса, кормовая кромка которого выходит на касательную к точке "А".

Была разработана и смонтирована специальная платформа, которая позволяла размещать модель руля в средней части рабочего участка гидродинамической трубы. Здесь же на платформе был закреплен тензометрический динамометр, который позволял регистрировать действующие на руль гидродинамические силы. Скорость потока воды в гидродинамической трубе во время опытов устанавливалась на отметке 2 м/с, что при температуре воды 14°C составило число Рейнольдса, вычисленное по средней хорде пера руля, $1,7 \cdot 10^5$. Коэффициенты гидродинамических сил, действующих на модель руля, определялись традиционным путем. В частности, коэффициент подъемной силы

определялся следующим образом:

$$C_y = \frac{2P_y}{\rho v^2 A_R},$$

где P_y - измеренная подъемная сила; ρ - массовая плотность воды; v - скорость потока воды в гидродинамической трубе; A_R - площадь пера руля в плане.

В результате проведения серии опытов строились графические зависимости коэффициента подъемной силы от угла перекадки руля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В первую очередь была проведена серия экспериментов по определению коэффициента подъемной силы модели руля, на которой был установлен первый вариант кронштейна. Результаты измерений приведены на рис. 7.

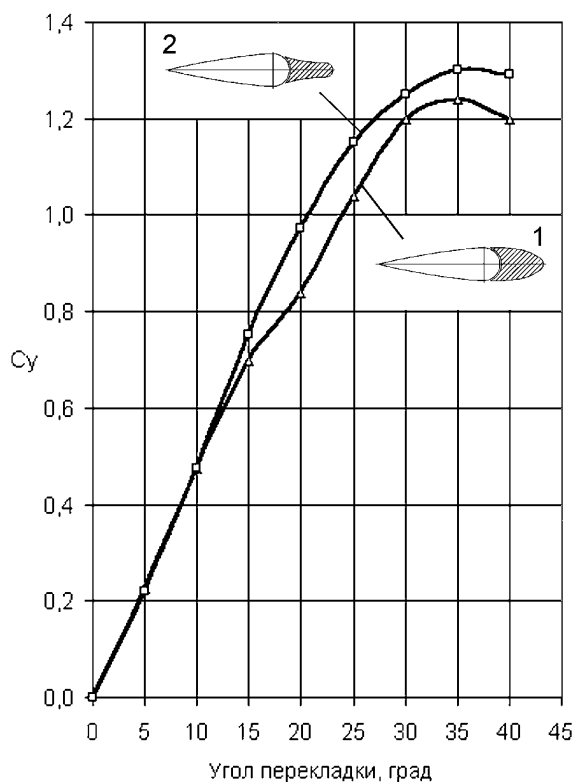


Рис. 7. Гидродинамические характеристики модели полубалансирного руля за кронштейном: 1 - руль с первым вариантом кронштейна; 2 - руль со вторым вариантом кронштейна

Как видно из рисунка зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки на малых углах

перекладки имеет прямо пропорциональный характер. Однако при угле атаки $\approx 20^\circ$ наблюдается характерная особенность зависимости коэффициента подъемной силы от угла атаки, о которой шла речь выше, а именно: кривая коэффициента подъемной силы в этом месте имеет перегиб, причем с тенденцией к снижению коэффициента подъемной силы. Проведенная визуализация течения на руле (рис. 8) позволила установить причину этого явления.

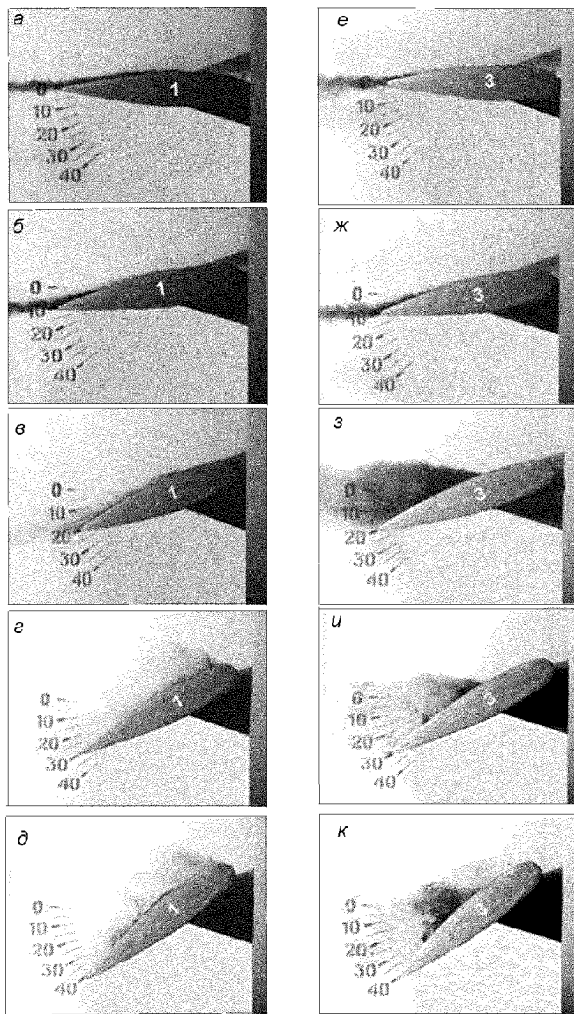


Рис. 8. Визуализация течения на рулевом комплексе: а, б, в, г, д - течение на балансирующей части руля; е, ж, з, и, к - течение за кронштейном

Как видно из рис. 8, з при угле перекладки в $\approx 20^\circ$ на руле за кронштейном образуется отрывное течение, в то время как на балансирующей части руля при этих углах перекладки реализуется безотрывное течение (рис 8, в). Таким образом, отрыв потока за кронштейном приводит к снижению коэффициента подъемной силы всего руля.

На рис. 7 также нанесена зависимость коэффициента подъемной силы рулевого комплекса с установленным вторым вариантом кронштейна. Как видно из рисунка, зависимость коэффициента подъемной силы от угла перекладки в этом случае уже не имеет перегиба, а наоборот - имеет линейную зависимость до $\approx 25^\circ$. Критический угол атаки при этом составил $\approx 35^\circ$. Все это свидетельствует о ликвидации отрыва потока за кронштейном. Происходит это потому, что разрывающийся на кронштейне пограничный слой перед переходом на руль поджимается и имеющиеся в нем возмущения существенно уменьшаются. Затем пограничный слой отрывается от кронштейна и направляется по касательной в район точки "А" на пере руля. Точка "А" расположена на формообразующей окружности таким образом, что здесь имеется отрицательный градиент давления, который гасит возмущения в пограничном слое, обусловленные переходом "кронштейн - перо руля". Учитывая, что на цилиндрических поверхностях (каковой является носовая часть пера руля) отрыв пограничного слоя при характерных для данного случая числах Рейнольдса происходит при $\approx 120...125^\circ$, то есть все основания полагать, что этот механизм гашения возмущений в пограничном слое на переходе "кронштейн - перо руля" будет работать во всем диапазоне углов перекладки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют о принципиальной возможности построения профиля рулевого комплекса судна, который будет обладать высокой эффективностью в широком диапазоне углов перекладки.

1. Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник. - Л: Судостроение, 1988. - 360 с.
2. Кацман Ф. М., Кудреватый Г. М. Конструирование винто-рулевых комплексов морских судов. - Л: Судостроение, 1963. - 510 с.
3. Козлов Л. Ф. Теоретическая биогидродинамика. - Киев: Вища школа, 1983. - 240 с.
4. Bannasch R. Widerstandsarme Strömungskörper - optimal formen nach Patenten der Natur // BIONA report 10, 3. Bionik-kongress. - Mannheim, 1996. - S. 151-176.
5. Каян В. П., Пятацкий В. Е. Биогидродинамическая установка замкнутого типа для исследований гидромеханики плавания морских животных // Бионика. - 1971. - 5. - С. 121-125.