



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Гидравлика»

КОНСТРУКЦИЯ БЫСТРОХОДНЫХ СУДОВ

Пособие

Часть 2



Минск
БНТУ
2012

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Гидравлика»

КОНСТРУКЦИЯ БЫСТРОХОДНЫХ СУДОВ

Пособие для студентов специальности
1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая
эксплуатация водного транспорта»

В 3 частях

Часть 2

СУДА НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

*Под научной редакцией д-ра техн. наук
профессора И.В. Качанова*

Минск
БНТУ
2012

УДК 629.12.001:531.2(075.8)

ББК 39.42-01я7

К65

Авторы 2-й части:

Б.А. Барбанель, И.В. Качанов,

Ю.П. Лебян, М.К. Щербакова

Рецензент *А.А. Хмелев*

К65 Конструкции быстроходных судов: пособие для студентов специальности 1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта» : в 3 ч. / Б. А. Барбанель [и др.] ; под науч. ред. И. В. Качанова. – Минск: БНТУ, 2011. . – Ч. 2 : Суда на подводных крыльях. – 2012. – 58 с.
ISBN 978-985-525-788-3 (Ч. 2).

В издании излагается информация по конструкции и принципам плавания одного из типов скоростных судов: на подводных крыльях, получив широкое распространение в последние годы судостроении.

Пособие предназначено для студентов специальности 1-37 03 02, изучающим дисциплину «Конструкция скоростных судов».

Часть 1 «Глиссеры», авторы Б.А. Барбанель, И.В. Качанов, Ю.П. Лебян, вышла в БНТУ в 2011 году.

УДК 629.12.001:531.2(075.8)

ББК 39.42-01я7

ISBN 978-985-525-788-3 (Ч. 2)

ISBN 978-985-525-509-4

© Барбанель Б.А., Качанов И.В., 2012

© Белорусский национальный

технический университет, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Пособие подготовлено преподавателями Белорусского национального технического университета и Санкт-Петербургского государственного морского технического университета и предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Конструкция быстроходных судов».

По принципу движения, архитектурному оформлению, конструкции корпуса, наличию специальных устройств и систем, по характеру проектирования, особенностям различных теоретических вопросов и ряду других признаков скоростные суда резко отличаются от всех водоизмещающих судов.

Скоростные суда, или, как их часто называют, суда с динамическим принципом поддержания, получают широкое распространение и уже сейчас занимают ведущее место по перевозке пассажиров в транспортной системе внутренних водных путей и в прибрежных морских районах. Ряд типов судов, в частности глиссеры, суда на подводных крыльях (СПК) и на воздушной подушке (СВП), строятся серийно.

По проектированию судов этих типов имеется большое количество работ и публикаций (статьи, брошюры, монографии), но учебная литература отсутствует, что затрудняет подготовку молодых специалистов. Авторы надеются, что предлагаемое пособие по конструкции судов на подводных крыльях частично восполнит этот пробел.

Пособие рассчитано на студентов, обучающихся по программе общей подготовки инженеров-кораблестроителей без специализации по скоростным судам. При его составлении учитывалось то обстоятельство, что студенты не имеют какой-либо существенно важной информации по скоростным судам из других учебных курсов. Это и определило структуру пособия.

В связи с ограниченным объемом пособия многие вопросы не получили должного освещения, однако усвоение основного материала подготовит читателя к тому, чтобы воспользоваться специальной литературой.

1. РАЗВИТИЕ СУДОВ НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

1.1. Начальный период развития судов на подводных крыльях

Издавна воды земного шара бороздили суда, державшиеся на плаву благодаря действию принципа водоизмещения, сформулированного еще Архимедом: предмет, погруженный в воду, выталкивается из нее с силой, равной весу вытесненной жидкости.

Искусство постройки судов до недавнего времени совершенствовалось медленно. Правда, водоизмещающие суда прочны, устойчивы и хорошо держатся на плаву, но из-за сопротивления, которое приходится преодолевать корпусу при движении, их можно отнести к наименее эффективным из всех известных транспортных средств.

В наши дни, когда роль науки, техники и экономики все более возрастает, водный транспорт переживает бурный процесс второго рождения. Судостроители в своем стремлении добиться более высоких технико-экономических показателей и высокой надежности, изыскать простые способы технического обслуживания судов, сократить численность экипажа и получить более высокие прибыли пришли наконец к объективной оценке достоинств судов, построенных как бы вопреки закону Архимеда, т. е. судов, в конструкции которых использованы принципы использования динамической подъемной силы Даниэля Бернулли.

В течение многих лет судостроители беспомощно наблюдали за тем, как все более безнадежно отставала скорость движения судов по сравнению с конкурирующими с ними транспортными средствами. Нет ничего удивительного в том, что в судостроении властвуют консерватизм и недоверие по отношению к новым концепциям постройки судов. В течение 5000 лет истории мореплавания никому не удалось сконструировать судно, способное прийти на смену обычному водоизмещающему.

Революция на море только начинается. Появление уже первого поколения судов на подводных крыльях (СПК) подтвердило правильность определенных технических идей и указало направление, в котором следует продолжать поиски.

Во второй половине XIX века некоторые дальновидные изобретатели пришли к заключению, что для обеспечения одновременно и скорости, и комфорта необходимо, во-первых, полностью приподнять корпус судна над водой и, во-вторых, «отделить» его от соприкосновения с волнами. Это привело к созданию нового вида судов: судов на подводных крыльях. Они были спроектированы таким образом, чтобы путем поднятия корпуса над поверхностью воды исключить ее тормозящее действие и по возможности уменьшить влияние водной поверхности.

Для этого суда приподнимаются над водой с помощью гидродинамической подъемной силы, возникающей, когда подводные крылья движутся вперед. Известно, что разработанная техническая концепция заключают в себе большие возможности для возрастания скорости движения по воде по крайней мере до 100 уз.

Судно на подводных крыльях сочетает в себе достоинства высокоскоростного судна и аэроплана. Вот одно из описаний СПК: «... Союз аэродинамики и гидродинамики – гибрид корабля, чьи внешние формы он заимствовал, и аэроплана, подобно которому он сконструирован».

Нет ничего удивительного в том, что многие пионеры авиации: Энрико Форланини, братья Райт, граф Ш. де Ламбер, Клемент Адер, Александр Грехэм Белл, Гленн Куртисс, «Кеси» Ф. Болдуин, лейтенант Селфридж стояли у истоков создания СПК. По сути дела, сотрудничество между конструкторами и компаниями в области авиации, с одной стороны, и инженерами и фирмами, занятыми проектированием СПК, с другой, существует столь долго, что превратилось в традицию.

Первый патент на судно с подводными крыльями был выдан в 1891 г. во Франции инженеру Ламберту. В 1898 г. Ламберт построил паровую лодку, по бортам которой было установлено по четыре небольших плоских крыла-пластины. Испытания, проведенные на реке Сене, подтвердили справедливость идеи получения более высоких скоростей на судах с подводными крыльями, хотя корпус лодки не полностью отрывался от воды, а само движение лодки не было устойчивым.

Значительно больших успехов добился итальянский инженер Э. Форланини. В 1898 г. он запатентовал подводное крыло этажерочного типа, а в 1905 г. построил катер водоизмещением 1,65 т с двигателем внутреннего сгорания мощностью 55 кВт. На ходу корпус кате-

ра полностью отрывался от воды. При достаточно устойчивом режиме движения катер развивал скорость 46 уз.

Два других итальянских инженера, Крокко и Рикальдони, в 1906 г. построили и испытали катер с двумя V-образными, пересекающимися свободную поверхность подводными крыльями, расположенными в носу и корме по схеме «тандем». Катер имел водоизмещение 1,5 т, мощность двигателя 58 кВт и развивал скорость до 48 уз. В качестве движителей были использованы воздушные винты.

Разработкой подводных крыльев много занимались инженеры-авиаконструкторы, пытавшиеся применить их на гидросамолетах для облегчения взлета и посадки. Здесь можно назвать упомянутых Крокко и Рикальдони, американцев – братьев Райт и Ричардсона, итальянца Гвидони и др. (рис. 1.1).

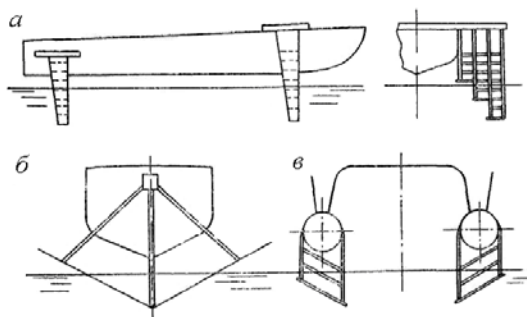


Рис. 1.1. Крыльевые схемы по патентам:
а – Форланини; б – Крокка; в – Гвидони

Большая заслуга в деле развития и совершенствования судов на подводных крыльях принадлежит известному американскому изобретателю Грэхэму Беллу и канадскому инженеру Казею Болдуину. В 1907 г. они купили патент Форланини на судно с этажерочными крыльями и, совершенствуя эту схему в течение 12–15 лет совместной работы, построили и испытали целый ряд различных судов на подводных крыльях, составивших серию, названных авторами «Хайдро-дроумс» (*HD*). Наиболее совершенным из этой серии является судно *HD-4*, построенное и испытанное в 1919 г. в Канаде (рис. 1.2). При водоизмещении 5 т с двумя авиационными двигателями по 257 кВт, с воздушными толкающими винтами, *HD-4* она

развивало скорость около 61 уз. Такая скорость долгое время оставалась рекордной для СПК.

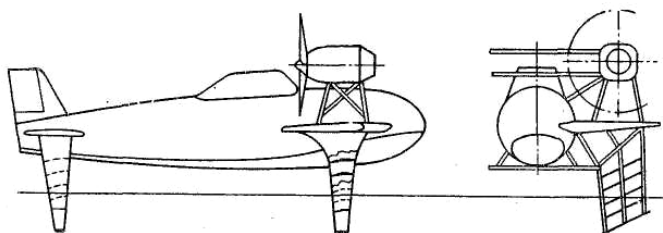


Рис. 1.2. Схема *HD-4*

В период 1918–1939 гг. в США под руководством Болдуина и Родеса – участника проектирования *HD-4* – было построено 12 судов на подводных крыльях водоизмещением до 3 т. Эти суда, в основном с крыльевой схемой Белла–Болдуина, строились как опытные суда или суда спортивного назначения. Наибольший интерес представляют суда *HD-12* и «Мисс ЮС-3». На последнем (водоизмещение 3 т, мощность 478 кВт, этажерочные крылья) была достигнута скорость около 80 уз.

В конце 1920-х–начале 1930-х годов исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию мореходных судов на подводных крыльях проводились в Германии. В отличие от канадских и американских судостроителей, развивавших схему Форланини (суда с этажерочными крыльями), немецкие специалисты пошли по линии развития и совершенствования принципов, заложенных в схеме Крокко. Больших успехов добился Ганс Шертель.

Для СПК Шертеля характерно применение крыльев, пересекающих свободную поверхность (*V*-образные и трапециевидные с глубоководной погруженной плоской частью) и расположенных по схеме «тандем».

Наряду с крыльевой системой Шертеля в предвоенные годы и во время войны в Германии разрабатывалась и практически внедрялась самолетная схема, предложенная в 1933 г. О. Титенсом.

Необходимо отметить, что постройка судов на подводных крыльях до середины 1930-х годов велась без достаточно обоснованных теоретических расчетов, что, несомненно, отрицательно сказывалось на практике внедрения этих судов. Важным этапом в развитии СПК явились организация и проведение систематических научных

исследований, разработка теоретических основ проектирования СПК.

Большая заслуга в этом плане принадлежит Гамбургскому опытовому бассейну, где под руководством Зотторфа в 1930-х годах проводилась серия модельных испытаний подводных крыльев, результаты которых и были положены Шертелем в основу проектных разработок и создания промышленных образцов СПК. В эти же годы систематические исследования особенностей движения проводились в Советском Союзе.

1.2. Послевоенный период развития судов на подводных крыльях за рубежом

После Второй мировой войны развитие судов на подводных крыльях по-настоящему пошло быстрыми темпами. Уже в конце 1950-х и первой половине 1960-х годов в ведущих капиталистических странах были созданы рентабельные речные и морские пассажирские СПК серийной постройки, которые в настоящее время имеют весьма широкое распространение.

Ведущее место в создании транспортных СПК в Западной Европе заняла известная швейцарская фирма «Супрамар», проектно-творческая группа которой возглавлялась Г. Шертелем. Фирма «Супрамар» в основном разрабатывала морские пассажирские суда. Наиболее удачными из построенных по проекту этой фирмы являются суда РТ-20, РТ-50 и РТ-150 ДС. Суда по проектам фирмы «Супрамар» получили широкое распространение во многих странах, так как их строительство ведется по лицензиям фирмами Италии, Норвегии, Японии. Характерные конструктивные особенности этих судов следующие:

- пересекающие поверхность воды V-образные крылья с переменной килеватостью;
- глиссирующая форма обводов корпуса;
- дизельные энергетические установки с передачей мощности на гребные винты через наклонные валопроводы.

Большая работа по созданию СПК проведена объединенной англо-голландской фирмой «Аквавион», по проектам которой в Голландии, Англии и других странах строились мореходные пассажирские катера различных типов водоизмещением от 1,5 до 10 т.

Наиболее крупные и интересные суда, созданные этой фирмой, – суда типа «Аквастрол» (рис. 1.3).

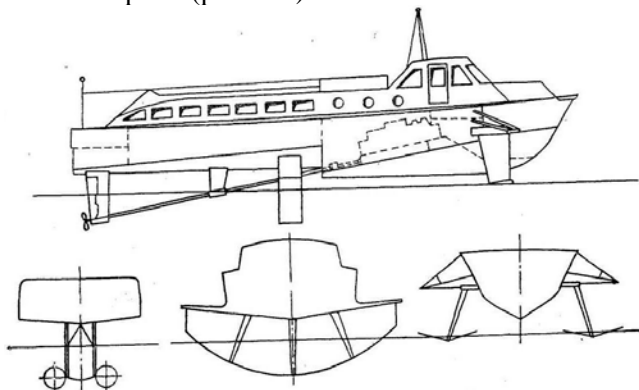


Рис. 1.3. Схема СПК типа «Аквастрол» (Голландия)

Первые два судна этого типа были спущены на воду и испытаны в 1957 г. Испытания и эксплуатация судов типа «Аквастрол» подтвердили высокую мореходность принятой крыльевой системы. Подъемная сила на носовых глиссирующих крыльях в случае их полного погружения резко возрастает, что предотвращает зарывание судна носом. На длинной волне скользящие носовые крылья, обуславливая соответствующий дифферент корпусу (а тем самым и соответствующий угол атаки главного крыла), обеспечивают движение судна, при котором траектория его ЦТ повторяет профиль волны; острые ломающиеся гребни высоких волн при этом срезаются носовыми крыльями. На коротких волнах (менее двух длин корпуса) носовые крылья, зарываясь в гребни волн, имеют тенденцию «прыгать», чему, однако, препятствует кормовое крыло-стабилизатор. Динамические перегрузки, возникающие на носовых крыльях, смягчаются установленными на стойках амортизаторами.

В начале 1950-х годов СПК стали создаваться и в ФРГ. В 1956 г. в Гамбурге был спущен на воду и испытан экспериментальный катер ($D = 3,5$ т, $L = 10$ м, $N = 2 \times 66$ кВт), построенный по проекту Венделя. Катер был оборудован тремя отдельными глубокопогруженными автоматически управляемыми крыльями: два симметрично расположенных относительно диаметральной плоскости (ДП) носовых крыла и одно кормовое типа «биплан» (рис. 1.4). Под ру-

ководством Венделя была разработана серия оригинальных проектов СПК водоизмещением до 1000 т с различными вариантами крыльевых систем с глубоководными крыльями.

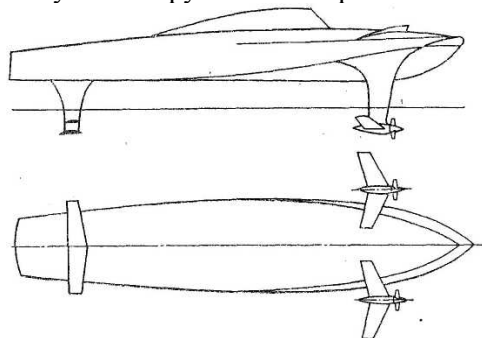


Рис. 1.4. Схема катера Венделя с тремя отдельными глубоководными управляемыми крыльями

В конце 1960-х–начале 1970-х годов проектные разработки и строительство СПК стали вести фирмы Италии, накопившие опыт постройки СПК по лицензиям «Супрамар», фирмы Франции, Норвегии и других стран.

Широкие по масштабу работы по созданию судов на подводных крыльях проводятся в США. В первые послевоенные годы строительство СПК в США велось эпизодически отдельными частными предпринимателями и фирмами, проводились экспериментально-теоретические исследования, связанные с созданием СПК. Во второй половине 1950-х годов интерес к СПК в США заметно возрос. К этому времени были всесторонне испытаны экспериментальные катера разных типов, что позволило наметить направление дальнейших экспериментально-поисковых работ по созданию мореходного СПК.

Американские СПК, построенные и проектируемые в период 1960-х годов, отличались от европейских судов типом крыльев (в основном отдельные глубоководные управляемые крылья вместо монокрыльев, пересекающих свободную поверхность воды), их креплением к корпусу (убирающиеся вместо жестко прикрепленных неподвижных крыльев) и профилировкой, формой корпуса, мощностью и типом энергетических установок (мощные газотурбинные двигатели вместо дизелей ограниченной мощности), способом передачи мощности к двигателю (колонки вместо наклонных гребных

валов), применением суперкавитирующих винтов, водометных вспомогательных движителей и другими особенностями. Все эти особенности нашли отражение на СПК «Денисон» (рис. 1.5).

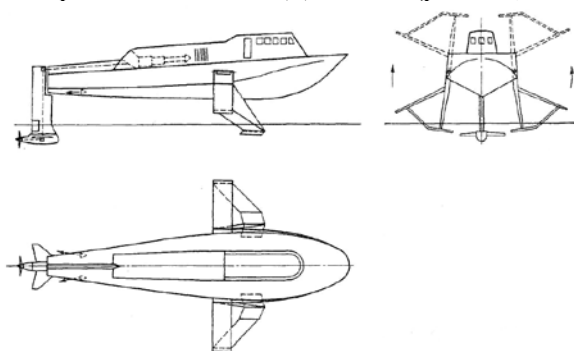


Рис. 1.5. Схема СПК «Денисон»

Корпус СПК «Денисон» – острокосый, безреданный, со значительной килеватостью в носу, сильно зауженный в корме. Это обеспечивает хорошую мореходность при движении в водоизмещающем положении и облегчает выход на крыльевой режим. Крыльевая система с самолетной трехточечной схемой распределения нагрузки состоит из двух отдельных подъемно-поворотных крыльев, пересекающих свободную поверхность воды и кормового глубокопогруженного крыла, укрепленного на одной стойке затранцем; кормовое крыло также выполнено поворотноподъемным. Нижние плоскости носовых крыльев снабжены автоматически регулируемы́ми закрылками. Регулирование подъемной силы кормового крыла осуществляется автоматическим поворотом всего крыла. Мореходные качества СПК «Денисон» признаны малоудовлетворительными: судно сохраняет скорость 30 уз при высоте волн до 2,5 м, но при этом вертикальные ускорения в ЦТ судна достигают 0,5g.

В качестве главного двигателя на СПК «Денисон» установлена газовая турбина мощностью 10300 кВт. Передаваемая на суперкавитирующий винт неполная мощность обеспечивает судну скорость свыше 60 уз (при испытании судно развивало скорость 62 уз). При установке суперкавитирующих крыльев и полной мощности 10300 кВт скорость судна достигает 80 уз. Для хода в режиме плавания судно

оборудовано вспомогательным газотурбинным двигателем мощностью 735 кВт, работающим на два водомета с выбросом под воду. Скорость вспомогательного хода – 11 уз.

Через год после спуска СПК «Денисон» на воду был спущен опытный малый противолодочный корабль «Хай Пойнт».

В период 1964–1966 гг. различными фирмами США были построены пассажирские мореходные СПК «Виктория», «Флаинг Клауд» и «Дельфин». Это небольшие суда, но все они оборудованы автоматически управляемыми полностью погруженными крыльями и газотурбинными энергетическими установками. На «Флаинг Клауд» применена самолетная трехточечная крыльевая схема, два передних крыла которой оборудованы системой стабилизации Роупера.

«Дельфин» также имеет трехточечную крыльевую систему самолетного типа с глубокопогруженными подъемными крыльями, но система автоматической стабилизации движения СПК – электронная. Передача мощности к винту регулируемого шага ВРШ на СПК «Дельфин» осуществляется через полноповоротную угловую колонку-стойку крыла, а на «Флаинг Клауд» – через V-образный редуктор и наклонный вал.

В отличие от этих двух судов СПК «Виктория» имеет крыльевую схему типа «утка». САУПК – электронная, с закрылками. Передача мощности на гребные винты – Z-образная.

Из всех трех вышеупомянутых пассажирских СПК наиболее совершенным, очевидно, является «Дельфин»: судно обладает значительно большей скоростью и лучшей мореходностью, его САУПК тщательно отработана в аспекте надежности и безаварийности эксплуатации.

По результатам опытной эксплуатации многие специалисты отдают предпочтение крыльевой схеме «утка» и водометным двигателям. По ряду показателей мореходности и устойчивости движения схема «утка» действительно имеет ряд преимуществ.

Преимущество использования водометов вместо гребных винтов заключается в возможности отказа от дорогих и сложных Z-образных передач и в уменьшении подводного шума.

В первой половине 1970-х годов в США и некоторых западноевропейских странах разработан ряд проектов мореходных транспортно-пассажирских и других судов, в том числе и проекты океанских катеров на подводных крыльях (КПК) многоцелевого назначения во-

доизмещением до 5000 т. При разработке многих из этих проектов в качестве прототипа был принят катер «Тукумкери». В 1974 г. в США был построен КПК «Пегас» водоизмещением 235 т. Как и на «Тукумкери», на нем использована крыльевая система с ГПК (глубокопогруженными крыльями), расположенными по схеме «утка». Но в корме у него поставлено монокрыло, убирающееся поворотом к корме вокруг горизонтально-поперечной оси. Крыльевая схема КПК «Пегас» показана на рис. 1.6.

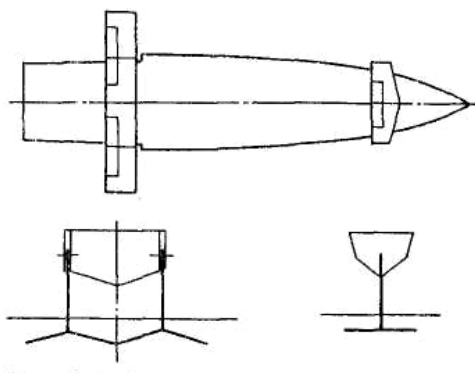


Рис. 1.6. Схема крыльевого устройства на КПК «Пегас»

1.3. Отечественные суда на подводных крыльях

Практические работы по созданию судов на подводных крыльях в Советском Союзе начались в годы Великой Отечественной войны в 1941–1945 гг. В 1943 г. по проекту Р.Е. Алексеева был построен опытный катер на малопогруженных крыльях с регулированием подъемной силы в период всплытия поворотом носового крыла посредством ручного привода. Испытания катера, в целом давшие положительные результаты, показали, что ручное регулирование подъемной силы, требующее специальной подготовки водителя, является малонадежным способом обеспечения устойчивости судна при выходе на крыльевой режим; к тому же и конструкция крыльевого носового устройства с поворотным крылом была достаточно сложной. Начались поиски и отработка более простой и надежной

крыльевой схемы с малопогруженными крыльями. Это были поиски принципиально новой крыльевой системы, единственно пригодной для речных условий системы, которая не была создана за рубежом.

Большой объем экспериментальных работ по созданию серии оптимальных профилей для малопогруженных крыльев, профилей стоек, отдельных узлов крыльевых устройств, гребных винтов, крыльевых схем и обводов корпуса дали Р.Е. Алексею необходимый материал для дальнейшего и успешного развития работ по созданию судов на подводных крыльях.

В период 1945–1948 гг. и в последующие годы было построено несколько опытных катеров, на которых отработывалась крыльевая система с малопогруженными крыльями.

Накопленный опыт эксплуатации экспериментальных образцов СПК и обобщение результатов большого объема исследований позволили перейти к разработке технических проектов и строительству головных образцов серии речных и морских пассажирских судов на подводных крыльях, многие из которых получили широкое распространение в Советском Союзе и в зарубежных странах. К числу таких СПК крупносерийной постройки относятся речные теплоходы «Ракета» и «Беларусь», катер «Волга», теплоход «Метеор», морской теплоход «Комета». Кроме этих СПК в период 1961–1964 гг. были построены озерный теплоход «Спутник», речной пассажирский теплоход «Чайка», морской теплоход «Вихрь», озерный газотурбоход «Буревестник», речной теплоход «Восход».

В 1961 г. на Черном море начал эксплуатироваться первый в СССР морской СПК «Стрела». Крыльевая система этого теплохода состоит из двух V-образных, пересекающих свободную поверхность крыльев, расположенных по схеме «тандем». Теплоход может сохранять крыльевой режим движения при волнении до четырех баллов. Теплоход двухвинтовой. При мощности $N_e = 2 \times 735$ кВт крейсерская скорость на тихой воде составляет 38 уз. Водоизмещение судна – около 45 т, пассажироместимость – 90 человек. Всего было построено два таких судна.

В 1967 г. было построено два морских пассажирских катера типа «Невка». В период 1968–1969 гг. катера проходили опытную эксплуатацию на Черном море, которая подтвердила транспортно-экономическую целесообразность серийной постройки таких кате-

ров для их использования на прибрежно-морских местных пассажирских линиях протяженностью до 85 морских миль.

Крыльевое устройство катера, состоящее из двух полупогруженных крыльев, пересекающих свободную поверхность (носовое V-образное с переменной килеватостью, кормовое – трапецевидное), обеспечивает быстрый выход на крыльевой режим, хорошую мореходность и маневренность. При ходе катера на трехбалльном волнении (высота волн до 1 м) пассажиры практически не ощущают никаких перегрузок.

Как особенность катера «Невка» следует отметить Z-образную схему передачи мощности от двигателя к гребному винту, осуществленную с помощью угловой колонки ДК-300. Корпус катера – стеклопластиковый.

В 1972 г. был построен морской пассажирский газотурбоход «Тайфун» (рис. 1.7). Это первый в нашей стране пассажирский газотурбоход на управляемых подводных крыльях. «Тайфун» – быстроходное комфортабельное судно, обладающее высокими эксплуатационно-мореходными качествами, предназначенное для экскурсионных линий на Балтике.

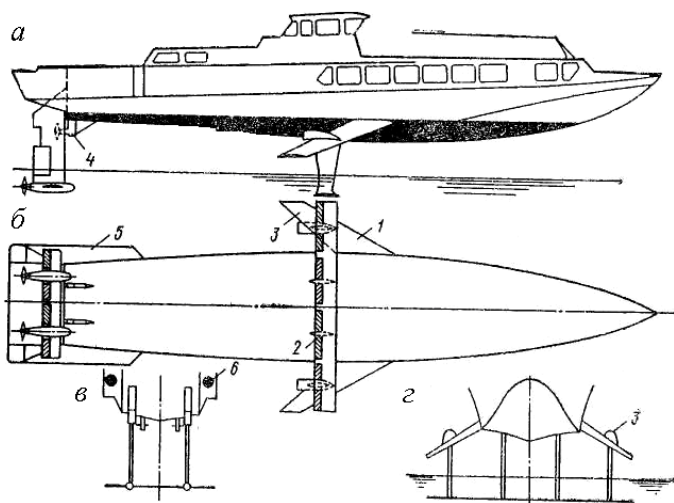


Рис. 1.7. Схема общего вида и крыльевого устройства пассажирского газотурбохода «Тайфун»: а – боковой вид; б – схема расположения крыльев (план);

6 – кормовое крыльевое устройство; 2 – носовое крыльевое устройство;
1 – опорно-стартовое крыло; 2 – закрылок; 3 – гондола размещения привода управления бортовыми закрылками; 4 – колонка с гребным винтом для хода СПК в водоизмещающем положении; 5 – бортовой рецесс для размещения газовыхлопа; 6 – труба газовыхлопа

Крыльевой комплекс газотурбохода «Гайфун» состоит из двух глубокопогруженных крыльев, расположенных по самолетной схеме. Регулирование подъемной силы осуществляется с помощью поворотных закрылков, управляемых электронной автоматической системой. На носовом несущем крыле установлено восемь закрылков, разделенных по автономности управления на четыре группы, а на кормовом – четыре закрылка, разделенных на две группы. Носовое крыло имеет большой размах, почти в два раза превышающий ширину корпуса. Оно крепится двумя стойками к корпусу и двумя – к опорным бортовым кронштейнам, выполненным в виде стреловидных крыльев полый (пустотелой) и прочной конструкции. Стойки также выполнены полыми для размещения в них механических тяг управления закрылками. В гондолах на крыльях-кронштейнах размещены механизмы управления бортовыми группами закрылков. Кормовое крыло крепится к корпусу двумя стойками, одновременно являющимися угловыми колонками К-1700, посредством которых осуществляется Z-образная схема передачи мощности от главных газовых турбин к гребным винтам.

Применение угловых колонок вместо наклонных гребных валов позволило увеличить клиренс (высоту подъема корпуса над водой), что необходимо для повышения мореходности судна, а также улучшило архитектурно-компоновочную схему и обитаемость судна благодаря размещению машинного отделения в корме.

Малый ход в водоизмещающем положении, а также все маневры во время подхода к причалу осуществляются двумя поворотными и убирающимися угловыми колонками КП-150, подключенными к одному дизелю мощностью 110 кВт. При работе главных гребных винтов колонки поднимаются вверх.

Крыльевая система, форма корпуса и движительно-силовое оборудование обеспечивают газотурбоходу «Гайфун» быстрый выход на крыльевой режим, высокую скорость, устойчивое движение с малыми динамическими перегрузками в условиях крупного волнения.

2. ПОДВОДНЫЕ КРЫЛЬЯ И КРЫЛЬЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Подводные крылья представляют собой несущие поверхности, на которых при их движении в воде вместе с судном создается гидродинамическая подъемная сила, способная поднять и стабильно удерживать идущее судно в надводном положении. Возникновение подъемной силы на крыле связано с характером его обтекания, с распределением скоростей и давлений в обтекающем потоке около крыла. Физические процессы, происходящие в пограничном слое движущегося крыла, особенно малопогруженного, весьма сложны и трудно поддаются строгому теоретическому анализу. Несмотря на это обстоятельство, современная гидромеханика располагает большим количеством фундаментальных теоретических и экспериментально-теоретических работ, в которых глубоко исследованы общие и частные вопросы, связанные с движением изолированных крыльев и крыльевых систем. Многие из этих работ используются или могут быть использованы в качестве основы для получения практических результатов по определению гидродинамических характеристик подводных крыльев некоторых профилей и проектных параметров крыльевых систем.

В создании основополагающей теории движения подводного крыла огромная заслуга принадлежит отечественным ученым, среди которых прежде всего следует назвать имена Н.Е. Жуковского и С.А. Чаплыгина, И.Е. Кочина, М.В. Келдыша, М.А. Лаврентьева, Л.И. Седова, Л.Н. Сретенского, А.Н. Владимирова, Л.А. Эпштейна, а также И.Т. Егорова, С.Д. Чудинова, А.Н. Панченкова и др. Большое практическое значение имеют работы В.А. Абрамовского, Э.А. Афрамеева, В.И. Блюмина и М.Б. Масеева, Е.Г. Извольского, А.Д. Красницкого, М.М. Короткова, М.Г. Кулаева, А.В. Лукашевича, Г.В. Соболева, В.Г. Соколова и др.

Исключительно большая заслуга в области экспериментального исследования и практического внедрения плоских малопогруженных крыльев принадлежит Р.Е. Алексееву.

2.1. Геометрические характеристики крыльев

В простейшем случае полностью погруженное подводное крыло представляет собой тонкую прямоугольную удлиненную пластинку, расположенную под корпусом судна в поперечном направлении и жестко скрепленную с ним стойками. При этом плоскость крыла с направлением движения судна составляет некоторый угол атаки α (рис. 2.1).

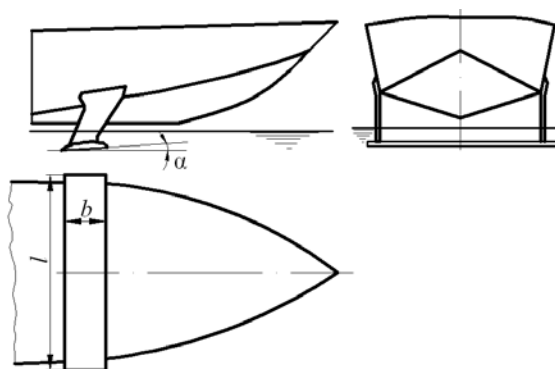


Рис. 2.1. Полностью погруженное крыло

На современных судах для обеспечения возможно более высоких гидродинамических и мореходных качеств подводным крыльям нередко придают более сложную форму: делают их килеватыми по виду спереди, стреловидными в проекции плана, с разными углами атаки по размаху и т. д.

Форму подводного крыла (ПК) определяют следующие геометрические характеристики (рис. 2.2): размах крыла l , ширина крыла b , угол килеватости β , угол стреловидности χ и профиль крыла, т. е. форма и размеры сечения крыла плоскостью, перпендикулярной к размаху (параллельной ДП). Крыло в целом удобно, и существенно важно его характеризовать относительным удлинением, которое для прямого крыла определяется как отношение размаха к хорде:

$$\lambda = l/b,$$

а в других случаях – по выражению

$$\lambda = l^2/S,$$

где S – площадь крыла:

$$S = l \cdot b.$$

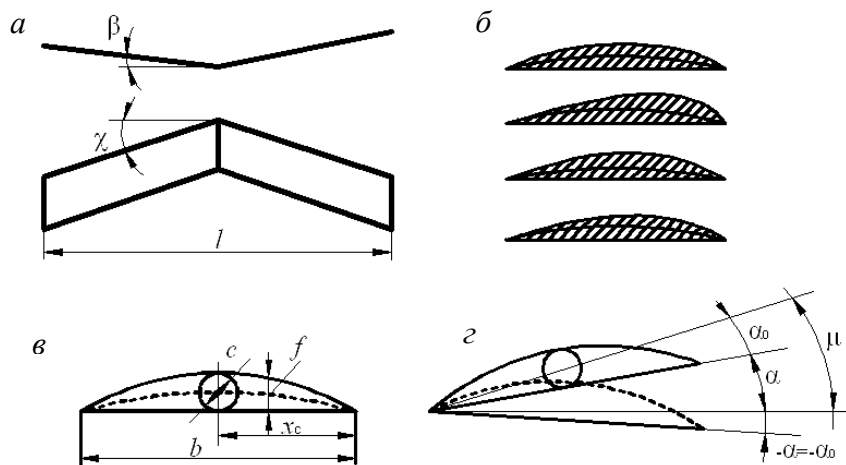


Рис. 2.2. Геометрические характеристики крыла:
a – элементы формы крыла; *б* – типы профилей; *в* – элементы профиля;
z – углы атаки

Важнейшее значение для характеристики крыла имеет его профиль. Широкое распространение, как наиболее простые в технологическом отношении, получили сегментные или плосковыпуклые профили. Применяют также выпукло-вогнутые профили, профиль Вальхнера и др. (рис. 2.2, *б*).

Основными геометрическими элементами профиля крыла, влияющими на его работу, являются следующие:

– c – максимальная толщина, определяемая как диаметр наибольшей окружности, вписанной в профиль;

– средняя линия – кривая, проведенная через центры окружностей, вписанных в профиль;

– b – геометрическая хорда – прямая, стягивающая концы средней линии профиля. По хорде измеряют ширину крыла в данном сечении, определяют углы атаки. Она принимается за базовую линию, от которой задаются ординаты профиля;

– хорда гидродинамическая (линия нулевой подъемной силы) – прямая на профиле, совпадающая с направлением движения крыла, когда его подъемная сила равна нулю. Для идеальной жидкости при большом погружении крыла гидродинамическая хорда проходит через хвостовик профиля и точку, расположенную на середине средней линии профиля;

– α_0 – угол нулевой подъемной силы – угол, заключенный между геометрической и гидродинамической хордами (рис. 1.2, ε);

– $\mu = \alpha + \alpha_0$ – действительный угол атаки;

– f – максимальная стрелка кривизны профиля, измеряемая по перпендикуляру между геометрической хордой и параллельной ей прямой, касательной к средней линии;

– x_c – отстояние максимальной толщины профиля от его носовой кромки, измеренное по хорде.

В теоретических расчетах и при обработке экспериментальных данных для сравнительной оценки крыльев различных размеров пользуются относительными геометрическими параметрами профиля. К ним относятся следующие:

$\bar{c} = c/b$ – относительная толщина;

$\bar{f} = f/b$ – относительная кривизна (изогнутость);

$\bar{x}_c = x_c/b$ – относительное положение максимальной толщины профиля.

2.2. Гидродинамические характеристики подводного крыла

Схематизируя обтекание крыла набегающим параллельно-струйным потоком, ограниченным недеформируемыми плоскостями A и B (рис. 2.3, a), нетрудно сделать вывод о том, что в районе

крыла скорости струйных линий тока, вследствие их искривления и стеснения, неравномерны и отличаются от скорости набегающего потока в сечении далеко перед крылом. Линии тока, набегающие на крыло со скоростью V под некоторым положительным углом атаки, на нижней стороне подтормаживаются, а на верхней – ускоряются. Вследствие разности скоростей, согласно закону Бернулли, различно и давление потока на верхнюю и нижнюю поверхности крыла. Экспериментально установлено, что на нижней стороне давление увеличивается, а на верхней, наоборот, уменьшается по сравнению с давлением p_0 в потоке далеко перед крылом на уровне его погружения. Распределение давления по профилю крыла в виде безразмерного коэффициента давления

$$\bar{p} = 2\Delta p / \rho V^2$$

показано на рис. 2.3, б.

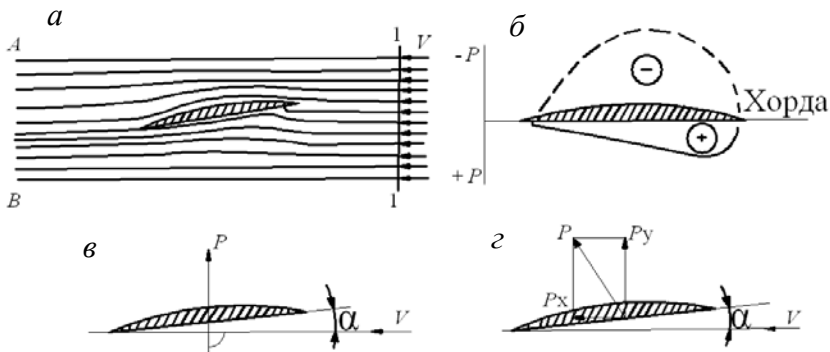


Рис. 2.3. Схема обтекания крыла набегающим потоком:

a – линии струйного обтекания; *б* – эпюры давления;

в – главный гидродинамический вектор; *г* – подъемная сила и сопротивление крыла

Здесь

$$\Delta p = p - p_0,$$

где p – давление в рассматриваемой точке профиля;

p_0 – давление в невозмущенном потоке.

Для верхней стороны профиля коэффициент \bar{p} имеет отрицательное значение и свидетельствует о разрежении ($p < p_0$), а положительное значение \bar{p} для нижней стороны указывает на избыточное давление ($p > p_0$). Разность давлений на верхней и нижней сторонах профиля обуславливает подъемную силу крыла. При этом следует отметить, что около 2/3 подъемной силы создается на верхней стороне профиля вследствие разрежения и только 2/3 – на нижней, благодаря повышению давления. Для тонких пластин при малом угле атаки распределение несущей способности между засасывающей и нагнетающей сторонами при погружении больше трех хорд примерно одинаково, т. е. по 50 %. Это позволило Г. Вагнеру обосновать аналогию между крылом и глиссирующей пластиной.

Силы гидродинамического давления $p dS$ действуют нормально к поверхности крыла, а общая результирующая их, как интегральный вектор

$$\bar{P} = \int_S \bar{p} dS,$$

в условиях идеальной жидкости направлена нормально к скорости набегающего потока (рис. 2.3, в). В реальных условиях, вследствие вязкостных свойств воды, на крыло действуют также силы трения, направленные по касательной к его поверхности. В результате действия сил трения главный вектор гидродинамических сил при установившемся движении отклоняется в сторону, противоположную движению крыла (рис. 2.3, г). Проекции главного вектора на вертикальную и горизонтальную оси y и x определяют подъемную силу крыла P_y и его сопротивление P_x :

$$\begin{cases} P_y = P \cos (P, y), \\ P_x = P \cos (P, x). \end{cases}$$

Относительно передней кромки крыла гидродинамические силы создают реактивный момент M , который стремится повернуть профиль крыла в положение нулевой подъемной силы. Величина этого момента характеризует удаление от передней кромки крыла точки приложения главного гидродинамического вектора.

Экспериментально-теоретическим путем установлено, что P_y , P_x и M могут быть определены по формулам

$$\begin{cases} P_y = C_y \frac{1}{2} \rho V^2 S; \\ P_x = C_x \frac{1}{2} \rho V^2 S; \\ M = C_m \frac{1}{2} \rho V^2 S b. \end{cases}$$

где C_y , C_x и C_m – безразмерные коэффициенты соответственно подъемной силы, сопротивления и момента.

Безразмерные коэффициенты C_y , C_x и C_m являются основными гидродинамическими характеристиками крыла. Они не зависят от среды, в которой движется крыло (воздух или вода), и соответственно равны для всех геометрически и гидродинамически подобных крыльев.

Гидродинамические коэффициенты C_y , C_x и C_m зависят от формы крыла, угла атаки α , относительного размаха крыла λ , относительной глубины погружения \bar{h} и безразмерных критериев режима движения крыла Re и Fr .

Кратко рассмотрим влияние основных геометрических и эксплуатационных параметров крыла на изменение его гидродинамических характеристик.

2.2.1. Влияние угла атаки на C_y , C_x и C_m

На рис. 2.4 приведены кривые качественного изменения C_y , C_x и C_m в зависимости от угла атаки α . Из этого графика видно, что C_y с возрастанием α сначала увеличивается практически по линейной зависимости, но затем, достигнув своего максимума, начинает падать. Это объясняется тем, что при достаточно больших углах атаки нарушается плавность обтекания крыла: на его верхней стороне сначала возникают местные срывы потока, а затем, по мере увеличения α , область срыва струй все расширяется, давление в зоне возмущенного потока над крылом повышается, подъемная сила крыла падает, а его сопротивление резко возрастает.

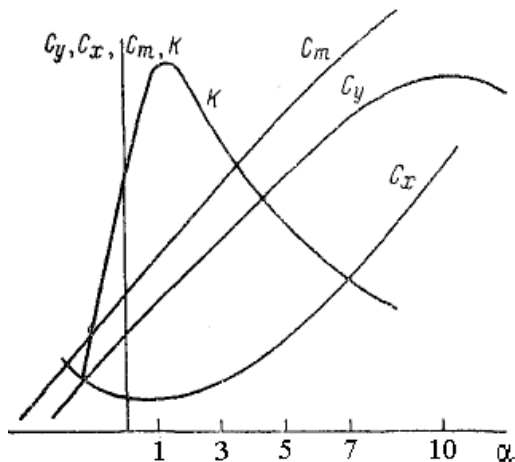


Рис. 2.4. Влияние угла атаки на гидродинамические коэффициенты

Как видно из графика $C_y = f(\alpha)$, нулевое значение C_y располагается в зоне отрицательных углов атаки α_0 . Это объясняется тем, что истинный угол атаки $\mu = \alpha + \alpha_0$ больше геометрического на угол нулевой подъемной силы. Максимальное значение C_y для крыльев, используемых на современных СПК, соответствует углам атаки $\alpha \approx 10\text{--}12^\circ$, которые, однако, не являются оптимальными. На этом же рисунке приведена кривая, представляющая гидродинамическое качество крыла $K = f(\alpha)$. Эта величина характеризуется отношением подъемной силы крыла к силе сопротивления:

$$K = \frac{P_y}{P_x} = \frac{C_y}{C_x}.$$

Коэффициент гидродинамического качества является главным критерием общей характеристики крыла, по которому оценивается целесообразность его практического использования. Как видно из графика, максимальное значение K располагается в зоне малых углов атаки (в пределах $\alpha = 1\text{--}3^\circ$), которые, очевидно, и должны считаться оптимальными углами. Однако на СПК с малопогруженными крыльями установочные углы атаки часто принимаются не больше

1° или даже отрицательными, что необходимо для обеспечения стабилизации движения крыла вблизи поверхности, т. е. для предотвращения возможного «провала» или, наоборот, «выскакивания» крыла на поверхность. При этом гидродинамическое качество снижается, но остается достаточно высоким.

2.2.2. Влияние удлинения λ на C_y , C_x и K

Влияние удлинения, или относительного размаха, крыла на величины C_y , C_x и K показано на рис. 2.5.

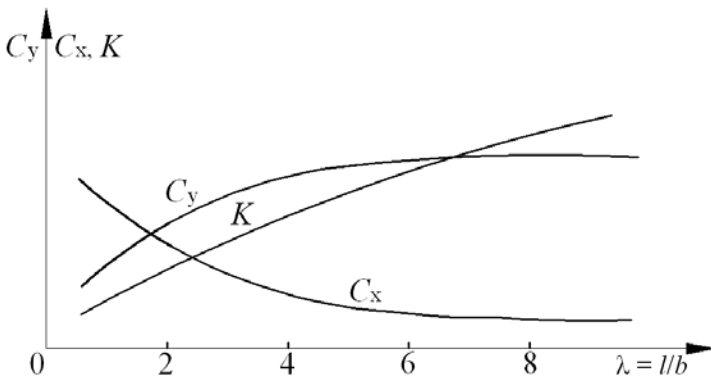


Рис. 2.5. Качественная зависимость C_y , C_x и K от λ

С увеличением размаха крыла коэффициент подъемной силы возрастает, а коэффициент сопротивления, наоборот, падает. В результате гидродинамическое качество увеличивается. При $\lambda \geq 10$ все три коэффициента практически остаются неизменными. Эта зависимость C_y и C_x от λ объясняется влиянием так называемого скоса потока. По кромкам движущегося крыла возникает система жидкостных вихрей, обусловленных перетеканием воды из зоны повышенного давления в зону пониженного давления. Вертикальные составляющие вихревого движения воды, направленные вниз, индуцируются по направлению движения крыла и отклоняют набегающий поток на величину $\Delta\alpha$ так, что фактический угол атаки крыла уменьшается, вызывая уменьшение подъемной силы. Глав-

ный вектор гидродинамических сил отклоняется в противоположную движению крыла сторону, образуя составляющую x_i дополнительного, так называемого индуктивного сопротивления (рис. 2.6).

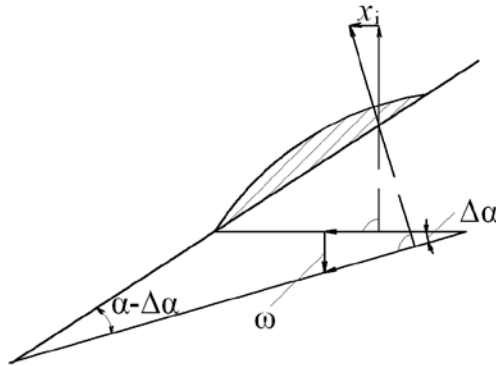


Рис. 2.6. Схема образования индуктивного сопротивления

Очевидно, что относительное влияние падения подъемной силы на концах крыла на величину C_y будет тем больше, чем короче и шире крыло. Заметное снижение C_y наблюдается для крыльев с размахом $\lambda < 5$, а особенно резко – с размахом $\lambda < 2$. По относительному размаху различают крылья бесконечного размаха ($\lambda \rightarrow \infty$), крылья конечного размаха ($\infty > \lambda > 2$) и крылья малого удлинения ($\lambda < 2$). Для СПК применяют крылья конечного размаха при $\lambda = 5-10$.

2.2.3. Влияние глубины погружения на C_y и C_x

Изменение подъемной силы и сопротивления крыла в зоне малых относительных погружений объясняется влиянием свободной поверхности воды (рис. 2.7). Сущность влияния свободной поверхности воды на подъемную силу крыла состоит в подтормаживании обтекающего спинку крыла потока. Когда крыло движется на малой глубине, свободная поверхность под воздействием атмосферного давления образует над ним впадину, стремясь «заполнить» разреженную зону.

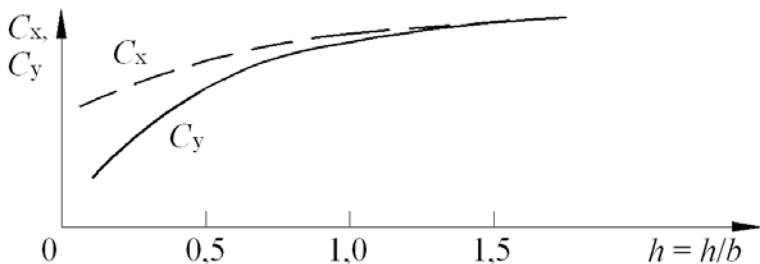


Рис. 2.7. Качественная зависимость C_y и C_x от глубины погружения крыла

Толщина слоя воды (гидравлическое сечение) над крылом при этом уменьшается, что вызывает торможение обтекающего потока и образование бугра (подъем уровня воды) над крылом в передней его части, который затем распространяется на всю ширину и, скатываясь, образует за крылом волну (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Влияние свободной поверхности воды на подъемную силу крыла

В результате степень разрежения над крылом уменьшается, следовательно, уменьшается и подъемная сила крыла, а образующаяся волна вызывает увеличение сопротивления. Однако общее сопротивление при приближении крыла к поверхности не увеличивается, а уменьшается вследствие снижения сопротивления трения (поскольку обтекание профиля вблизи поверхности идет с меньшими скоростями), а также благодаря снижению индуктивного сопротивления, пропорционального подъемной силе (с уменьшением P уменьшается и x_i).

Количественное изменение гидродинамических коэффициентов, когда крыло приближается к свободной поверхности, зависит, как показывают эксперименты, от формы профиля, его относительной толщины и угла атаки. Для плоского сегментного крыла ($\lambda = 5$; $\bar{C} = 0,06$) при изменении глубины его погружения от $\bar{h} = 1,0$ до $\bar{h} = 0,1$ и углах атаки в пределах $\alpha = 0-3^\circ$ коэффициент подъемной силы C_y уменьшается на 40 – 50 %, коэффициент сопротивления C_x – на 35 – 37 %, коэффициент гидродинамического качества K – на 10–20 %.

2.2.4. Влияние формы крыла на C_y и K

Как видно из кривых $C_y = f(\alpha)$ и $K = f(\alpha)$ на рис. 2.9, построенных по экспериментальным данным, наиболее высокие значения коэффициентов подъемной силы и гидродинамического качества обеспечивает вогнуто-выпуклый профиль («лунка») крыла. Наименьшие значения C_y и K (в пределах $\alpha = 0-2^\circ$ и в зоне отрицательных углов атаки) дает несимметричный двояковыпуклый профиль.

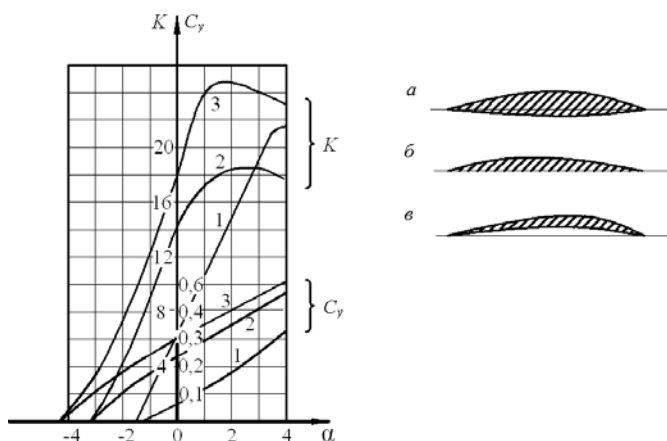


Рис. 2.9. Изменение гидродинамических характеристик от угла атаки различных профилей крыла:

a (1) – $\bar{C} = 0,08$; $\bar{f} = 0,018$; $\lambda = 6$; b (2) – $\bar{C} = 0,06$; $\bar{f} = 0,03$; $\lambda = 5,1$;

$$\varepsilon(3) - \bar{C} = 0,06; \bar{f} = 0,05; \lambda = 5,1; h_1 = h_2 = h_3 = 1; Fr_1 \approx Fr_2 \approx Fr_3 \approx 7 - 7,5$$

Эта особенность профилей может быть объяснена следующим образом. Из теории известно, что линией нулевой подъемной силы, т. е. гидродинамической хордой, является (в условиях идеальной жидкости) прямая, проходящая через заднюю кромку профиля и точку, расположенную на середине линии его кривизны*.

Следовательно, чем больше кривизна профиля f , тем больше угол нулевой подъемной силы α_0 и действительный угол атаки $\mu = \alpha + \alpha_0$. Таким образом, при одинаковых геометрических углах атаки различных по форме профилей большей подъемной силой будет обладать тот, у которого больше угол нулевой подъемной силы. На рис. 2.10 видно, что именно таким и является вогнуто-выпуклый профиль.

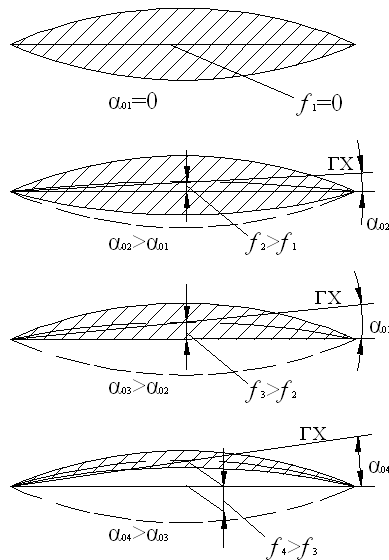


Рис. 2.10. Изменение угла нулевой подъемной силы в зависимости от формы

* Реальные профили имеют несколько меньший угол нулевой подъемной силы. Для сегментных и близких к ним профилей поправочный коэффициент равен 0,87.

нижней стороны профиля: ГХ – гидродинамическая хорда

Экспериментами установлено, что при малых углах атаки, изменяемых на крыльях СПК, форма нижней стороны профиля не влияет на величину и характер распределения разрежения на верхней стороне крыла. Это определяется лишь формой самой верхней стороны. Таким образом, у различных профилей, имеющих одинаковую форму верхней стороны, разница в подъемной силе будет возрастать при переходе от выпуклой формы нижней стороны профиля к плоской и вогнутой.

Влияние формы крыла в плане на гидродинамические характеристики проявляется через изменение угла скоса потока, и лучшей будет эллиптическая форма (рис. 2.11). Однако эллиптические крылья не получили распространения в связи со сложностью их изготовления, а также потому, что они хуже обеспечивают поперечную остойчивость судна, чем прямоугольные в плане крылья.

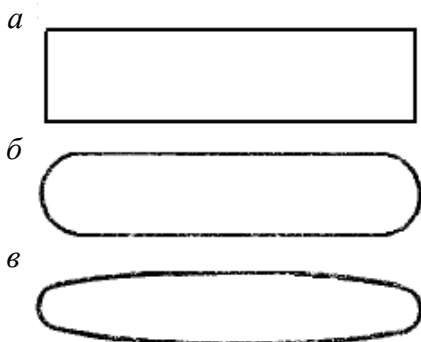


Рис. 2.11. Формы плоских крыльев в плане:

а – прямоугольная; *б* – с закругленными концами; *в* – эллиптическая

2.2.5. Влияние кавитации на работу крыла

Возникновение кавитации в разреженной зоне над верхней стороной крыла оказывает существенное влияние на его работу. Кавитация начинается тогда, когда минимальное давление у поверхности крыла

становится равным или меньше давления насыщенных паров ($p \leq p_d$). Кавитация в различных ее стадиях вызывает шум, эрозийный износ поверхности крыла и падение подъемной силы. Последнее может обусловить горизонтальную неустойчивость движения крыла.

Во избежание кавитационного режима обтекания крыла необходима его расчетная проверка на кавитацию. Как известно, критерием кавитации служит безразмерный коэффициент, называемый числом кавитации:

$$\chi = \frac{2(p_0 - p_d)}{\rho V^2}, \quad (2.1)$$

где $p_0 = p_{\text{атм}} \pm \gamma h$ – статическое давление в жидкости далеко перед крылом, Па;

p_d – давление насыщенных паров, Па (при температуре $t = 15^\circ\text{C}$, $p_d = 1700$ Па);

ρ – плотность воды, кг/м^3 ;

$p_{\text{атм}} = 101\,000$ – атмосферное давление, Па;

γ – удельный вес воды, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}^2$ (для пресной – 9810, для морской – 10 060);

h – глубина погружения, м.

Сравнивая число кавитации с коэффициентом наибольшего разрежения (в точке минимального давления в потоке над поверхностью крыла)

$$\overline{p_{\min}} = \frac{2(p_{\min} - p_0)}{\rho V^2}$$

и помня о том, что кавитация наступает при $p_{\min} \leq p_d$, нетрудно установить зависимость

$$\chi = -\overline{p_{\min}}.$$

Сопоставление χ и $\overline{p_{\min}}$ позволяет оценивать режим обтекания:

– $\chi > \overline{p_{\min}}$ – бескавитационное обтекание;

– $\chi \approx \overline{p_{\min}}$ – начало кавитации, охватывающей небольшую область поверхности в районе наименьшего давления (пузырчатая кавитация);

– $\chi < \overline{p_{\min}}$ – кавитационное обтекание, при котором область кавитации распространяется почти по всей верхней стороне крыла (II и III стадии кавитации).

При некотором критическом значении $\chi_{\text{кр}}$ кавитация охватывает всю поверхность крыла и наступает суперкавитация. Более подробно это явление описано в работах В.Л. Поздюнина.

χ и $\overline{p_{\min}}$ зависят от глубины погружения крыла, скорости его движения, относительной толщины профиля и формы крыла в целом. Располагая значением глубины погружения крыла и его скоростью, число кавитации легко определить по формуле (2.1). Определение \bar{p} является более сложной задачей, поскольку здесь существенное значение играет форма профиля. В литературе приводятся графики Гутше, по которым в зависимости от \bar{c} и \bar{C}_y можно опре-

делить коэффициент разрежения $\overline{p_{\min}}$ для глубокопогруженных крыльев с сегментными профилями. Для сегментных профилей В.М. Лаврентьев ввел формулу

$$\overline{p_{\min}} = 4,8c + 0,4C_y,$$

которой и можно воспользоваться в предварительных расчетах. Эта формула пригодна лишь для глубокопогруженного крыла. Для малопогруженных крыльев, вследствие влияния свободной поверхности, разрежение уменьшается, что можно учесть коэффициентом

$$q = \frac{\overline{p_{\min}}}{(\overline{p_{\min}})_{h=\infty}}.$$

Здесь $\overline{p_{\min}}$ – коэффициент разрежения (давления) у поверхности крыла вблизи свободной поверхности;

$(\overline{p_{\min}})_{h=\infty}$ – коэффициент давления у поверхности глубокогогруженного крыла.

Коэффициент q может быть определен по предлагаемому здесь выражению, полученному аппроксимацией экспериментальной зависимости $q = \bar{f}(h)$ для сегментных профилей с нагруженностью крыла в пределах $\bar{C}_y = 0,1-0,3$:

$$q = 0,856\bar{h}^{1/8} - 0,076\frac{1}{\bar{h}}.$$

Максимальная скорость бескавитационного обтекания может быть определена по формуле

$$V = \sqrt{\frac{2(p_{\text{атм}} + \gamma h + p_d)}{\rho q(\overline{p_{\min}})}}.$$

Для отдаления кавитации крыльев необходимо применять наиболее тонкие профили с малыми углами атаки, что обеспечивает равномерность распределения давления (без пиков p_{\min}) и невысокую нагруженность крыла, т. е. небольшие значения C_y . Однако уменьшение толщины профиля ограничивается условием обеспечения прочности крыльев. Поэтому при высоких скоростях движения на плавно обтекаемых крыльях избежать кавитации невозможно. В реальных условиях максимальная скорость бескавитационного обтекания для малопогруженных крыльев составляет не более 65–70 уз, а для глубокогогруженных – не более 54 уз. Для достижения больших скоро-

стей необходимо применение суперкавитирующих крыльев (рис. 2.12), которые устойчивы против начальных стадий кавитации (благодаря острому тонкому носу профиля), а при дальнейшем ее развитии обеспечивают быстрое образование паровоздушной устойчивой каверны. Дальнейший рост подъемной силы с увеличением скорости движения обеспечивается одной нижней нагнетательной стороной, поскольку давление на засасывающей (верхней) стороне не понижается, а остается постоянным, равным давлению насыщенных паров.

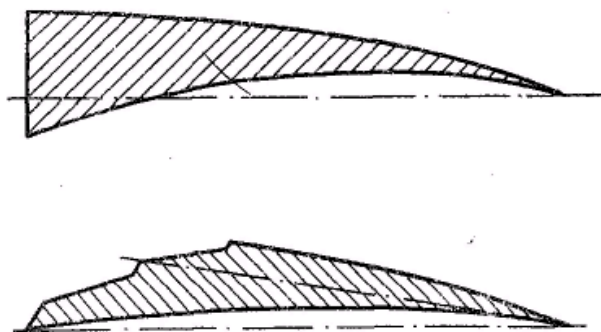


Рис. 2.12. Профили суперкавитирующих крыльев

Принципиально применение крыльев с суперкавитирующими профилями позволит получить любые большие значения скоростей СПК, какие только может обеспечить энергетическая установка. Однако практическое внедрение суперкавитирующих профилей обусловлено целым рядом трудностей, и в настоящее время создание СПК со скоростями $V \geq 100$ уз представляется весьма сложной задачей. Во-первых, трудно создать профиль, обеспечивающий устойчивую каверну в широком диапазоне скоростей. На малых скоростях такие профили неэффективны и требуются дополнительные крылья больших площадей для выхода судна на крыльевой режим движения. Во-вторых, при высоких скоростях малые размеры крыльев, достаточные для создания необходимой подъемной силы, не обеспечивают нужную прочность крыльев.

2.3. Конструктивные типы подводных крыльев и их мореходные особенности

Из целого ряда требований, которым должны удовлетворять подводные крылья, безусловно, важнейшим является требование обеспечения стабилизации движения судна. При движении судно должно сохранять предусмотренное в проекте положение по высоте над уровнем воды, по углу ходового дифферента и идти без крена в условиях как спокойной, так и взволнованной водной поверхности. Для этого необходимо, чтобы устанавливаемые на судне крылья, каждое в отдельности и крыльевая система в целом, обладали способностью регулировать подъемную силу при изменении глубины погружения крыльев, вызванной изменением скорости, нагрузки судна, волновой поверхностью воды и другими возможными причинами. При неизменных параметрах движущегося судна сущность регулирования подъемной силы состоит в сохранении ее постоянства, которое может нарушаться или по случайным причинам, или в результате непрерывного воздействия волновой поверхности. Регулирование подъемной силы может быть достигнуто на основе использования влияния свободной поверхности воды, изменения смоченной (рабочей) поверхности крыльев, принудительного изменения углов атаки, искусственного изменения давления на рабочих поверхностях крыла путем подвода к ним воздуха.

По этим признакам различают следующие конструктивные типы крыльев:

- малопогруженные, работающие вблизи свободной поверхности;
- полупогруженные, пересекающие свободную поверхность;
- лестничные (этажерочные);
- механизированные управляемые;
- вентилируемые управляемые;
- глиссирующие поверхности.

Рассмотрим особенности перечисленных типов крыльев.

2.3.1. Малопогруженные крылья

У плоских (или слабокилеватых) полностью погруженных крыльев, работающих при малых относительных погружениях ($0,1 < h < 0,5$),

постоянство подъемной силы поддерживается благодаря влиянию свободной поверхности. При увеличении скорости движения судна рост подъемной силы сдерживается в результате ее уменьшения при приближении к свободному уровню воды, а падение подъемной силы с уменьшением скорости восстанавливается вследствие погружения крыла. Таким образом, у малопогруженных крыльев происходит саморегулирование подъемной силы без каких-либо дополнительных средств.

Малопогруженные крылья впервые были применены на отечественных судах типов «Ракета» и «Метеор», спроектированных под руководством Р.Е. Алексеева. Они обеспечивают высокое гидродинамическое качество, малую ходовую осадку, легкость и простоту крыльевого устройства и являются лучшим типом крыльев для речных СПК. Основным недостатком этих крыльев является то, что они обеспечивают судам низкую мореходность.

Крылья близко расположены к свободной поверхности, и при движении в условиях даже небольшого волнения ($h_b \approx 0,5 \cdot b$) из-за постоянной и резкой перемены погружения крыла (то под вершиной, то под впадиной волны) возникают значительные колебания подъемной силы. При короткой крутой волне в положении крыла во впадине иногда к крылу прорывается атмосферный воздух и «оголяет» его, что обуславливает резкий срыв подъемной силы (до 70 %). Колебание подъемной силы вызывает качку судна сопровождаемую ощутимыми перегрузками, что отрицательно сказывается на обитаемости.

На многих отечественных СПК для улучшения их мореходных качеств поставлены малопогруженные стреловидные крылья с углом стреловидности $\chi = 30\text{--}40^\circ$. Площадь таких крыльев оказывается существенно разнесенной по длине судна, так что отдельные ее участки работают в различных фазах волновой поверхности (рис. 2.13). Это уменьшает диапазон колебания подъемной силы, поскольку, например, ее уменьшение в одной части площади крыла, находящейся под впадиной волны, компенсируется возрастанием в другой части, находящейся под вершиной волны. Опыт эксплуатации показал, что стреловидные крылья эффективны только на коротких встречных ветровых волнах, длина которых соизмерима с протяженностью крыла по длине судна.

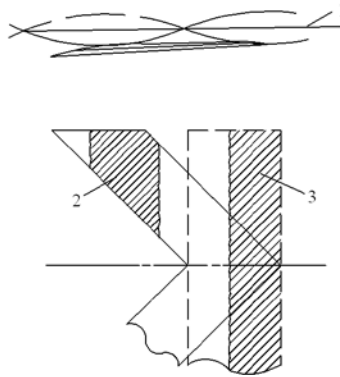


Рис. 2.13. Стреловидное и прямое крылья в условиях волнения:
 1 – уровень спокойной воды; 2 – оголенная площадка стреловидного крыла;
 3 – оголенная площадка прямого крыла

Килеватость малопогруженного крыла (рис. 2.14, *а*) также увеличивает его мореходные качества. Средняя часть крыла оказывается более заглубленной и в меньшей степени подвергается воздействию свободной волновой поверхности. Сочетание килеватости и стреловидности (рис 2.14, *б*) позволяет получить крылья повышенной мореходности при встречном волнении. Но такие крылья, как показал опыт, в условиях движения на попутном волнении уступают килеватым прямым крыльям, выполненным по схеме рис. 2.14, *в*.

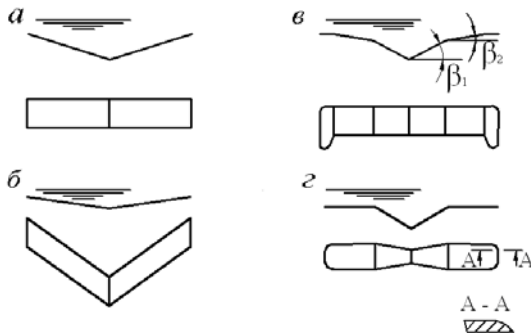


Рис. 2.14. Форма малопогруженных крыльев повышенной мореходности:
 а – килеватое прямое; б – килеватое со стреловидностью; в – сложнокилеватое
 (с переменной килеватостью); прямое с уширенными концами;
 г – плоское с заглубленной средней частью (крыло «чайка»)

Здесь следует иметь в виду, что на поведение крыла при волнении влияет не только волновая форма свободной поверхности, но и орбитальные скорости движения частиц воды, которые изменяют направление набегающего на крыло потока, т. е. угол атаки, что приводит к увеличению или уменьшению подъемной силы в зависимости от места положения крыла по фазе волны и направления движения судна относительно волн. В отдельных случаях влияние орбитальных скоростей может привести к срыву крыльевого режима (выскакивание крыла из воды или его провал). Мореходность СПК на малопогруженных крыльях возрастает с увеличением абсолютных размеров судна, но в принципе применение этих крыльев в морских условиях возможно лишь для судов прибрежного плавания.

2.3.2. Полупогруженные крылья

Эти крылья, как и малопогруженные, являются саморегулируемыми. У полупогруженных, пересекающих свободную поверхность крыльев регулирование подъемной силы в зависимости от скорости судна обеспечивается изменением площади смоченной поверхности. Конструктивно они выполняются в виде *V*-образных, трапециевидных или дугообразных крыльев (рис. 2.15). В результате эксплуатации *V*-образных крыльев с постоянным углом килеватости и одинаковой хордой по всему размаху, широко применявшихся в начальный период развития СПК, наряду с положительными качествами в отношении мореходности выявлен их существенный недостаток по устойчивости: с увеличением скорости движения судна погружение и размах *V*-образного крыла уменьшаются, что приводит к потере поперечной остойчивости на ходу. Этот недостаток заметно снижается при выполнении крыла с переменной хордой. Эффективность такого мероприятия повышается, если одновременно крыло выполнить с плавно меняющимися по размаху толщиной профиля и установочными углами атаки: в нижней части крыла профиль делать более тонким (для уменьшения коэффициента подъемной силы), а углы атаки меньшими, чем в верхней части.

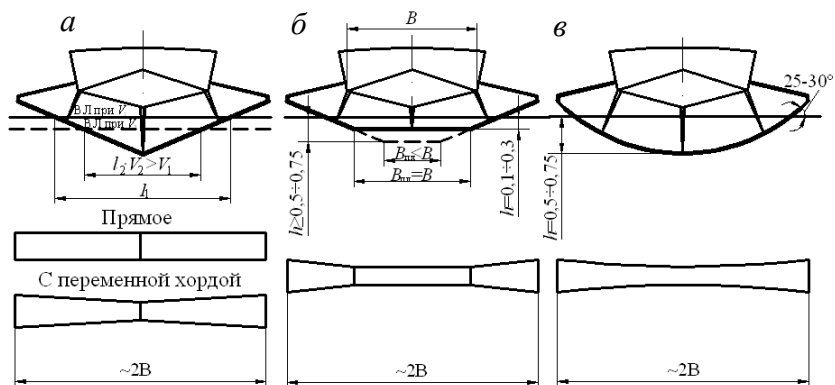


Рис. 2.15. Конструктивные типы полупогруженных крыльев, пересекающих свободную поверхность:
a – V-образное; *б* – трапециевидное; *в* – дугообразное

На рис. 2.16 показаны V-образные крылья, пересекающие свободную поверхность, которые используются на современных мореходных судах, проектируемых фирмой «Супрамар». Например, носовое крыло одного из лучших зарубежных морских СПК РТ-50 представляет собой V-образное прямое крыло с переменными, прогрессирующими от ДП к борту килеватостью и установочными углами атаки. Средняя (нижняя) часть крыла с внешней килеватостью 19° на протяжении примерно $0,5B$ имеет профиль Вальхнера, далее в районе ходовой ВЛ – сегментный профиль, а бортовые части, как дополнительные площади для выхода на крыльевой режим и стабилизаторы поперечной остойчивости, выполнены значительно более широкими с выпукло-вогнутым профилем. Подобные крылья обладают достаточно высокими гидродинамическими и мореходными качествами, но сложны в изготовлении.

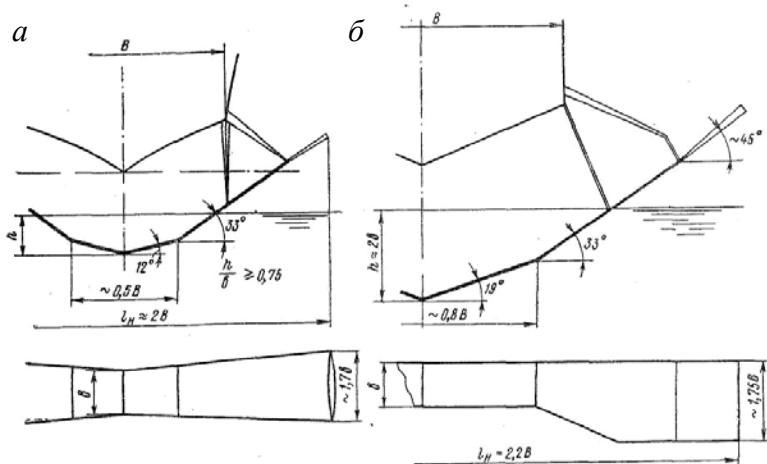


Рис. 2.16. Полупогруженные V-образные крылья переменной килеватости, применяемые на судах фирмы «Супрамар» (крылья Г. Шертеля):
a – небольшие мореходные катера; *б* – СПК РТ-50 и другие крупные суда

Трапециевидное крыло (рис. 2.15, *б*) представляет собой сочетание плоского полностью погруженного крыла с наклонными бортовыми участками, пересекающими свободную поверхность аналогично V-образному крылу. По своим гидродинамическим качествам трапециевидные крылья близки к плоским малопогруженным крыльям, но превосходят их по мореходности, вертикальной и поперечной остойчивости. Как и у V-образных крыльев, для обеспечения поперечной остойчивости наклонные части трапециевидных крыльев должны выполняться с уширением кверху и с увеличенными на $1-2^\circ$ установочными углами атаки с применением выпукловогнутой поперечной профилировки.

Для речных условий плоскую часть целесообразно делать значительной по размаху (не меньше ширины корпуса) с расчетом на относительное углубление в пределах $\bar{h} = 0,1-0,3$. Для морских судов, наоборот, плоскую часть следует принимать меньше ширины корпуса с рабочим углублением не менее $0,5-0,75$ хорды.

На отечественных судах типа «Комета-М» применены V-образные крылья с плоской вставкой в середине (рис. 2.17). Их можно отнести

к трапециевидным крыльям с короткой глубокопогруженной ($\bar{h} = 2$) плоской частью, однако по мореходным качествам они практически одинаковы с V-образными при условии, если длина вставки не превышает 20–25 % длины (размаха) смоченной поверхности. В отличие от V-образных крыльев Шертеля килеватость на крыльях теплохода «Комета-М» к бортам не увеличивается, а, наоборот, уменьшается, но «закрутка» (увеличение установочных углов атаки) сохраняется. Уширенные концы крыльев здесь превращаются, по существу, в малопогруженные элементы и хорошо обеспечивают поперечную стабилизацию, эффективно снижая амплитуду бортовой качки при волнении.

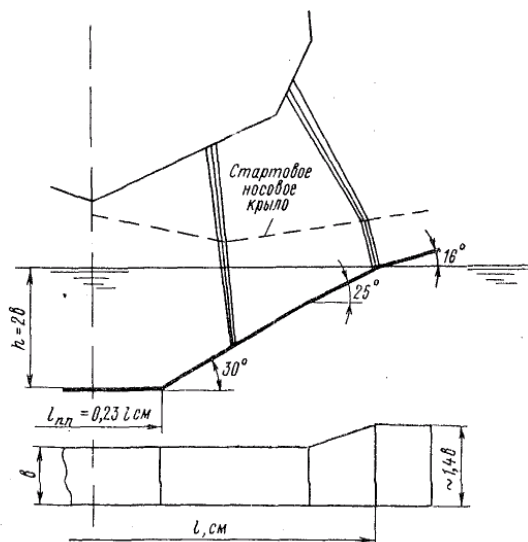


Рис. 2.17. Носовое крыло мореходного СПК «Комета-М»

Полупогруженными являются и дугообразные крылья (рис. 2.15, в), применявшиеся на некоторых зарубежных СПК. По своим мореходным качествам они близки к трапециевидным, но сложнее их в изготовлении и в настоящее время применяются редко.

2.3.3. Этажерочные крылья

Различные схемы этажерочных крыльев показаны на рис. 2.18. Обычно они выполняются как отдельные крылья: одно крыло состоит из двух крыльев, разделенных корпусом в виде рам, состоящих из двух боковых стоек, между которыми вставлены несущие плоскости-крылья. Иногда крылья крепятся консольно к одной центральной стойке (рис. 2.18, б). Для плавного регулирования подъемной силы плоскости крыльев должны ставиться наклонно, так как при горизонтальном расположении (рис. 2.18, а) изменение суммарной погруженной площади крыльев происходит скачкообразно, что может быть причиной возникновения вертикальных автоколебаний, недопустимых по условию обитаемости. Верхние плоскости лестничных (этажерочных) крыльев для увеличения подъемной силы при выходе судна на крыльевой режим делают шире и с большим установочным углом атаки по сравнению с нижними плоскостями. Нижние пластины целесообразно делать более узкими (по хорде) и с меньшими установочными углами для уменьшения вероятности «выскакивания» всего крыла из воды при движении судна в условиях волнения на предельных скоростях, когда необходимая подъемная сила создается лишь одними нижними пластинами.

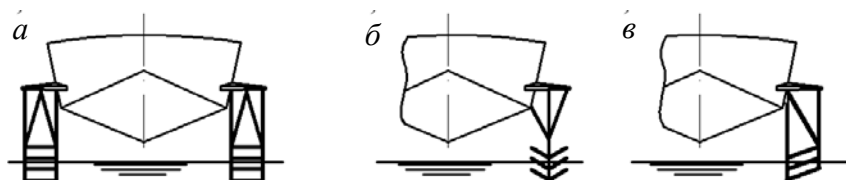


Рис. 2.18. Этажерочные (лестничные) крылья:

а – с горизонтальными плоскостями крыльев; б – консольные с V-образными плоскостями; в – с наклонными плоскостями

2.3.4. Управляемые крылья

Наименее подверженными влиянию взволнованной поверхности, а следовательно, и наиболее мореходными являются глубокопогруженные крылья (ГПК). Однако они не обладают самостабилизацией,

и их использование возможно лишь при дополнительных устройствах и оборудовании, обеспечивающих искусственные способы регулирования подъемной силы.

Существует несколько типов управляемых крыльев, отличающихся как принципом регулирования подъемной силы, так и способом управления процессом ее изменения. Отметим некоторые из них.

Глубокопогруженные механизированные крылья, управляемые электронными системами автоматической стабилизации. Заметим, что механизированными называются крылья, подъемная сила которых регулируется изменением угла атаки всего крыла или отдельных его частей (закрылков). Применяются как полноповоротные крылья, так и крылья с закрылками. Первые обладают более высоким гидродинамическим качеством, но возникают трудности при их конструктивном оформлении. Использование закрылков позволяет применять более легкие приводы, но осложняется возникновением кавитации в районе щелей и петель, что приводит к эрозионному износу и снижению гидродинамического качества.

В состав электронной системы автоматического управления подводными крыльями (электронная САУПК) входят следующие элементы и приборы:

– **органы управления подъемной силой** – закрылки, полноповоротные крылья;

– **органы управления курсом** – рули, поворотные стойки, крылья, закрылки;

– **исполнительный привод**, состоящий обычно из электрогидравлического преобразователя и силового гидроцилиндра;

– **датчики** – элементы или приборы, регистрирующие отклонение судна от заданного (расчетного) положения по высоте, крену и дифференту с учетом динамичности (ускорений) этих процессов. От датчиков сигналы поступают в блок предварительных усилителей и преобразователей, отсюда – к сервоусилителям, затем – к преобразователям электрических сигналов в механическое перемещение распределительных клапанов, которые и включают (или выключают) в действие исполнительные приводы САУПК. В электронных САУПК на СПК используются в качестве:

датчиков крена (и дифферента) – авиационные гировертикали;

датчиков ускорения – акселерометры авиационного типа;

датчиков высоты – ультразвуковые датчики, которые состоят из излучателя и приемника, размещенных снаружи (в углублениях) в носовой части и электронного вычислительного блока. Последний определяет горизонтальный уровень движения судна по временно-му интервалу между посылаемым и отраженным сигналами. В связи с высокой стоимостью ультразвуковых датчиков используются также датчики контактного типа, которые, однако, уступают ультразвуковым по обеспечению режима подслеживания, поскольку контактный принцип исключает возможность прогнозирования размеров набегающих волн.

Глубокопогруженные крылья, управляемые электронными автоматическими системами, обеспечивают высокую стабилизацию движения СПК и дают возможность получить приемлемую для пассажиров степень комфортабельности с вертикальными перегрузками, не превышающими $0,25g$. Однако широкое внедрение таких управляемых ГПК на пассажирских судах сдерживается сложностью и высокой стоимостью электронных автоматических систем, к которым предъявляются исключительно жесткие требования в отношении надежности, поскольку выход САУПК из строя лишает судно возможности двигаться в крыльевом режиме.

Глубокопогруженные крылья с механической системой автоматического управления. Идея использования простых механических систем для управления глубокопогруженными крыльями относится к самому начальному периоду создания СПК. Определенных практических успехов в области создания механизированных автоматически управляемых ГПК добился американский инженер Х. Гук, который в период 1942–1951 гг. провел серию экспериментов на самоходных моделях и создал достаточно совершенную крыльевую систему с управляемыми крыльями (рис. 2.19). Показанные на схеме устройства являются самостоятельными для левого и правого бортов для двух отдельных крыльев, благодаря чему обеспечивается поперечная устойчивость при движении судна.

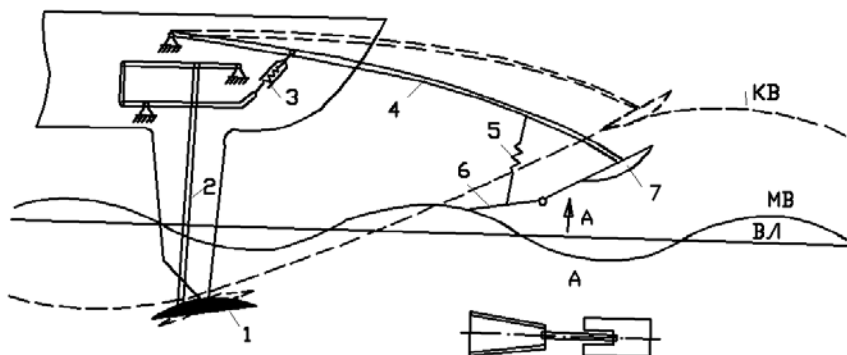


Рис. 2.19. Принципиальная схема крыльцевого устройства Х. Гука:
 1 – основное крыло; 2 – основная тяга; 3 – демпфер; 4 – выносная штанга-кронштейн; 5 – пружина; 6 – глиссирующая пластина; 7 – вспомогательное крыло; ВЛ – расчетная ватерлиния на тихой воде; МВ – малые волны, на которые система не реагирует; КВ – крутая волна, отклоняющая крыло 1

Элементы следящей системы (крыло 7 и пластина 6), вынесенные перед судном, обеспечивают изменение угла атаки носового крыла с некоторым упреждением, в результате чего нос судна успевает подняться над волной, которая и проходит под корпусом без соударения с ним; при прохождении впадины нос судна плавно опускается. Подъем и опускание носа, обуславливая дифферент судна, вызывают изменение угла атаки жестко закрепленного кормового крыла, в результате чего одновременно с носом (с некоторым сдвигом по фазе) корма всплывает или опускается. Таким образом, все судно целиком всплывает или опускается, следуя при своем движении за профилем волны, но с меньшей амплитудой вертикального перемещения центра тяжести.

Система Х. Гука получила в США некоторое распространение на морских СПК типа разъездных, прогулочных, спортивных и других небольших катеров. Недостатками этой системы являются малая механическая прочность и большая вероятность повреждения следящего устройства.

С развитием электронных САУПК интерес к механическим системам снизился, и в течение относительно длительного периода (около 10 лет) их совершенствованием занимались мало. Но когда в

результате анализа технико-экономической эффективности стало ясно, что применение сложных и дорогостоящих электронных САУПК во многих случаях не может быть оправдано, проектировщики СПК снова обратились к механическим системам. Так, в 1964 г. в Италии фирма «Родригес» (г. Мессина) начала серийную постройку небольших пассажирских морских СПК типа «Сифлайт», оборудованных механизированными управляемыми крыльями системы Пьеца.

Принцип действия управляемых крыльев по схеме Пьеца показан на рис. 2.20. Два отдельных носовых крыла, пересекающих свободную поверхность, укреплены на горизонтальных осях 2 и вместе с ними могут поворачиваться, изменяя тем самым угол атаки. В плоскостях стоек 3 к осям 2 прикреплены рычаги 4, свободные концы которых упираются в пружины 5. Натяжение пружины может регулироваться штурвалами 6. Под воздействием гидродинамических сил P (главный гидродинамический вектор) крыло стремится повернуться относительно оси 2, чему препятствует сжатие T пружины 5. Очевидно, что система будет находиться в равновесии при условии $Pl = Ta$. Если это условие при движении нарушается, то система вступает в действие. Например, уменьшилась скорость движения. Следовательно, уменьшилась P и условие равновесия превратилось в неравенство $Pl < Ta$.

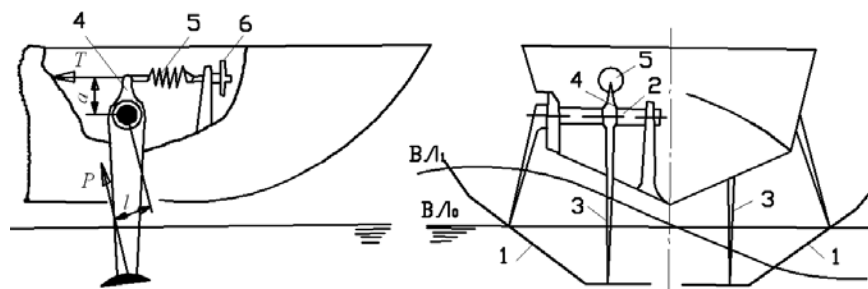


Рис. 2.20. Крыльевое устройство Пьеца:

- 1 – отдельные крылья; 2 – ось поворота крыльев; 3 – стойки крыльев, укрепленные на осях 2; 4 – рычаг поворота стойки крыла; 5 – пружина;
6 – штурвал натяжения пружины

Поскольку Ta больше Pl , крыло начинает поворачиваться так, что угол атаки увеличивается. Это будет происходить до тех пор, пока подъемная сила на крыле не достигнет своего расчетного значения, т. е. когда наступит равенство $Pl = Ta$. Таким образом, в системе Пьеза регулирование подъемной силы непосредственно связано с самим изменением ее величины. Процесс регулирования проходит в последовательности: «изменение подъемной силы – изменение угла атаки», а не наоборот, как в системе Гука. Поэтому крылья Пьеза не всплывают при замывании их вершиной волны и не погружаются при прохождении впадины волны, так как колебания подъемной силы (возрастание под вершиной волны и уменьшение под впадиной) снимаются соответствующим изменением углов атаки крыла. Крыло не следует за профилем волны и тем самым исключает зарывание носа судна в волну, обеспечивает хорошую вертикальную стабилизацию с малой амплитудой вертикальной качки. Другим положительным свойством стабилизации по системе Пьеза с раздельными крыльями является поперечная устойчивость судна при движении лагом к волне (рис. 2.20, ВЛ₁). Это объясняется просто: одно крыло, находящееся под вершиной волны, отклоняется в корму с уменьшением угла атаки (подъемная сила будет уменьшаться), а другое – в нос с увеличением угла атаки (подъемная сила будет увеличиваться), и в результате судно стремится сохранить свое вертикальное положение. К преимуществам системы Пьеза следует также отнести следующие свойства:

- легкий выход судна на крыльевой режим без высокого «горба» сопротивления за счет больших углов атаки крыльев на малых скоростях;

- продольную остойчивость на попутном волнении, которую трудно обеспечить на судах со стационарными неуправляемыми крыльями;

- надежность при достаточно простой конструкции.

В целом простая и надежная система управляемых крыльев Пьеза представляет практический интерес.

В 1966 г. в США было построено пассажирское СПК «Флаинг Клауд» с механически управляемыми крыльями Роупера. Схема общего устройства этих крыльев приведена на рис. 2.21. Полностью погруженное крыло 2 снабжено поворачивающимся закрылком 4.

На задней кромке крыльевой стойки *1* навешены пластинчатые элероны *6*. Закрылок *4* и элероны *6* механически соединены между собой так, что поворот закрылки вызывает вращение элеронов (в противоположные друг другу стороны), и наоборот. В состав элементов механической связи элеронов с закрылком входят вертикальная тяга *5*, треугольное звено *8* и наклонные тяги *7*.

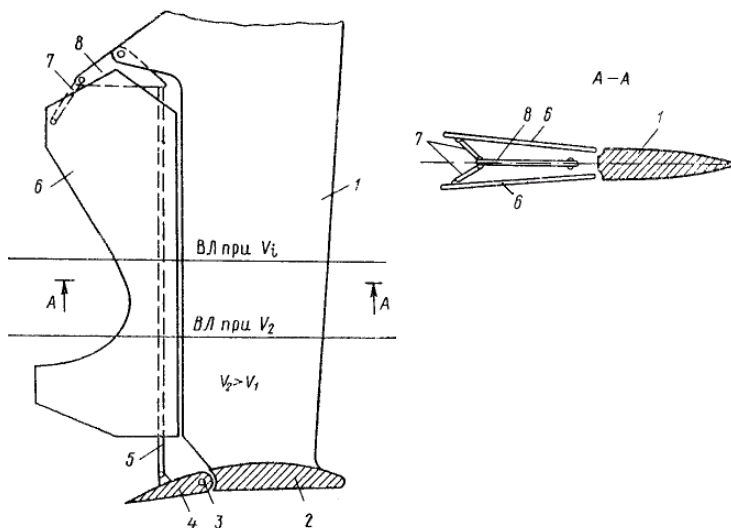


Рис. 2.21. Крыло Роупера:

1 – крыльевая стойка; *2* – крыло; *3* – ось закрылки; *4* – закрылка; *5* – вертикальная тяга; *6* – пластинчатые элероны; *7* – наклонные тяги; *8* – треугольное звено

При движении судна на закрылку и элероны действуют гидродинамические силы P_3 и P_6 , которые создают моменты, стремящиеся повернуть закрылку и элероны относительно своих осей:

– момент на закрылке, направленный на уменьшение угла атаки:

$$M_1 = P_3 x;$$

– суммарный момент на элеронах, стремящийся их сомкнуть:

$$M_2 = 2P_6 a.$$

По своему действию моменты противоположны, и система будет в равновесии при условии $M_1 = M_2$, которое определяет расчетное положение крыла по его углублению. Если по какой-то причине подъемная сила крыла, например, уменьшилась и оно начнет погружаться, то сразу же, вследствие увеличения погруженной площади элеронов, возрастает момент M_2 и элероны будут смыкаться. Смыкание элеронов через элементы механической связи обусловит увеличение угла атаки закрылка и, следовательно, всплытие крыла до тех пор, пока снова не наступит равновесие ($M_1 = M_2$).

При замывании элеронов гребнем волны они вследствие увеличения сил P_6 будут сближаться друг с другом, что вызовет перекадку закрылка на увеличение его угла атаки и, следовательно, подъемной силы крыла. Судно будет всплывать. При проходе крыла через впадину волны, наоборот, смоченная площадь элеронов уменьшится, уменьшатся и силы P_6 , элероны будут расходиться и последующее за этим уменьшение угла атаки закрылка обусловит погружение крыла. Таким образом, крыло Роупера при движении в условиях волнения стремится следовать за профилем волны. Слежение крыла за профилем волны вследствие инерционности системы и в зависимости от ее чувствительности идет со сдвигом по фазе волны и с другой амплитудой. Чувствительность системы и ее реакция на внешние возмущения зависят от формы элеронов, определяющих интенсивность и характер изменения их смоченной площади при всплытии или погружении крыла, а также от кинематики механического привода, определяющей характер изменения соотношения значений углов отклонения элеронов и закрылка. При выбранных параметрах системы чувствительность ее будет зависеть от скорости движения.

С увеличением скорости гидродинамическая сила на закрылке растет быстрее, чем сила P_6 , вследствие большей эффективности подводного закрылка (кривая изменения коэффициента подъемной силы C_y от угла атаки для подводного закрылка более крутая, т. е. она имеет больший угол наклона, чем угол наклона для вертикальных элеронов) и вследствие того, что при всплытии крыла смоченная площадь элеронов уменьшается. При уменьшении скорости, наоборот, подъемная сила закрылка падает быстрее, чем боковые силы P_6 , так как рабочая (смоченная площадь) элеронов увеличивается в результате погружения крыла. Таким образом, равновесие

системы, выражаемое условием $M_1 = M_2$, должно обеспечиваться при малых отклонениях закрылка на больших скоростях судна и при больших его отклонениях – на малых скоростях.

Форма элеронов, показанная на рис. 2.21, наилучшим образом отвечает вышеотмеченным особенностям работы системы. Она целесообразна и для работы крыльев в условиях волнения. При расчетных значениях скорости и углубления крыла система будет обладать минимальной реакцией на волны небольшой высоты и повышенной реакцией при больших волнах. Последнее положительно сказывается на мореходности СПК, предотвращая удары крупных волн о корпус, но при повышенной реакции системы на волновые возмущения увеличиваются вертикальные перегрузки, что отрицательно сказывается на обитаемости судна.

Управляемые крылья Роупера достаточно просты по конструкции и надежны в эксплуатации. К их недостаткам можно отнести повышенное сопротивление крыльевых стоек с отклоняющимися элеронами, а также неудовлетворительную поперечную остойчивость при ходе судна лагом к волне.

Вентилируемые крылья. Вентилируемыми называются крылья, подъемная сила которых через САУПК регулируется подачей воздуха к их рабочим поверхностям. К засасывающей поверхности, т. е. в зону пониженного давления, можно подавать («самотеком») атмосферный воздух, а в зону повышенного давления, т. е. к нагнетательной поверхности крыла, возможна подача лишь сжатого воздуха, что, конечно, представляется уже более сложной задачей практического осуществления аэрации крыла. Однако и на нагнетательной поверхности крыла не исключены случаи пониженного давления (например, под воздействием орбитальных движений частиц воды при попутном волнении), когда полезным оказывается простой подвод атмосферного воздуха.

При подаче воздуха в разреженную зону давление у поверхности крыла возрастает до атмосферного, характер обтекания профиля меняется и подъемная сила падает. Если воздух будет подведен к нагнетательной стороне, подъемная сила крыла возрастает.

Изменение подъемной силы крыла при его вентилировании зависит от количества подаваемого воздуха, а также от местоположения (по хорде крыла) рядов воздухоподводящих отверстий. Необходимое количество подаваемого воздуха может быть оценено коэффициентами расхода воздуха:

$$C_Q = \frac{Q}{S_a V},$$

где Q – объем воздуха, расходуемый на вентиляцию, м³/с;
 S_a – площадь вентилируемой (аэрируемой) части крыла, м²;
 V – расчетная скорость судна, м/с.

Эксперименты и натурные данные показывают, что состояние полной аэрации или полного насыщения, когда достигается возможно максимальное снижение подъемной силы вентилированием, наступает при $C_Q = 0,0045$. При этом суммарная площадь отверстий, подводящих воздух, должна составлять не меньше 1 % от вентилируемой площади крыла. Установлено также, что наиболее выгодным с точки зрения эффективности изменения подъемной силы является расположение ряда воздухоподводящих отверстий примерно на середине (по хорде) крыла. Однако при этом существенно возрастает сопротивление, и поэтому постоянная или режимная подача воздуха для поддержания расчетного значения подъемной силы обычно осуществляется через задний ряд отверстий, а когда после насыщения требуется дальнейшее уменьшение подъемной силы, включается и передний ряд отверстий.

Для регулирования подачи воздуха в пневмомеханической САУПК используются достаточно надежные и простые датчики: маятник, гироскопы (чувствительные к угловой скорости), манометры статического давления, приборы для определения глубины погружения крыла и др.

Система воздушной стабилизации движения является весьма чувствительной и быстродействующей, так что она реагирует даже на короткие небольшие волны. По сравнению с механизированными крыльями с электронной САУПК вентилируемые крылья имеют следующие преимущества:

- крылья не имеют подвижных частей (закрылков) и, следовательно, являются более простыми по конструкции и надежными в эксплуатации;
- блок датчиков управления состоит из более простых и надежных приборов;
- малые усилия на передвижку золотников и клапанов воздушной системы позволяют обходиться без мощных гидроприводов;

– на вентилируемых крыльях можно получить заметно большие скорости движения СПК в докавитационном режиме;

– система в целом более простая, надежная, намного дешевле электронной и не требует особой квалификации экипажа судна.

К недостаткам вентилируемых крыльев относятся следующие:

– повышенное сопротивление крыла (примерно на 5–6 %), в результате чего скорость СПК с вентилируемыми крыльями на тихой воде меньше по сравнению со скоростью однотипных судов, оборудованных обычными крыльями. Однако в условиях волнения благодаря уменьшению размахов качки и замывания корпуса СПК с вентилируемыми крыльями развивают большую скорость;

– увеличенная площадь вентилируемого крыла на 1 т создаваемой подъемной силы по сравнению с обычными погруженными крыльями.

В настоящее время благодаря своим преимуществам вентилируемые крылья получают распространение.

В дополнение к вышерассмотренному основному признаку классификации подводных крыльев, по которому они разделены на различные конструктивные типы в зависимости от способа регулирования (стабилизации) подъемной силы, можно назвать еще несколько признаков их классификации.

По способу крепления к корпусу судна подводные крылья разделяют на две группы:

– неподвижные или жестко скрепленные с корпусом крылья. Это обычный, наиболее распространенный тип крыльев;

– подвижные или убирающиеся крылья, которые крепятся с корпусом шарнирно (поворачивающиеся, откидные) или по какой-то другой подвижной схеме крепления так, что могут убираться из воды (или прижиматься к корпусу). Это бывает необходимо в целях уменьшения габаритной осадки судна при подходе к пирсу или же для обеспечения движения судна в водоизмещающем режиме, когда движение на крыльях невозможно (мелководье, сильное волнение, аварийное состояние крыльев). По количеству крыльевых стоек различают крылья на двух и большем количестве стоек и консольные крылья, крепящиеся на одной стойке.

По протяженности крыльев в поперечной плоскости судна различают монокрылья, у которых основная рабочая часть расположена под корпусом, а размах больше ширины корпуса, и отдельные

крылья, у которых основные рабочие площади расположены не под днищем, а за его пределами во внешнюю сторону от бортов. Чаще раздельными бывают носовые крылья, которые являются, по существу, отдельными самостоятельными крыльями, расположенными в одной поперечной плоскости судна.

По расположению крыльев по длине судна различают носовые, кормовые и средние крылья.

По назначению можно выделить следующие типы крыльев:

- основные несущие крылья, которые поддерживают судно в надводном положении в крыльевом режиме движения;

- дополнительные или вспомогательные крылья. Это крылья (обычно расположенные в нос или корму от главного крыла), которые несут незначительную нагрузку и, по существу, выполняют роль стабилизаторов, обеспечивающих устойчивость движения СПК;

- стартовые крылья, обеспечивающие выход судна на основной режим движения. В крыльевом режиме движения судна стартовые крылья находятся в надводном положении.

2.4. Крыльевые системы судов на подводных крыльях

Крыльевые системы СПК, как совокупность основных и вспомогательных крыльев, которыми оборудовано судно, характеризуются типом этих крыльев, их количеством, схемой расположения по судну и характером распределения массы судна в долях от водоизмещения по крыльям. Наряду с термином «крыльевая система» употребляются также и другие: «крыльевой несущий комплекс» или просто «крыльевой комплекс», «крыльевая схема», «крыльевое устройство». Все эти термины практически однозначны, хотя первый из них – «крыльевой комплекс» – скорее акцентирует внимание на гидродинамическую компоновку несущего комплекса, схему расположения и распределения нагрузки, а последний больше используется, когда речь идет об инженерно-конструктивных решениях по устройству крыльев и их компоновке на судне, в том числе учитываются и материал крыльевых конструкций, и весовые показатели, и вопросы эксплуатационной приспособленности и надежности.

Гидродинамическое качество СПК, мореходность, устойчивость движения, а также его технико-экономическая эффективность как

транспортной машины существенно зависят от совершенства крыльевого комплекса.

Более чем за 70-летний период развития СПК было запатентовано, разработано и испытано большое количество различных типов крыльевых систем. Многие из них так и остались в предложениях, другие – «однажды опробованными», но ряд различных типов крыльевых систем получил или получает достаточное распространение и применяется на СПК серийной постройки.

Гидродинамическое качество крылатого судна в целом и его мореходность зависят не только от типа крыльев, но и от того, как они расположены под корпусом и как масса судна распределена по крыльям.

В зависимости от схемы расположения крыльев и распределения массы судна на них различают следующие основные типы крыльевых систем (рис. 2.22):

– *самолетная или стандартная система*, в которой наибольшую нагрузку несет носовое крыло ($P_n \geq 0,65gD$, $P_k \leq 0,35gD$);

– *система «тандем»*, характеризующаяся примерно равномерным распределением массы судна по крыльям ($P_n \approx P_k \approx 0,5gD$);

– *система «утка»*, в которой главным является кормовое крыло ($P_k \geq 0,65gD$, $P_n \leq 0,35gD$).

Иногда выделяют так называемую *неуравновешенную систему «тандем»*, в которой нагрузка, приходящаяся на носовое крыло, лежит в пределах $0,5gD < P_n < 0,65 gD$, а на кормовое – в пределах $0,35gD < P_k < 0,5gD$.

Все эти системы могут состоять из любых конструктивных типов сплошных или раздельных крыльев. По гидродинамическому качеству в случае использования сплошных крыльев преимущество имеет самолетная схема, поскольку главное несущее (носовое) крыло имеет большой размах и работает в свободном потоке. При раздельных крыльях ни одна система не имеет особых преимуществ, но по мореходным качествам предпочтительной может оказаться система «утка».

Крыльевая система по самолетной схеме распределения нагрузки была впервые применена на катере, спроектированном под руководством немецкого инженера О. Титьенса. Главное несущее крыло дугообразной формы размещалось немного впереди центра тяжести судна и несло на себе нагрузку до 90 %. Кормовое крыло играло, по

существо, роль стабилизатора. Эксплуатация катера показала его недостаточную продольную остойчивость, особенно при ходе на волнении. Поэтому на современных СПК с самолетной схемой расположения крыльев носовое крыло проектируют на относительно меньшую нагрузку (0,65–0,7) D , удаляя его от ЦТ.

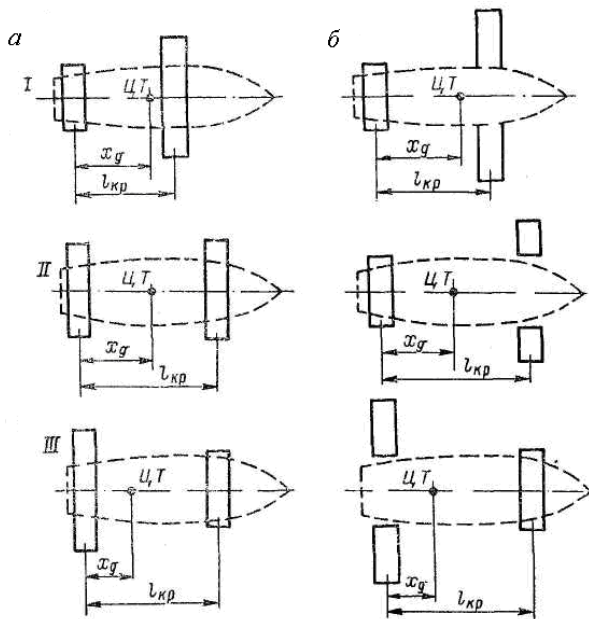


Рис. 2.22. Основные схемы расположения крыльев:

a – сплошные крылья; *б* – отдельные крылья;

I – самолетная $0,65 < \frac{x_g}{l_{кр}} < 1$; II – «тандем» $< 0,4 \frac{x_g}{l_{кр}} < 0,6$;

III – «утка» $0 < \frac{x_g}{l_{кр}} < 0,35$

Расположение крыльев по системе «утка» в настоящее время получает распространение на морских КПК с глубокопогруженными автоматически управляемыми крыльями.

Расположение крыльев по системе «тандем» имеет большинство морских зарубежных пассажирских СПК с полупогруженными крыльями Г. Шертеля и отечественные СПК с малопогруженными

крыльями. Крыльевые схемы некоторых отечественных судов приведены на рис. 2.23–2.25.

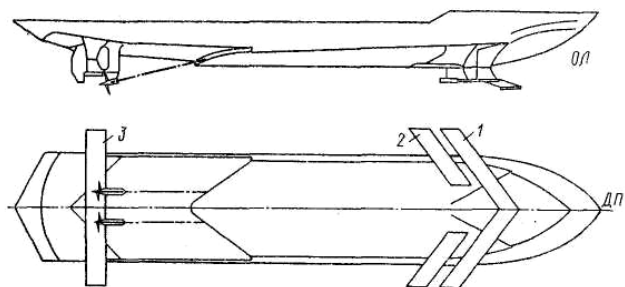


Рис. 2.23. Схема крыльевого устройства теплохода «Метеор»: 1 – носовое крыло; 2 – стартовое крыло; 3 – кормовое крыло

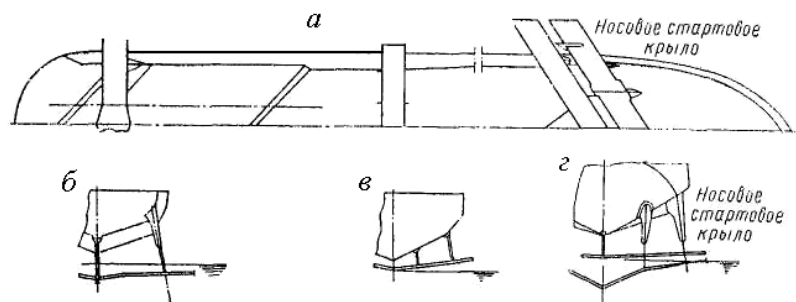


Рис. 2.24. Схема крыльевого устройства теплохода «Комета»: а – крылья в плане; б – кормовое крыло; в – среднее крыло; г – носовые крылья

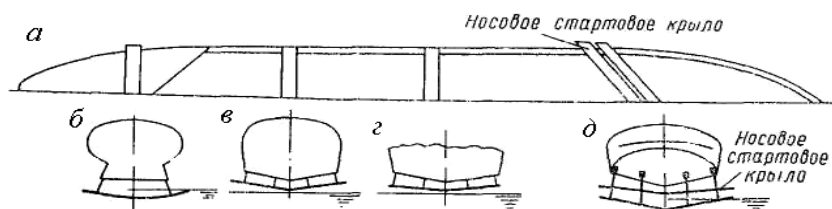


Рис. 2.25. Схема крыльевого устройства газотурбохода «Буревестник»: а – крылья в плане; б – кормовое крыло; в, г – средние вспомогательные крылья; д – носовые крылья

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. РАЗВИТИЕ СУДОВ НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ.....	4
1.1. Начальный период развития судов на подводных крыльях.....	4
1.2. Послевоенный период развития судов на подводных крыльях за рубежом.....	8
1.3. Отечественные суда на подводных крыльях.....	13
2. ПОДВОДНЫЕ КРЫЛЬЯ И КРЫЛЬЕВЫЕ СИСТЕМЫ.....	17
2.1. Геометрические характеристики крыльев.....	18
2.2. Гидродинамические характеристики подводного крыла.....	20
2.2.1. Влияние угла атаки на C_y, C_x и C_m	23
2.2.2. Влияние удлинения λ на C_y, C_x и K	25
2.2.3. Влияние глубины погружения на C_y и C_x	26
2.2.4. Влияние формы крыла на C_y и K	28
2.2.5. Влияние кавитации на работу крыла.....	30
2.3. Конструктивные типы подводных крыльев и их мореходные особенности.....	35
2.3.1. Малопогруженные крылья.....	35
2.3.2. Полупогруженные крылья.....	38
2.3.3. Этажерочные крылья.....	42
2.3.4. Управляемые крылья.....	42
2.4. Крыльевые системы судов на подводных крыльях.....	53

Учебное издание

БАРБАНЕЛЬ Борис Аронович
КАЧАНОВ Игорь Владимирович
ЛЕДЯН Юрий Павлович
ЩЕРБАКОВА Мария Константиновна

**КОНСТРУКЦИЯ
БЫСТРОХОДНЫХ СУДОВ**

Пособие для студентов специальности
1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая
эксплуатация водного транспорта»

В 3 частях

Часть 2

СУДА НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

Редактор *Т. Н. Микулик*
Компьютерная верстка *А. Г. Занкевич*

Подписано в печать 16.04.2012. Формат 60×84 ¹/₈. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 3,37. Уч.-изд. л. 2,64. Тираж 100. Заказ 1098.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.