



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный
технический университет

Кафедра «Кораблестроение и гидравлика»

И. В. Качанов
Ю. П. Ледян
М. К. Щербакова

КОНСТРУКЦИЯ БЫСТРОХОДНЫХ СУДОВ

Пособие

Часть 3



Минск
БНТУ
2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Кораблестроение и гидравлика»

И. В. Качанов
Ю. П. Лебян
М. К. Щербакова

КОНСТРУКЦИЯ БЫСТРОХОДНЫХ СУДОВ

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

В 3 частях

Часть 3

СУДА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

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

Минск
БНТУ
2015

УДК 629.12.001:531.2(075.8)

ББК 39.42-01я7

К65

Рецензенты:

А. А. Хмелев, В. В. Кулебякин

Качанов, И.В.

К65 Конструкции быстроходных судов : пособие для студентов специальности 1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта» : в 3 ч. / И. В. Качанов, Ю. П. Ледян, М. К. Щербакова; под науч. ред. И. В. Качанова. – Минск : БНТУ, 2011–2015. – Ч. 3 : Суда на воздушной подушке. – 2015. – 106 с.
ISBN 978-985-550-106-1 (Ч. 3).

В издании излагается информация по конструкции и принципам плавания одного из типов скоростных судов – судов на воздушной подушке, в последние годы получившим широкое распространение в мировом судостроении.

Пособие предназначено для студентов изучающих дисциплину «Конструкция скоростных судов».

Издается с 2011 года. Часть 2 «Суда на подводных крыльях», авторы Б. А. Барбанель, И. В. Качанов, Ю. П. Ледян, М. К. Щербакова, вышла в БНТУ в 2012 году.

УДК 629.12.001:531.2(075.8)

ББК 39.42-01я7

ISBN 978-985-550-106-1 (Ч. 3)

ISBN 978-985-552-509-4

© Качанов И. В., Ледян Ю. П.,
Щербакова М. К., 2015

© Белорусский национальный
технический университет, 2015

ВВЕДЕНИЕ

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.

Постройка судов до недавнего времени совершенствовалась исключительно 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 бурно переживает процесс второго рождения. Судовладельцы 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 воздушной подушки Кристофера Кокерелла и динамической подъемной силы Даниэля Бернулли [1].

Суда на воздушной подушке (СВП) – новый, продолжающий развиваться тип скоростного транспортного средства. Около одной трети всей мощности энергетической установки СВП затрачивается на создание воздушной подушки – подъем основного корпуса судна над водой, поэтому снижение веса – доминирующий фактор при проектировании корпусных конструкций СВП. Стремление снизить вес конструкций проявляется в применении легких алюминиевых сплавов как основного корпусного материала, в специфике конструктивных элементов и конструировании корпусных деталей, в применении методов проектирования, обеспечивающих возможный минимум веса корпусных конструкций.

В становлении собственных проектировочных подходов, характерных для корпусных конструкций СВП, наиболее подходящим оказывается опыт создания самолетных конструкций.

Изучение принципиальных особенностей конструкций корпуса СВП – главная цель пособия. Для проектирования корпусных конструкций СВП предлагаются упрощенные оптимизационно-поисковые процедуры методов математического программирования. Критерий проектирования – вес конструкции, ограничения – надежность, требования надежности [2].

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СУДАХ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

1.1. Развитие судов на воздушной подушке

Идея создания воздушной подушки (ВП) для подъема корпуса судна над поверхностью воды возникла много десятилетий тому назад.

Научно-теоретическое обоснование и принципы расчетов по движению аппаратов на воздушной подушке впервые дал К.Э. Циолковский в работе «Соппротивление воздуха и скорый поезд» (1927).

В этой работе К.Э. Циолковский тщательно проанализировал и обосновал возможность создания поезда (вагона) на воздушной подушке, движущегося по специальному полотну в результате реактивного воздействия потока воздуха, вырывающегося из-под поезда в противоположном его движению направлении. В работе выведены формулы, которые позволяют определить необходимое давление воздушной подушки и ее высоту, расход воздуха и мощность нагнетателя, а также и ряд других проектных параметров поезда в зависимости от его массы и скорости. Теоретические формулы К.Э. Циолковского являются основополагающими и в современной теории СВП [3].

В 1937–1940 гг. в СССР коллективом специалистов под руководством проф. В.И. Левкова были созданы амфибийные катера на воздушной подушке нескольких типов с отличными ходовыми качествами на тихой воде [4].

Характерной особенностью схем общего устройства катеров является большая высота камерного пространства, ограниченного сверху плоским днищем, а с бортов – водоизмещающими скегами-поплавками и полностью открытого в носу и корме. Катера В.И. Левкова фактически имели катамаранные корпуса с открытым истечением воздуха из воздушной подушки в нос и корму. В качестве двигателей, приводящих в действие нагнетатели (двухлопастные воздушные винты), использовались поршневые авиационные двигатели, а необходимая для движения тяга создавалась по реактивному принципу за счет потока воздуха, направляющегося в корму с помощью специальных жалюзи, установленных под кормовым нагнетателем.

Испытания катеров Левкова, которые проводились на Балтике, выявили и ряд недостатков, среди которых можно отметить следующие:

– интенсивное забрызгивание палубы и рубки на малом ходу, так как отсутствие должного скоростного напора встречного воздуха позволяло воздуху выходить из воздушной подушки через открытое носовое пространство камеры;

– максимально достигнутая мореходность составляла 4 балла. При более крупном волнении удары волн в свод камеры повреждали направляющие жалюзи, брызги попадали на нагнетатели и двигатели, вызывая остановку последних;

– большая парусность и дрейф от ветра приводили к плохой управляемости на малом ходу; при полном отрыве суда становились неустойчивыми.

В своих творческих поисках профессор В.И. Левков был близок к осуществлению более совершенных мореходных судов на воздушной подушке, чему помешала война. Его роль в деле развития судов на воздушной подушке трудно переоценить.

Основные работы по исследованию и созданию современных судов на воздушной подушке за рубежом начались и стали бурно развиваться в конце 1950-х годов.

В 1955 г. англичанин К. Коккерел запатентовал судно на воздушной подушке с сопловой схемой ее формирования. В короткие сроки англичанам удалось построить и испытать опытные катера SR.N1, SR.N2, SR.N3 водоизмещением от 4 до 37 т. Были проведены экспериментальные работы, позволившие приступить к проектированию и строительству сначала небольших амфибийных катеров на воздушной подушке SR.N5, SR.N6 водоизмещением 6,8 и 9,25 т, рассчитанных на перевозку 20 и 38 пассажиров соответственно, а затем и паромов SR.N4 (254 пассажира и 32 автомобиля) [4].

Вследствие этого успеха интерес к судам на воздушной подушке резко повысился. Разработкой проектов и постройкой различных типов опытных образцов СВП усиленно занялись в ряде стран Европы, США, Канаде и Японии. Экспериментально-теоретические исследования по аэрогидродинамике СВП стали проводиться в крупнейших научных центрах ведущих стран, таких как Национальная физическая лаборатория в Англии, опытный бассейн им. Д. Тейлора и аэродинамическая лаборатория им. Ленгли в США, Национальный научно-исследовательский комитет во Франции.

В начале 60-х гг. XX века в Советском Союзе стали создаваться пассажирские СВП, предназначенные для серийной постройки.

В 1961–1962 гг. было построено несколько опытных пассажирских судов: в Ленинграде – скеговое СВП «Нева», в Горьком – амфибийный катер «Радуга» и скеговые судна на воздушной подушке (ССВП) «Горьковчанин». При испытании «Невы» было выявлено много недостатков, что исключило целесообразность серийной постройки СВП этого типа. Длительное и всестороннее испытание катера «Радуга», наоборот, дало положительные результаты и позволило перейти к проектированию и постройке более крупного амфибийного пассажирского СВП «Сормович». Пассажировместимость этого судна составляет 50 человек, экипаж – два человека, главный двигатель – газовая турбина АИ-20ДК мощностью 1985 кВт, скорость максимальная – до 65 уз. СВП «Сормович» несколько лет находилось в опытной эксплуатации на Волге на линии Горький–Казань. В результате выяснилось, что амфибийные суда, которым свойственна недостаточная устойчивость на курсе, в условиях магистральных рек с большим движением различных судов и составов эксплуатировать неэффективно и небезопасно: часто по разным причинам приходится снижать скорость, эксплуатировать судно на относительно малых скоростях. Это обстоятельство лишает СВП основного его преимущества – быстроходности. Большой шум от воздушных винтов также является существенным недостатком при эксплуатации судна вблизи густо населенных районов.

Опытная эксплуатация судна «Горьковчанин» подтвердила предполагаемую перспективность с СВП для внутренних водных путей, и суда этого типа начали выпускаться серийно. Серийно строились также и более крупные ССВП типа «Орион» и «Рассвет» [3].

Крупнейшим из СВП является 200-тонный автомобильно-пассажирский паром SR.N4 «Маунтбаттен» производства фирмы «Бритиш ховеркрафт корпорейшн». Первый паром этой серии приняла в эксплуатацию компания «Бритиш рейл ховеркрафт лимитед» на линии Дувр–Булонь через Ла-Манш в 1968 г. [1].

В полярных районах Канады, Аляски и Российской Федерации, зимой скованных льдом, а летом представляющих собой топкую болотистую тундру, СВП можно считать единственным транспортным средством для освоения этой местности. Суда на воздушной подушке модульной конструкции («Вояджер» и «Викинг») спроектированы с учетом возможности их разборки и транспортировки на борту крупных транспортных самолетов в район их использования

на Дальнем Севере. После сборки они действуют с полевых арктических аэродромов и доставляют контейнеры, оборудование, пассажиры и различные грузы жизнеобеспечения в места разведки и разработки полезных ископаемых.

Еще в 1950 г. возникла идея использования СВП в боевых целях. Вскоре многие поняли, что замена обычных водоизмещающих кораблей (крупных патрульных катеров, фрегатов, десантных, противолодочных и др.) быстрыми, компактными кораблями на воздушной подушке (КВП), преодолевающими барьер скорости на воде и выполняющими поставленные перед ними задачи быстрее, чем прежде, в три и более раз, обещает немалую экономическую выгоду. Привлекательной казалась и возможность сократить численность экипажа за счет внедрения автоматизации на этих кораблях, а также их амфибийность – способность КВП (за исключением скеговых, имеющих постоянно погруженные бортовые кили) к эксплуатации над любой поверхностью. Ввиду малой осадки на плаву КВП с гибким ограждением отпала необходимость в глубоководных портах и якорных стоянках, которые долгое время считались обязательным условием создания мощной морской оборонительной системы. Эти корабли могут быть вооружены такими же ракетами класса «корабль–корабль» и «корабль–воздух», как и обычные водоизмещающие. Таким образом, небольшой 75-тонный КВП может успешно конкурировать с 2000–3000-тонным водоизмещающим кораблем, который, во-первых, является гораздо большей по размерам мишенью, а во-вторых, имеет намного меньшую скорость, чем быстроходные ракетные КВП.

Возможности боевого использования КВП были обобщены доктором Р.А. Фрошем, помощником секретаря по делам военноморских сил США, который заявил, что «КВП, похоже, изменят саму природу надводных боевых действий, поскольку проводимые эксперименты приведут к созданию кораблей, способных двигаться с такой скоростью и обладать при этом такими достоинствами, какие до сих пор никогда не наблюдались на океанских просторах».

Но будущее СВП никоим образом не ограничивается их применением только в качестве боевых кораблей. Например, при их использовании для перевозки транзитных грузов между районами Северной Атлантики и северной частью Тихого океана протяженность морских торговых линий весьма значительно сократится. На таких

линиях, как Лондон–Токио и Лондон–Анкоридж, морской путь станет короче на 40 %. Благодаря высокой скорости СВП время доставки транзитных грузов уменьшится в 10 раз по сравнению с водоизмещающими судами. Суда на воздушной подушке хозяйственного назначения могли бы перевозить пассажиров и грузы через ледяную шапку между арктическими районами и северным побережьем, а также южными портами. Однако главную роль им надлежит сыграть при освоении нефтяных и минеральных ресурсов и в осуществлении местных перевозок продуктов питания, мехов, строительных материалов и оборудования.

Создатели СВП стараются удовлетворить не только нужды обороны и общественного транспорта, но и интересы энтузиастов-любителей. Все более популярными становятся небольшие спортивные одно- и двухместные СВП, производятся и поступают в продажу СВП, берущие на борт до шести человек. Эти суда используются для перевозки пассажиров и легких грузов, прогулок и других целей. Часто проводятся гонки малых СВП; нередко они привлекают от 20 до 30 участников.

Все более активно трейлеры и платформы на воздушной подушке используются для преодоления болотистых и скованных льдом участков. В районах, где невозможно применять обычные колесные или гусеничные транспортные средства, особенно при прокладке трубопроводов, освоении нефтяных месторождений, мелиоративных и ирригационных работах, повсюду в мире получают распространение разнообразные тяжелые системы на воздушной подушке. В результате разработки системы гибких ограждений для СВП фирмы «Хозеркрафт девелопмент лимитед» был создан промышленный образец гибкого ограждения.

В настоящее время оно широко используется во всем мире для перемещения различных тяжелых грузов, крупнейшим из которых была 700-тонная цистерна-хранилище. Все оборудование состоит из сворачиваемого, разделенного на сегменты гибкого ограждения, одного или нескольких блоков мотора-нагнетателя и системы труб, по которым воздух нагнетается в полость ограждения. Этот комплект оборудования можно легко доставить по воде или воздуху в любой район. Груз на воздушной подушке передвигается на новое место с помощью лебедки или буксира.

Успехи в деле разработки СВП весьма значительны: путь от лабораторных исследований до создания промышленных образцов СВП был пройден быстрее, чем при развитии любого другого вида транспорта. Постоянно расширяется диапазон работ, к которым привлекаются СВП и другие устройства с использованием воздушной подушки для транспортировки грузов. Безусловно, что в будущем СВП придется выполнять множество еще более интересных функций [1].

1.2. Классификация судов на воздушной подушке. Схемы формирования воздушной подушки

Основные признаки классификации современных СВП, отражающие специфику общего устройства и принципа работы этих судов, следующие:

- степень взаимосвязи судна с опорной поверхностью (водой) в режиме парения и движения;
- принципиальная схема образования воздушной подушки;
- конструктивный тип ограждения воздушной подушки.

По первому признаку классификации различают:

СВП класса А – суда с полным отрывом от опорной поверхности, получившие название **амфибийных СВП** (рис. 1.1). Движение этих судов возможно не только над водой, но и над твердой поверхностью (земля, лед, снег и т. д.). Амфибийные СВП оборудованы гибким ограждением воздушной подушки по всему ее периметру;

СВП класса Б – суда с неполным отрывом корпуса от воды. Воздушная подушка на этих судах с боков ограждается жесткими водоизмещающими поплавками-скегами в контакте с водой при всех режимах движения судна, а с носа и кормы – гибкими ограждениями. Суда на воздушной подушке класса Б получили название **скеговых СВП (ССВП)** (рис. 1.2);

СВП промежуточного класса – полуамфибийные СВП. Они имеют гибкое ограждение по всему периметру ВП и отличаются от амфибийных СВП наличием укороченных скегов, расположенных в средней части корпуса и смещенных от бортов к диаметральной плоскости. Скеги связывают СВП с водой в любом режиме движения, что улучшает их маневренные качества и шумность; последнее достигается благодаря применению в качестве движителей гребных винтов и водометов.

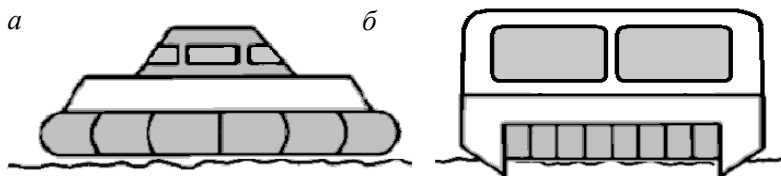


Рис. 1.1. Амфибийное (а) и скеговое (б) СВП

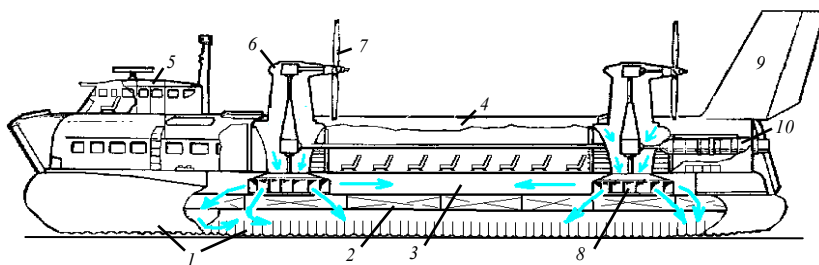


Рис. 1.2. Амфибийное СВП типа SR.N4:

1 – гибкое ограждение; 2 – понтон плавучести (корпус); 3 – жесткий ресервер; 4 – надстройка; 5 – ходовая рубка; 6 – поворотный пилон; 7 – воздушный винт; 8 – нагнетатель воздуха в ВП; 9 – стабилизатор; 10 – газотурбинный двигатель

Схемы конструкций амфибийных СВП показаны на рис. 1.2–1.5 [5].

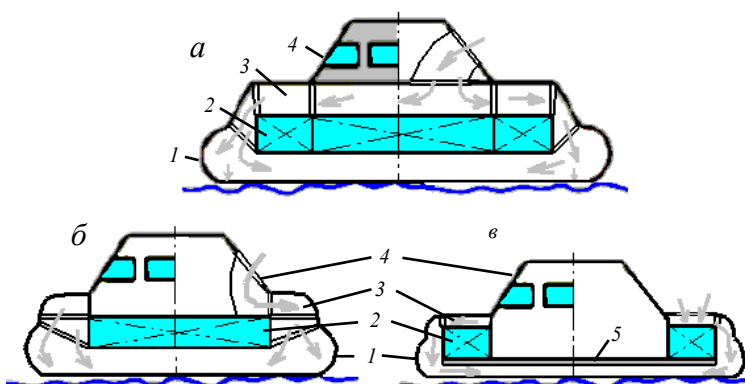


Рис. 1.3. Варианты компоновки амфибийных СВП в поперечном разрезе: а – трехъярусная; б – двухъярусная; в – одноярусная; 1 – гибкое ограждение; 2 – корпус (понтон плавучести); 3 – ресервер; 4 – надстройка; 5 – горизонтальная рама

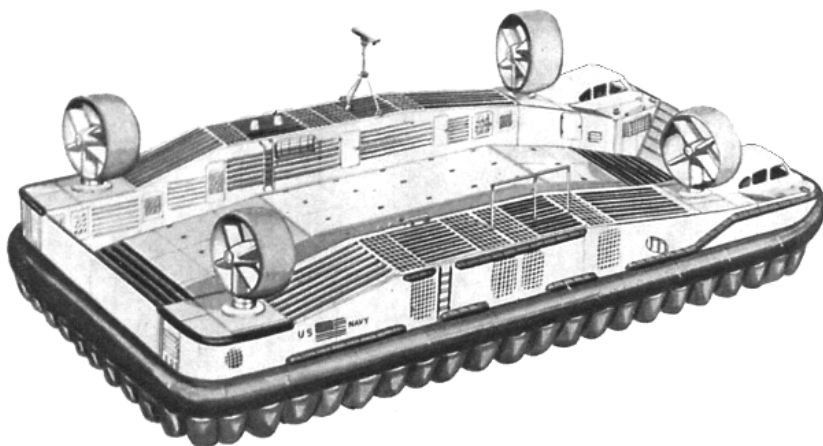


Рис. 1.4. Опытный десантно-штурмовой 160-тонный катер JEFF (США)

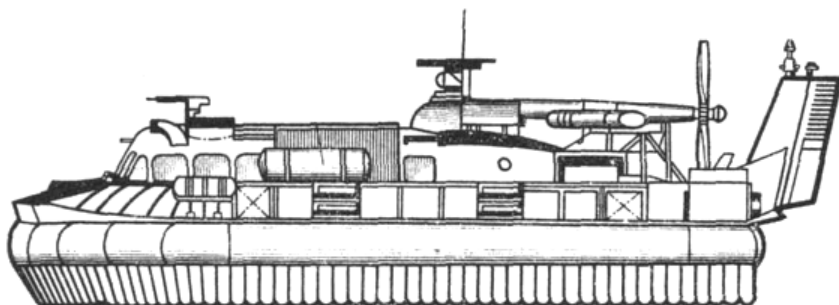


Рис. 1.5. Британское СВП береговой охраны SR.N6

У крупного амфибийного СВП корпус представляет собой прочный понтон плавучести с продольной системой набора, разделенный непроницаемыми поперечными и продольными переборками. Легкая надстройка соединена с корпусом каркасной конструкцией из трубчатых стоек и раскосов. В результате между палубой корпуса и палубой надстройки образуется невысокое пространство – жесткий ресивер, через который воздух от заборных отверстий и проходов в надстройке подается нагнетателем и растекается по всему периметру корпуса к ограждению ВП. Корпус, ресивер и надстройка образуют три яруса (рис. 1.3, *a*).

У средних СВП корпус и надстройка имеют единую палубу, а жесткий ресивер располагается по периферии надстройки (рис. 1.3, б). У малых СВП надстройка и небольшие бортовые блоки плавучести располагаются на жесткой горизонтальной раме (рис. 1.3, в).

Гибкое ограждение СВП имеет композитную структуру, состоящую из нескольких склеенных слоев. Несущие слои из синтетических тканей обеспечивают прочность гибкого ограждения (ГО). Слои покрытия (из эластичных пластмасс) обеспечивают непроницаемость ГО и защищают несущие слои от истирания [5].

Предварительно оценивая преимущества и недостатки амфибийных и скеговых СВП, можно отметить следующее [3].

Основным преимуществом амфибийных СВП является их высокая проходимость и большая скорость. Суда этого типа могут эксплуатироваться в самых разнообразных условиях, в том числе и на комплексных трассах, состоящих из различных участков пути воды, болотистой местности, песчаной суши и т. п. К недостаткам этих судов относится плохая устойчивость на курсе и управляемость, высокая энерговооруженность и большая шумность (в связи с использованием воздушных винтов в качестве движителей), интенсивное брызгообразование и др.

Скеговые СВП являются более экономичными судами, устойчивыми на курсе и менее шумными в связи с возможностью использования в качестве движителей гребных винтов и водометов, однако они имеют ограничение по проходимости. Их можно использовать лишь на водных трассах с глубинами фарватера не менее 0,5 м даже для небольших речных судов.

Первоначально считалось, что применение скеговых судов целесообразно лишь для невысоких и умеренных скоростей в связи с тем, что при более высоких скоростях резко возрастает сопротивление воды движению и ССВП становятся менее выгодными по сравнению с амфибийными. Однако это справедливо лишь для судов относительно небольшого водоизмещения. С увеличением размеров и водоизмещения эффективность скеговых судов повышается, и, как это признается специалистами, именно этот тип судов должен получить распространение при развитии скоростных крупнотоннажных морских СВП.

Для амфибийных СВП рост водоизмещения, по мнению специалистов, в перспективе едва ли превысит 1000 т, если не произой-

дет существенных усовершенствований движительных комплексов. Применяемые в настоящее время воздушные винты по своим габаритам увеличиваются намного быстрее по сравнению с ростом размеров и водоизмещения СВП. Для крупных СВП движительное устройство с воздушными винтами становится практически неприемлемым из-за своей громоздкости.

В настоящее время за рубежом амфибийные СВП получают достаточно широкое распространение в качестве транспортных пассажирских судов для обслуживания коротких морских линий с большим стабильным потоком пассажиров.

Перспектива развития СВП как транспортных средств связана с вопросами экономичности и зависит от возможности использования других видов транспорта в данном районе эксплуатации [6].

Как показывают экономические исследования, проведенные у нас и за рубежом, СВП пока уступают водоизмещающим судам и судам на подводных крыльях при эксплуатации в одинаковых условиях и на тех же линиях. В основном это объясняется более высокой энерговооруженностью СВП.

Однако СВП оказываются наиболее выгодным типом судов при освоении рек с небольшими глубинами фарватеров (около 0,5 м) или с быстрым течением (более 2,5 м/с) в районах, где слабо развита дорожная сеть. В Российской Федерации перспективным является использование различных типов СВП для развития транспортных связей в районах Севера, Сибири и Дальнего Востока. При этом считается целесообразным использование скеговых судов в тех районах, где перевозка осуществляется в летнее время по рекам, а в зимнее – по автозимникам. Амфибийные СВП могут применяться для круглогодичной эксплуатации в районах с заболоченной местностью, где трудно организовать зимние автомобильные дороги.

По принципиальной схеме образования воздушной подушки различают:

СВП с камерной схемой образования воздушной подушки, при которой воздух подается непосредственно в воздушную подушку через шахты или каналы с большим гидравлическим сечением (рис. 1.6). Нагнетаемый воздух поступает в подушку с относительно малой скоростью, не оказывая реактивного воздействия на подъем судна. Подъемная сила полностью создается статическим давлением

воздуха в подушке. Камерная схема формирования ВП используется как для скеговых СВП, так и для судов с полным отрывом от опорной поверхности;

СВП с сопловой схемой формирования ВП, при которой осуществляется периферийная подача воздуха в подушку через кольцевидные узкие каналы-сопла, ограничивающие площадь воздушной подушки с внешней стороны (рис. 1.7).

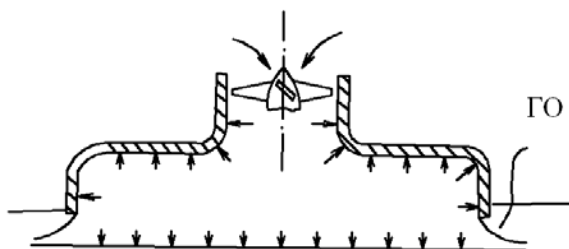


Рис. 1.6. Камерная схема образования ВП

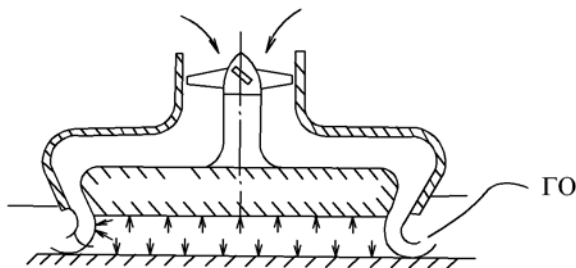


Рис. 1.7. Сопловая схема образования ВП

Кольцевое сопло по вертикальному сечению судна имеет наклон внутрь подушки, что оказывается более эффективным по сравнению с вертикальным направлением. Истечение воздуха в подушку происходит с большими скоростями так, что кроме силы аэростатического давления возникает дополнительная реактивная сила воздушной струи, которая, хотя и невелика (не более 5 % Dg), но способствует подъему судна. Периферийная подача воздуха в ВП с сопловой схемой ее образования по сравнению с камерной оказывается более выгодной с точки зрения уменьшения необходимой

мощности, затрачиваемой на подъем судна, лучше по устойчивости, но конструктивно она более сложная. Сопловая схема ВП используется в основном на амфибийных СВП.

Воздушная подушка на амфибийных СВП секционируется, т. е. ее площадь разделяется на несколько участков, в которых давление воздуха может сохраняться независимо от того, падает оно или нет в других участках, что очень важно с точки зрения обеспечения устойчивости и устойчивости движения СВП на волнении. Секционирование ВП осуществляется сплошными тонкими слоями воздуха, вертикально истекающего из ресивера в подушку через дополнительные сопловые каналы в днище корпуса. Эти так называемые сопла устойчивости могут быть расположены по днищу по различным схемам (рис. 1.8). Камерная и сопловая схемы в сочетании с гибкими ограждениями ВП получили широкое распространение. Реальные амфибийные СВП часто имеют *смешанную схему образования ВП*, когда, например, ее внутренние секции формируются по сопловой схеме, а внешние – по сопловой и камерной одновременно, что определяется конструктивным типом гибких ограждений.

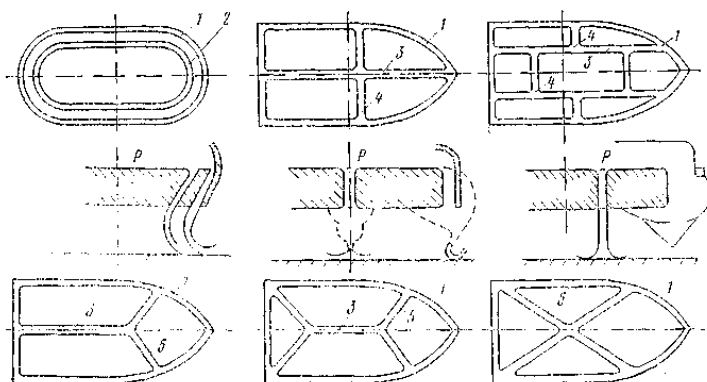


Рис. 1.8. Схемы секционирования ВП:

1 – перефирийные сопла; 2 – сопло устойчивости; 3 и 4 – продольные и поперечные сопла устойчивости; 5 – диагональные сопла устойчивости

Схемы конструкций скеговых СВП представлены на рис. 1.9 и 1.10.

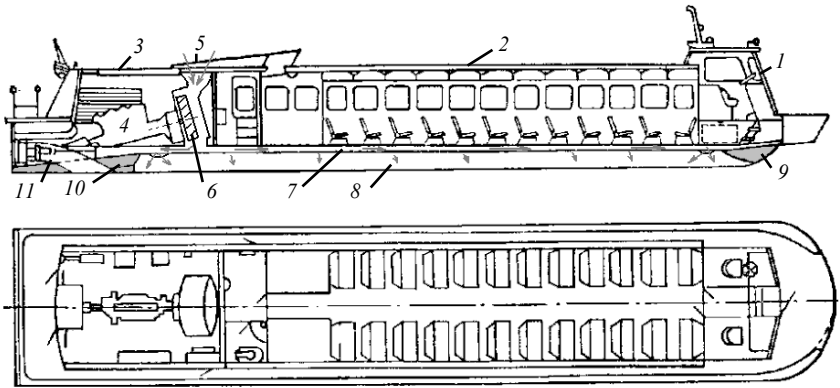


Рис. 1.9. Пассажирское речное скеговое СВП «Зарница»:

1 – ходовая рубка; 2 – пассажирский салон; 3 – машинное отделение; 4 – главный двигатель; 5 – воздухозаборник; 6 – нагнетатель; 7 – воздушный канал; 8 – скег; 9 – носовое гибкое ограждение; 10 – кормовое гибкое ограждение; 11 – водомет

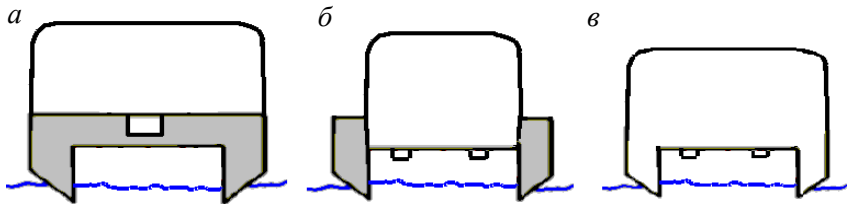


Рис. 1.10. Варианты компоновки скеговых СВП в поперечном разрезе:
а – двухъярусная; б, в – варианты одноярусного типа

При двухъярусной компоновке, характерной для морских судов, надстройка расположена над непроницаемым, разделенным переборками корпусом (рис. 1.10, а) [5].

При одноярусной компоновке у судна нет разделения на корпус и надстройку. Плавуность обеспечивается либо непроницаемыми скегами, либо отдельными небольшими блоками. Такие схемы характерны для речных судов (рис. 1.10, б, в) [5].

Система набора скегов и крыши надстройки обычно продольная. Гибкое ограждение в носу и корме, как правило представляет собой замкнутые надувные мешки. Носовое гибкое ограждение может быть «юбочного» типа с одной стенкой [5].

Для сохранения постоянного давления в воздушной подушке и уменьшения расхода воздуха применяют различные типы ее ограждения (ОВП). Различают две основные группы ОВП [3]:

1) ограждения, которые лишь способствуют увеличению толщины слоя ВП и уменьшению расхода воздуха, но «пропускают» его из-под днища за пределы судна. Иначе – ограждения, через которые предусматривается истечение воздуха;

2) ограждения, которые исключают истечение воздуха из ВП в нормальных условиях эксплуатации СВП.

К первым относятся воздушно-струйные, водоструйные, подвижные механические ограждения и различные типы гибких ограждений.

Ко **вторым** – жесткие конструкции типа бортовых скегов, а также гибкие ограждения типа монолитных полотнищ, надувных скегов и поперечно-расчлененных элементов; все они являются частично погруженными в воду при всех расчетных режимах эксплуатации судна.

Целесообразность применения того или иного типа ограждения связана:

- с учетом конструктивно-технологической простоты и надежности работы ОВП;

- учетом расходно-напорных характеристик ОВП, зависящих от его сопротивления истечению воздуха из ВП;

- влияния ОВП на ходкость и мореходность СВП.

Движителями скеговых СВП являются гребные винты или водометы, а у амфибийных судов применяются воздушные винтовые или реактивные движители.

1.3. Гибкие ограждения воздушной подушки

Если бы не было изобретено гибкое ограждение (ГО), то идея создания судна на воздушной подушке вряд ли продвинулась далеко от той стадии, на которой к ней относились как к просто интересной технической новинке.

Главное назначение ГО ВП – повышать мореходность СВП, т. е. обеспечивать безопасные и комфортабельные условия для пассажиров и экипажа во время движения судна с высокой скоростью на волнении при умеренных затратах мощности. Для этого ГО должно отклоняться под воздействием волны и возвращаться в исходное положение после

ее прохождения. При этом сопротивление ГО движению и объемный расход воздуха из ВП должны быть минимальными [7].

Первоначально примененное Коккерелом (фирма «Уэстленд Эй-крафт») гибкое ограждение (ГО) на амфибийном СВП SR.N1 представляло собой тонкое полотнище, прикрепленное верхней кромкой по наружному контуру корпуса (рис. 1.11, а).

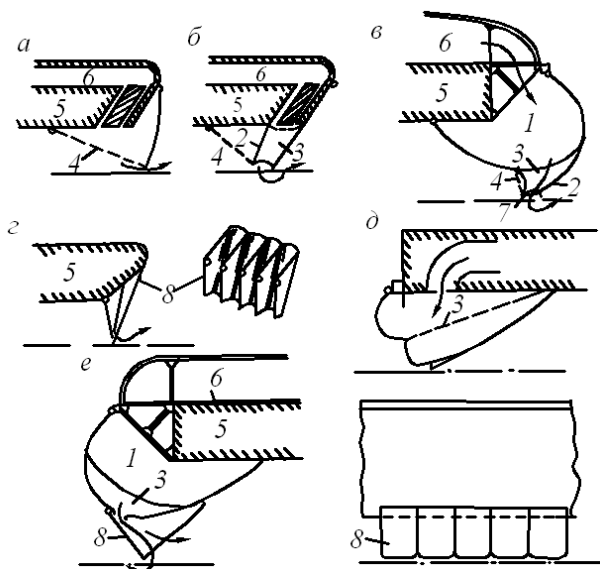


Рис. 1.11. Конструктивные схемы гибких ограждений ВП:
 1 – гибкий ресивер; 2 – гибкое сопло; 3 – диафрагма; 4 – цепная оттяжка;
 5 – корпус; 6 – жесткий ресивер; 7 – стяжка; 8 – поперечно расчлененные элементы

Нижняя кромка равномерно раскреплялась с корпусом цепными оттяжками. Высота гибкого ограждения составляла всего лишь 150 мм, что было недостаточно для обеспечения должной мореходности. Принять большую высоту такого ГО было нельзя по условию обеспечения необходимой остойчивости судна при движении над водой.

Вторым типом ГО, которое также впервые испытано на СВП SR.N1, было так называемое *гибкое сопло* (рис. 1.11, б) [3]. Оно состояло из двух тонких полотнищ, по периметру подушки образующих кольцевой канал, являющийся продолжением основных жестких сопел. В целях сохранения формы гибкого сопла между наруж-

ным и внутренним полотнищами были установлены диафрагмы и цепные растяжки, а гибкое сопло в целом раскреплялось цепными растяжками с корпусом, что обеспечивало необходимый наклон сопла внутрь подушки. Формирование ВП при этом типе ГО происходит по сопловому принципу, что позволило обеспечить относительно высокий зазор ($-0,25$ м) между нижней кромкой ГО и поверхностью воды. С учетом высоты гибкого сопла $0,4$ м жесткий корпус был поднят над водой примерно на $0,65$ м, что существенно повысило мореходность СВП SR.N1.

В результате испытаний выяснилось, что гибкое сопло увеличивает гидравлические потери (из-за увеличения длины сопла), а само гибкое ограждение обладает повышенной жесткостью: оно малоподатливо под ударами волн, что приводит к увеличению сопротивления и падению скорости. Существенным недостатком этого типа ГО является также резкое снижение высоты подъема из-за большой утечки воздуха в случае повреждения наружного полотнища.

Дальнейшие поиски в совершенствовании гибких ограждений привели к мысли о сочетании короткого гибкого сопла с гибким ресивером (рис. 1.11, в). Такого типа гибкое ограждение было установлено в 1964 г. на первом пассажирском амфибийном СВП SR.N5. Использование гибкого ресивера с коротким гибким соплом позволило отказаться от жестких профилированных сопел, значительно увеличить высоту ГО, уменьшить гидравлические потери и сохранить сопловую схему формирования ВП, обеспечивая тем самым достаточный зазор между нижней кромкой ГО и опорной поверхностью. Последнее очень важно с точки зрения уменьшения как сопротивления движению, так и износа ГО. Существенным недостатком этого типа гибкого ограждения является сложность замены изношенных или поврежденных участков, а также по-прежнему малая податливость ограждения при соударении днища с волнами во время движения.

В поисках устранения отмеченных недостатков, т. е. в целях повышения ремонтной пригодности и податливости ГО под ударом волн в отдельных его участках, пришли к идее секционирования гибкого ограждения. В частности, было предложено секционное ГО поперечно-расчлененного типа, состоящее из отдельных сегментных элементов (рис. 1.11, з). Такое устройство ГО позволяет снизить расход воздуха путем уменьшения зазора между нижней кромкой гибкого ограждения и опорной поверхностью при одновремен-

ном повышении его податливости. Элементы ГО, свободно перемещающиеся относительно друг друга, сравнительно безударно пропускают отдельные волны, а также небольшие твердые препятствия; изношенные или поврежденные элементы легко могут быть заменены. Однако этому типу ГО присущи весьма существенные недостатки: при достаточно большой высоте, что необходимо для обеспечения мореходности, вопросы обеспечения остойчивости СВП (формирование ВП здесь происходит по камерному способу и отсутствует реактивный эффект сопловой струи истекающего воздуха) и устойчивости самих элементов ГО становятся проблематичными. Поэтому такая схема ГО не получила распространения. Наиболее удачной, широко используемой на современных СВП, оказалась двухъярусная схема ГО (см. рис. 1.11, з). Верхний ярус такого ограждения представляет собой гибкий ресивер, форма которого в рабочем состоянии поддерживается давлением воздуха, поступающего в гибкий ресивер от нагнетателей. Нижняя кромка гибкого ресивера крепится к корпусу болтами, а верхняя – на шарнирных петлях с легко вынимающимися штырями. Нижний ярус этого ГО состоит из поперечно-расчлененных элементов, аналогичных рассмотренным в предыдущей схеме ГО. Двухъярусное ГО обеспечивает большую высоту подъема при сохранении своей формы, повышает мореходность СВП при сниженных ударных нагрузках и является удобным для замены наиболее повреждаемых и быстро изнашиваемых элементов (элементы нижнего яруса).

При эксплуатации двухъярусных гибких ограждений обнаружилась низкочастотная вибрация, которая в отдельных случаях бывает настолько значительной, что приводит к конструктивным разрушениям. Эта вибрация проявляется в виде вертикальных колебаний с большой амплитудой так, что нижняя кромка ГО то ударяется в опорную поверхность (воду, грунт), то образует с нею зазор, до двух раз больший того, который соответствует устойчивому режиму парения. Эти колебания передаются на жесткий корпус СВП, и в результате может возникнуть резонансное явление.

Изучение низкочастотной вибрации показало, что она во многом зависит от соотношения давления в гибком ресивере и подушке. При грубой оценке можно считать, что низкочастотная вибрация возникает, если отношение давлений в ресивере и подушке находится в пределах [3]

$$2 > \frac{p_p}{p_n},$$

где p_p и p_n – давление соответственно в ресивере и подушке, Па.

Этот неблагоприятный диапазон как раз отвечает тем значениям p_p/p_n , которые имеют место на реальных СВП.

Для устранения низкочастотной вибрации в ресивере устанавливают продольно-горизонтальные проницаемые диафрагмы. В результате появились двухъярусные монолитные гибкие ресиверы. Продольно-горизонтальные диафрагмы усложняют и удорожают конструкцию ГО, делают ее более тяжелой, но они необходимы как противовибрационные элементы. Наряду с низкочастотной имеет место и высокочастотная вибрация, которая обуславливает усталостное разрушение материала ГО.

Кроме рассмотренных конструктивных схем гибкого ограждения существует много других. На французских СВП, например, с успехом используется гибкое ограждение камерно-цилиндрического типа (рис. 1.12). Оно состоит из группы цилиндрических эластичных камер, открытых снизу, с индивидуальным подводом к ним воздуха от нагнетателей. Дополнительно к этим камерам по наружному периметру ВП установлено ограждающее тонкое полотнище.

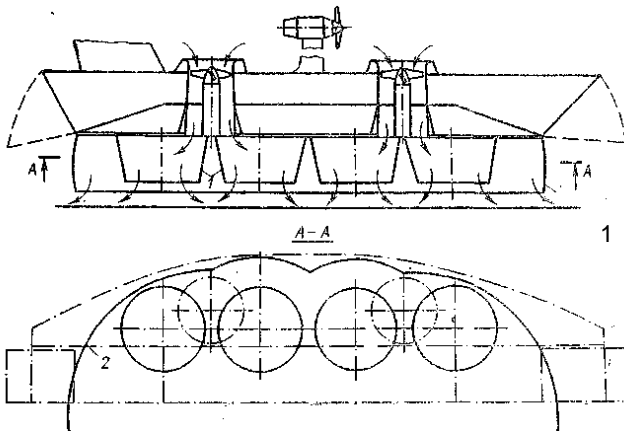


Рис. 1.12. Схема с гибким ограждением камерно-цилиндрического типа (ГО французской фирмы «Бертен»):

1 – цилиндрические гибкие камеры; 2 – периферийные гибкие ограждения

Французская фирма «Бертен», разработавшая камерно-цилиндрическое ГО, считает, что этот тип ГО отличается рядом преимуществ перед вышерассмотренными английскими схемами, а именно [3]:

- улучшается поперечная и продольная остойчивость СВП;
- облегчается преодоление препятствий;
- уменьшается чувствительность к потере давления в зоне ВП при повреждении внешнего гибкого ограждения или одной из камер;
- благодаря независимой подаче воздуха в камеры (каждая камера питается от своего компрессора) уменьшается протяженность и упрощается трассировка воздушных каналов; это к тому же уменьшает потери давления в воздушных каналах, что позволяет уменьшить требуемую мощность нагнетателей.

Современные ГО во многом еще не отвечают комплексу требований, предъявляемых к ним; и в ряде стран непрерывно ведутся поисковые работы по улучшению конструктивных схем гибких ограждений, поскольку их совершенствование непосредственно связано с улучшением ходовых и мореходных качеств СВП.

Материалы гибкого ограждения

Материалы ГО должны быть легкими, эластичными, прочными на истирание, вибростойкими и технологически удобными для выполнения различных видов его соединения и крепления к жесткому корпусу и между собой.

Распространение получили трехслойные материалы типа обрешиненных тканей или тканей с двухсторонним покрытием из различных синтетических материалов. Используются, например, нейлоновые ткани с неопреновым или хлорвиниловым покрытием, а также териленовые ткани с неопреновым или полиуретановым покрытием. Общая толщина получаемых при этом трехслойных полотнищ составляет 0,8–2,2 мм при массе от 1,0 до 2,4 кг/м².

Износ ГО, особенно при эксплуатации СВП только на воде, больше всего связан с усталостными явлениями в его материале, обусловленными вибрацией гибкого ограждения. Типичной формой износа ГО являются трещины во внешних слоях покрытия и расслоения материала. Процесс расслоения при высокочастотной вибра-

ции идет чрезвычайно быстро, поэтому особенно важно, чтобы используемые материалы обладали высокой прочностью на расслоение, и в этом направлении сосредоточены поиски получения нужных материалов для ГО.

Срок службы ГО пока составляет примерно половину того времени, которое считается достаточным по экономическим соображениям. Сегментные элементы нижнего яруса служат, например, 200–250 ч вместо 500 положенных.

Повышение долговечности и надежности ГО является достаточно сложной проблемой, решение которой, очевидно, возможно при комплексном сочетании мероприятий, направленных на улучшение конструктивных схем ГО в целом и отдельных его узлов путем применения легкозаменяемых секций, исключения участков повышенной жесткости, сведения к минимуму металлического крепежа, а также направленных на улучшение качества основного материала ГО, изучение и устранение причин возникновения вибрации ГО.

В настоящее время ведутся исследования свойств различных материалов и технологии их обработки, которые улучшили бы характеристики износостойкости сегментных элементов. Износ происходит в основном на высоких скоростях. Наивысшего уровня он достигает при средних показателях волнения моря и скорости движения СВП 50 уз. При более спокойной поверхности моря воздействие воды на сегментные элементы менее значительно, поэтому степень износа уменьшается. То же самое происходит и при более сильном волнении, когда скорость движения СВП снижается до 30–40 уз [1].

Одним из методов, решающих проблему разработки лучших материалов для гибкого ограждения, является использование более легких и гибких тканей. Есть доказательства в пользу теории, что благодаря своей гибкости такие материалы при контакте с водой оказывают меньшее тормозящее действие.

Одним из ведущих проектов на основе этой теории является отклоняющееся секционированное гибкое ограждение, разработанное фирмой «Ховеркрафт девелопмент лимитед». Гибким ограждением этого типа снабжены такие СВП, как HD.2, VT1 и VT2 фирмы «Воспер торникрофт», EM.2 и многие другие новые суда из тех, что строятся или уже находятся в эксплуатации. Это ограждение также применяют в промышленности, в том числе для оборудования тяжелых подъемных платформ массой до 750 т, транспорта и трейле-

ров на воздушной подушке. Такое гибкое ограждение состоит из крупных поперечно расчлененных элементов открытого типа – сегментных элементов, соединенных с корпусом при помощи открытой петли.

Подушка не разделена на отдельные отсеки, и, поскольку у воздушного потока нет никаких препятствий при движении между петлей гибкого ограждения и воздушной подушкой, соотношение уровней давления в них практически одинаково и поэтому потери внутренней энергии незначительны. Для изготовления гибких ограждений используют тонкую ткань, и в результате низкого уровня ее инерции обеспечивается плавное движение судна.

В силу того что сегментные элементы гибкого ограждения занимают значительную часть всей его высоты, эта система позволяет судно преодолевать высокие волны и препятствия. Еще одно преимущество, которое дает использование этой системы, заключается в том, что корпус судна, на котором она применена, имеет скошенную от днища к бортам поверхность. Таким образом, когда судно лишено воздушной подушки, до внутренних точек соединения сегментных элементов можно добраться, не прибегая к помощи домкратов, что значительно упрощает уход и обслуживание гибкого ограждения.

Фирма «Бритиш ховеркрафт корпорейшн» пришла к заключению, что наиболее пригодными материалами для изготовления гибких ограждений являются те, у которых основой ткани служит нейлон либо терилен, покрытый сверху натуральным каучуком или неопреновой резиной. Испытанию подвергались ткани из различных материалов, в том числе из стекла, хлопка, синтетических волокон и даже из стали, но результаты оказались неудовлетворительными. Выяснилось, что сталь и стекло не способны противостоять непрерывающимся ударам волн, а хлопчатобумажные ткани и ткани из искусственного волокна не обладают достаточной стойкостью к истиранию и не выдерживают длительной эксплуатации.

На первоначальном этапе разработок системы гибкого ограждения для гибкого ресивера были использованы также такие вещества, как нитрил/ПБК и полиуретан. Гибкие ограждения составляют около 15 % всей массы 10-тонного СВП SR.N6 и 10 % – 200-тонного SR.N4. По этой причине, а также для улучшения эксплуатационных и массовых показателей обычно выбирают такие размеры гибких ограждений, которые отвечают необходимым требованиям эксплуа-

тации судна. Ширина гибкого ограждения, как правило, соответствует наибольшей высоте волны в том районе моря, где предстоит действовать данному судну. Испытания показали, что для обеспечения остойчивости судна ширина гибкого ограждения не должна превышать 15–20 % ширины воздушной подушки.

подавляющее большинство СВП способны работать в условиях, при которых высота волны по крайней мере вдвое превышает высоту гибкого ограждения, особенно если волны длинные и могут быть преодолены без соприкосновения с ними основания носовой части СВП [1].

1.4. Архитектурно-конструктивные особенности судов на воздушной подушке

Архитектурный тип СВП зависит от его назначения, схемы образования ВП, рода движителя, типа энергетической установки и способа привода вентиляторов и движителей [7].

Конструктивные особенности существующих СВП наиболее полно можно характеризовать, используя три основных признака [2]:

- 1) устройство ограждения ВП;
- 2) назначение судна;
- 3) способ соединения корпусных элементов.

Эти признаки дают возможность выделять в конструкции корпуса современных СВП различные по характеру особенности.

Устройство ограждения воздушной подушки – специфичный для СВП признак, по нему можно установить две конструктивные группы судов:

- 1) с бортовым жестким ограждением – скегами;
- 2) полностью гибким ограждением воздушной подушки.

Скеговые ограждения и ГО обеспечивают характерные эксплуатационные особенности, например амфибийность СВП с ГО. Это в свою очередь проявляется в специфике других конструкций и устройств, прежде всего в конструкции основного корпуса СВП (пonton плавучести, корпуса, элементы для крепления ГО – в первой группе СВП; скеги, иногда в форме бортовых лодок, – во второй).

На СВП с ГО в качестве движителей используются главным образом воздушные винты, а также реактивные воздушные сопла. Рулевое устройство выполняется в виде воздушных стабилизаторов и

воздушных рулей. На скеговых СВП применяются в основном гребные или водометные винты, движители, рулевое устройство обычное для всех скоростных судов.

Назначение СВП определяет архитектурно-конструктивные особенности в положении, размерах надстроек с пассажирскими и грузовыми помещениями, наличии специальных погрузочно-разгрузочных устройств и т. п. Современные транспортные СВП строятся главным образом для пассажирских перевозок и скоростных паромных переправ автомобилей и другой техники.

Пассажирские СВП имеют довольно развитые надстройки, где размещаются пассажирские салоны. СВП для паромных переправ должны иметь специальные грузовые палубы, аппаратные устройства для обеспечения въезда-выезда автомобилей. Как правило, грузовые площади палуб (открытые или в закрытых помещениях) располагаются по линии диаметральной плоскости (ДП), носовых и кормовых аппарелей. Надстройки с пассажирскими салонами в этом случае смещаются к бортам.

Способ соединения корпусных элементов – общий признак для всех судов с динамическими принципами поддержания (СДПП). Он определяет конструктивно-технологические особенности корпуса. Основные способы соединений – сварка или клепка. В последнее время все шире используются склеивание и клеесварка, клееклепка.

Применение того или иного способа соединения связано не только с конструктивным оформлением соответствующих узлов в составе корпусных конструкций и технологией их изготовления. Сварной или клепаный корпус СВП может говорить, например, о марке корпусного материала – сваривающийся или несваривающийся легкий сплав; о возможной степени применения таких стандартных полуфабрикатов, как прессованные или штампованные панели, а также панели трехслойные. Все это может проявиться в весовых показателях корпусных конструкций, их эксплуатационной эффективности и надежности.

1.4.1. Амфибийные суда на воздушной подушке

Главными архитектурно-конструктивными элементами амфибийных СВП являются [3]:

– корпус;

- гибкое ограждение;
- надстройка;
- ходовая рубка;
- движительные и нагнетательные комплексы;
- оперение (вертикальные и горизонтальные воздушные кили-стабилизаторы, рули).

Компоновка этих элементов и определяет архитектурные особенности СВП (рис. 1.13, 1.14). **Корпус** представляет собой водонепроницаемую конструкцию понтонного типа. Для обеспечения непотопляемости, прочности и жесткости в корпусе установлены поперечные и продольные водонепроницаемые переборки. Над корпусом размещено пространство ресивера, сверху ограниченного воздухонепроницаемым настилом, называемым верхней палубой или крышей ресивера: крыша ресивера поддерживается каркасной конструкцией, опирающейся на палубу корпуса.

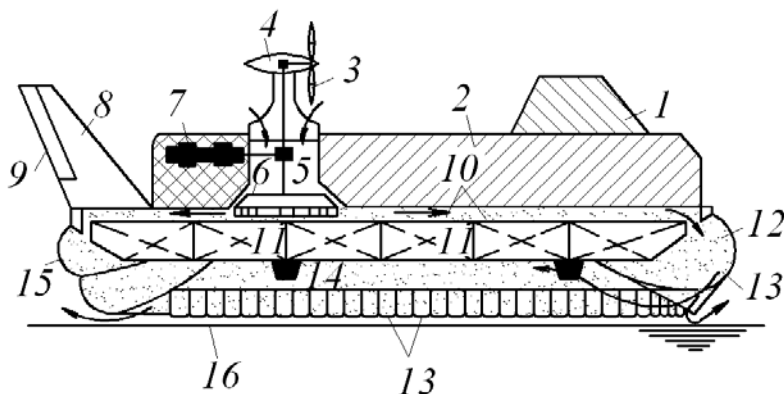


Рис. 1.13. Схема амфибийного СВП:

- 1 – рубка; 2 – пассажирский салон; 3 – воздушный винт (движитель);
- 4 – гондола с редуктором на поворотном пилоне; 5 – воздухозаборная шахта вентилятора; 6 – вентилятор (нагнетатель); 7 – главный двигатель;
- 8 – стабилизатор; 9 – воздушный руль; 10 – нагнетательная камера;
- 11 – отсеки плавучести жесткого корпуса; 12 – гибкий ресивер; 13 – сегментные элементы ГО; 14 – опорные тумбы (для стоянки СВП на грунте); 15 – кормовые ГО скользящего типа; 16 – опорная поверхность

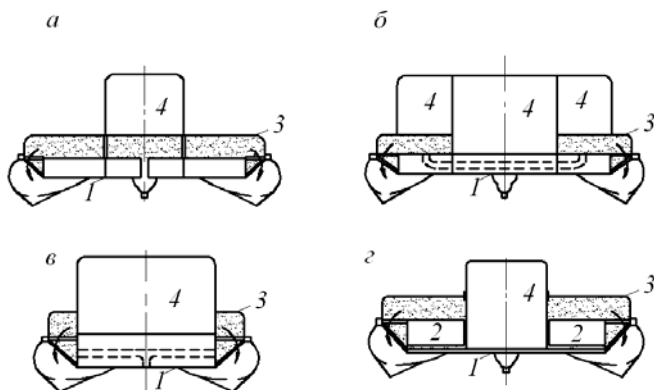


Рис. 1.14. Архитектурно-конструктивные схемы взаимного расположения основного корпуса, жесткого ресивера и надстройки:

а – надстройка расположена над жестким ресивером и значительно уже основного корпуса; *б* – надстройка размещена почти по всей ширине судна, и средняя часть ее расположена непосредственно на палубе основного корпуса; *в* – надстройка равна по ширине основному корпусу и расположена на его палубе; *г* – все смонтировано на прочной трехслойной панели; *1* – основной корпус; *2* – объемные цистерны плавучести; *3* – крыша ресивера; *4* – надстройка

Надстройка располагается на крыше ресивера (рис. 1.14, *а*) или непосредственно на главной палубе корпуса (рис. 1.14, *б, в, г*); в последнем случае пространство жесткого ресивера размещается с боков надстройки или даже «окружает» ее полностью.

Компоновка по типу схемы, приведенной на рис. 1.14, *а*, применяется в случае, когда большие емкости надстройки не требуются, а принятое давление в ВП относительно невелико.

Для автомобильно-пассажирских паромов и пассажирских СВП с относительно высоким давлением воздуха в ВП целесообразны компоновочные схемы, показанные на рис. 1.14, *б, в*.

Оригинальная компоновка применена на СВП SR.N5 (рис. 1.14, *г*). Особенностью архитектуры являются [7]:

- размещение отсеков непроницаемого корпуса по бокам и в корму от пассажирской кабины с целью уменьшения общей высоты судна и снижения его центра тяжести;
- расположение главного двигателя на крыше кабины, а вентиляторно-винтового комплекса – позади нее с целью снижения уровня шума в пассажирском помещении;

- использование совмещенного привода вентилятора и винта;
- относительно большой объем ВП;
- размещение в районе ЦТ одиночной топливной цистерны.

Базовым конструктивным элементом на этом судне является прочная трехслойная панель (платформа) толщиной 76 мм, служащая полом пассажирской кабины, и связанные с ней боковые и кормовые отсеки плавучести. Она состоит из бальзового заполнителя и тонких наружных слоев из алюминиевых листов. По бокам надстройки также непосредственно на платформу установлены съемные цистерны плавучести. На них опирается трубчатый фермовый каркас, поддерживающий обшивку крыши ресивера, шахту вентилятора, а также гибкое ограждение.

Непосредственно на платформе установлены отсек вспомогательных механизмов, кожух вентилятора, кормовые кили – стабилизаторы – и стойка-пилон воздушного винта. Благодаря такой компоновке достигается значительное снижение ЦТ судна, что позволило разместить главную газовую турбину на тентовой палубе надстройки и выполнить простую передачу мощности на воздушный винт через прямой горизонтальный вал без сложного углового редуктора. Кроме того, архитектурно-компоновочная схема подобного типа может оказать существенное влияние на снижение трудоемкости и упростить монтажно-сборочные работы на стапеле при постройке судна.

В последнее время получают распространение СВП с секционной конструкцией корпуса. Это суда разборного типа, которые отдельными частями удобно транспортировать к месту эксплуатации на автомашинах или даже на самолетах.

1.4.2. Скеговые суда на воздушной подушке

Скеговые СВП по сравнению с амфибийными имеют архитектуру, более близкую к обычным судам и, в частности, к судам типа «водный автобус», особенно если последний будет катамаранным. Отличительным внешним признаком в этом случае для ССВП будет только носовое и кормовое ограждения ВП.

В отечественной практике установился определенный архитектурный тип ССВП, для которого характерны следующие признаки:

- сплошная одноярусная надстройка почти по всей длине судна;
- носовое (центральное или боковое) расположение ходовой рубки;
- расположение машинного отделения в корме;
- разделение пассажирского салона и машинного отделения буферным отсеком (для уменьшения шума в салоне), в котором расположены санитарно-бытовые помещения;
- обязательный выход (и вход) на необорудованный берег через носовую площадку через трап или аппаратель.

По ширине надстройка на отечественных ССВП равна ширине корпуса, и обычно она конструктивно выполняется как одно целое с ним. Слань в пассажирских салонах на речных ССВП настилается по набору днища корпуса, а на судах морского плавания – непосредственно на пассажирскую палубу, являющуюся одновременно палубой непотопляемости, которая возвышается над основным днищем на 700–800 мм.

На рис. 1.15 изображена схема общего устройства условного ССВП, на которой показаны характерные компоновочные особенности для отечественных судов.

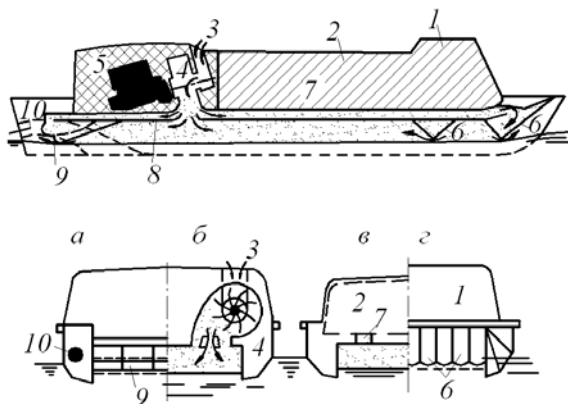


Рис. 1.15. Схема скегового СВП:

- а* – вид сзади; *б* – сечение по вентилятору;
- в* – сечение в районе пассажирского салона; *г* – вид спереди; 1 – ходовая рубка; 2 – пассажирский салон и служебно-бытовые помещения; 3 – воздухозаборник; 4 – вентилятор; 5 – главный двигатель; 6 – двухрядное гибкое носовое ограждение ВП из сегментных элементов; 7 – носовой воздушно-нагнетательный канал; 8 – кормовой воздушный канал; 9 – кормовое гибкое ограждение; 10 – водометный движитель

Скеговые СВП, эксплуатируемые за рубежом, несколько отличаются от отечественных по схеме общего расположения. Судно английской постройки типа НМ2, например, отличается тем, что энергетическая установка и вентиляторы расположены двумя группами – в носу и корме, а главный вход (и выход) в пассажирский салон – через корму. Другое относительно крупное СВП – НМ5 (полная масса 73 т) имеет уже более существенные отличия. Пассажиры на этом судне размещены в трех салонах: носовом и кормовом салоне первого яруса и в салоне второго яруса в средней части судна за ходовой рубкой. Машинное отделение расположено в средней части.

1.4.3. Полуамфибийные суда на воздушной подушке

Первое крупное полуамфибийное судно на воздушной подушке – автомобильно-пассажирский паром VT1 ($D = 85$ т) – было построено в Англии в 1969 г. Принципиальная схема его общего устройства показана на рис. 1.16.

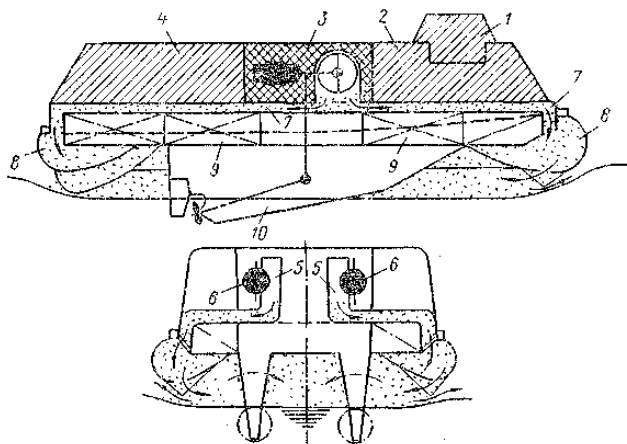


Рис. 1.16. Полуамфибийные СВП:

- 1 – рубка; 2 – носовой салон; 3 – машинное отделение; 4 – кормовой салон;
 5 – нагнетатели; 6 – главные газотурбинные двигатели; 7 – жесткий ресивер;
 8 – гибкий ресивер; 9 – отсеки плавучести корпуса; 10 – skeги

Основу архитектурной компоновки СВП VT1 составляет непроницаемый корпус, окаймленный двухъярусным ГО ВП. На непроницаемый корпус установлена надстройка, в средней части которой по всей длине расположен автомобильный трюм с носовой аппарелью и открывающейся кверху лаппортом-створкой на горизонтальных петлях у верхней кромки (не исключена установка и кормовой аппарели).

По бортам надстройки в носовой и кормовой частях размещены пассажирские салоны, а между ними – вентиляторные и газотурбинные отделения. Ходовая рубка установлена на крышке надстройки у левого борта.

В отличие от СВП с ГО и воздушными движителями, движение судна VT1 обеспечивается двумя водяными гребными винтами, установленными на наклонных валопроводах, которые проходят через два днищевых кия. За гребными винтами расположены два руля [7].

1.5. Главные двигатели, движители и вентиляторы судов на воздушной подушке

Как скоростные суда, СВП отличаются высокой энерговооруженностью. Для современных СВП энерговооруженность достигает 110 кВт на 1 т водоизмещения, а иногда и более. Обеспечение высокой требуемой мощности в условиях жестких массогабаритных требований, особенно для амфибийных СВП, возможно лишь путем применения газотурбинных двигателей. Они в основном и используются в качестве главных двигателей на современных амфибийных СВП. Быстроходные дизели применяются лишь на относительно небольших СВП скегового типа с умеренными скоростями (до 30 уз).

Создание газотурбинных двигателей для СВП как в зарубежной, так и отечественной практике развивается по линии конвертации авиационных турбин. В Англии и США широко используются конвертированные для морских условий авиационные газовые турбины мощностью от 590 до 3700 кВт с удельной массой 0,20–0,40 кг/кВт, удельным расходом топлива (керосина) 0,380 кг/кВт·ч и расходом воздуха от 4 до 6,8 кг/кВт·с.

Энергетическая установка на современных СВП представляет собой сложный газотурбинный двигатель-двигательный комплекс (ГТДДК), состоящий из газотурбинного двигателя, системы передач (валы, редукторы, муфты), движителей и вентиляторов

(нагнетателей). Обычно ГТДДК выполняется по совмещенной схеме, как единая энергетическая установка, при которой движитель и вентилятор приводятся в действие от одного и того же двигателя (см. рис. 1.11 и 1.14). Хотя в этом случае требуется применение сложных угловых и раздаточных редукторов, считается, что совмещенная схема является наиболее рациональной, поскольку позволяет сократить количество главных двигателей (и тем самым уменьшить размеры и объем машинного отделения), улучшить распределение суммарной мощности на движение и поддержание СВП в зависимости от условий плавания, упростить системы забора воздуха и газовыхлопа, системы управления, контроля и сигнализации.

Тем не менее на ряде современных СВП (американские амфибийные СВП типа «Джеф» и скеговые типа SES-100, французские амфибийные СВП типа N500 и др.) движители и вентиляторы имеют отдельные двигатели. Это, очевидно, обусловлено невысокой агрегатной мощностью используемых двигателей, которыми располагали фирмы, а возможно, были и другие соображения, оправдывающие принятые автономные системы передачи мощности на движители и вентиляторы. Автономная система привода позволяет обойтись без сложных раздаточных редукторов и при полной независимости работы вентиляторов повышает надежность подъемного комплекса.

Суммарная мощность главных двигателей, работающих на подъем и движение, на современных СВП водоизмещением 100–200 т и скоростью 40–92 уз составляет 9,5–12,5 тыс. кВт при числе газотурбинных двигателей от четырех до шести.

В зависимости от общей компоновки СВП, определяемой прежде всего назначением судна, от числа двигателей, движителей вентиляторов, а также в зависимости от схемы передачи мощности энергетическая установка на СВП размещается следующим образом [3]:

- в одном машинном отделении, располагаемом в средней или кормовой части судна;
- двух машинных отделениях, располагаемых в носу и корме СВП;
- трех машинных отделениях: два – в середине по бортам, одно – в корме;
- четырех машинных отделениях: по бортам в носовой и кормовой частях судна.

На скеговых СВП с дизельными установками и камерной схемой образования воздушной подушки машинное отделение размещается, как правило, в кормовой части.

В последние годы большое внимание уделяется проблеме создания крупнотоннажных грузовых океанских СВП со скоростью 100 уз и более. Отметим, однако, что создание крупнотоннажных быстроходных СВП будет зависеть от того, насколько успешно решится проблема создания практически приемлемой судовой энергетической установки сверхвысокой мощности.

На современных транспортных СВП используются единые движители для режима движения на ВП с эксплуатационной скоростью и для маневрирования на малой скорости; наиболее распространены воздушные винты, воздушно-реактивные движители, у которых реализуется сила отбрасываемого в корму воздуха, и водяные гребные винты [7].

Движители СВП в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями при удовлетворительных КПД и малом весе должны создавать тягу на переднем и заднем ходу при любых скоростях хода судна и оборотах двигателя. Необходимо обеспечить точное управление тягой при малых скоростях хода и устойчивую работу движителей при низкой тяге для маневрирования судном.

В качестве движителей на современных СВП в зависимости от их типа применяются [3]:

- воздушные винты (пропеллеры) с фиксированным или регулируемым шагом (ПРШ);
- различные воздушно-реактивные движители на амфибийных СВП;
- гребные винты и водометные движители – на неамфибийных СВП.

Воздушные винты по сравнению с другими различными видами воздушно-реактивных движителей являются наиболее эффективными, поэтому они и признаются основным типом движителей для амфибийных СВП и являются объектом совершенствования в целях повышения их КПД.

Воздушные винты на СВП по сравнению с самолетными работают в менее благоприятных условиях: относительно малая скорость СВП при большой требуемой тяге (особенно на «горбе» со-

противления), широкий диапазон скоростей вращения в рабочих режимах, работа в неравномерном воздушном потоке и т. д. С учетом этих особенностей воздушные винты на СВП должны иметь довольно большие диаметры, большие дисковые отношения, регулируемый шаг, соответствующую профилировку и т. д.

Как отмечалось ранее, массогабаритные параметры воздушных винтов увеличиваются по сравнению с ростом водоизмещения и скорости растут значительно быстрее, и это сдерживает создание скоростных СВП большого водоизмещения.

Эффективность воздушных винтов повышается при использовании соосных винтов, вращающихся в разные стороны. В этом случае при умеренной ширине лопастей удастся получить большее дисковое отношение, а также устранить некомпенсированные реактивные моменты. Хорошо спроектированный соосный винт может обеспечить почти двойную тягу. Однако применение соосных винтов заметно усложняет передачу мощности к ним.

Существует мнение, что для СВП следует использовать винты в насадках (или тяговые вентиляторы), поскольку у таких комплексов при одинаковой тяге меньше размеры и выше скорость отбрасываемого воздуха, что увеличивает эффективность установленных за ними воздушных рулей; шумность их меньше и они менее чувствительны к рысканию судна. Кроме того, насадка обеспечивает некоторую защиту винта.

Однако английские специалисты считают, что создание эффективного комплекса «винт–насадка», в особенности обеспечение зазора между концами лопастей винта и внутренней поверхностью насадки, равно $0,25\%$ диаметра винта (для винта диаметром 6,6 м это составляет 16 мм), вызовет большие технологические трудности. Также весьма сложно создание поворотной насадки.

Если комплекс «винт–насадка» заменить свободным винтом, имеющим диаметр, равный наружному диаметру насадка, тяговые преимущества комплекса снизятся. Кроме того, отсутствие насадки дает значительную экономию в весе, приблизительно равную, например, 1,5 т при диаметре насадки около 6,1 м. Что касается заглушения шума винта насадкой, то и этот эффект резко снижается с уменьшением шага винта [7].

По этим причинам на СВП винты в насадке (и тяговые вентиляторы) не находят применения.

Помимо вибрации проблема выбора воздушных винтов для СВП связана с эрозией и коррозией лопастей, а также с шумностью.

Эрозия лопастей, обычно выполняемых из легких сплавов, вызывается высокой энергией песчинок и частиц воды, ударяющих по входящим кромкам быстро вращающихся лопастей. Опыт показал, что использование только одной окраски, без применения специальных покрытий или наделок, не обеспечивает удовлетворительной защиты от эрозии. Из испытанных различных защитных наделок и покрытий (бронзовые листы, листы из нержавеющей стали, резина, стекловолокно и др.) наилучший результат дали массивные полиуретановые наделки на входящей кромке лопасти, выполненные по ее профилю. Этот материал достаточно эластичен, чтобы поглощать энергию ударяющих частиц, и одновременно достаточно тверд, чтобы противостоять выщербливанию при ударах.

Коррозия воздушных винтов СВП вызывается действием морской воды, особенно проникающими свойствами мелких капелек тумана. Эффективная защита от коррозии обеспечивается окраской тщательно подготовленной поверхности. Все поверхности деталей винта покрывают тремя слоями эмалевой краски, после чего винт собирают и окончательно окрашивают путем распыления. Все выступающие острые углы во избежание отставания краски должны быть скруглены [7].

В качестве нагнетателей воздуха в ВП на СВП применяются **вентиляторы**. Вентилятор для СВП должен обладать высоким КПД, малым весом и характеристиками, обеспечивающими широкий диапазон работы в зависимости от нагрузки – давления и производительности. Кроме того, он должен обеспечивать полный напор при производительности, близкой к нулевой, что может потребоваться при подъеме СВП с мягкого грунта и воды.

На СВП могут быть использованы осевые и центробежные вентиляторы.

В принципе, выгоднее *осевые вентиляторы*, способные обеспечить необходимую производительность при меньших размерах. Однако при вертикальном положении оси вентилятора неизбежен поворот воздушного потока, что связано с потерей давления.

Крупным недостатком осевых вентиляторов является склонность к помпажу, т. е. к срыву работы при переменной производительности, когда она становится меньше некоторой величины. При пом-

пже напор вентилятора падает и воздушная подушка перестает «держаться» судно. СВП становится неустойчивым в движении на волнении. Поэтому в настоящее время большее применение находят **центробежные вентиляторы**, работающие без помпажа и способные создать большое давление при меньших окружных скоростях.

Центробежные вентиляторы устанавливаются или с горизонтальным положением оси вращения крыльчатки, или с вертикальным, в зависимости от его расположения на судне, схемы привода от двигателя и схемы формирования ВП. Поступление воздуха к вентилятору осуществляется через цилиндрические вертикальные шахты непосредственно к входному приемнику вентилятора (см. рис. 1.13) или же через каналы-заборники, в которых воздушный поток в своем направлении имеет один-два поворота (см. рис. 1.15). Последнее значительно хуже с точки зрения потери давления. Однако вентиляторные цилиндрические шахты отнимают полезный объем в надстройке и затрудняют рациональное расположение основных помещений, особенно если на судне несколько вентиляторов.

Немаловажным преимуществом центробежных вентиляторов являются меньшие конструктивные нагрузки, обусловленные более низкой окружной скоростью, а следовательно, и меньшая опасность разрушения. Одним из главных достоинств центробежных вентиляторов является отсутствие помпажа.

Для скеговых СВП требуется значительно меньшая производительность вентиляторов по сравнению с амфибийными. Об этом можно судить по величине удельных расходов воздуха на 1 т массы СВП, т. е. по величине Q/D , м³/с/т. Для скеговых судов значение этих величин лежит в пределах 0,5–1,0 м³/с/т, а для амфибийных СВП – 5,0–10 м³/с/т. Соответственно этому и мощности, необходимые для вентиляторов, на скеговых судах значительно меньше.

Проектная характеристика вентиляторов по их удельной массе и удельной мощности для первого приближения может быть оценена величинами

$$G_v/Q = 0,6-0,8 \text{ кг/м}^3/\text{с}, \quad N_v/Q = 2,6-3,3 \text{ кВт/м}^3/\text{с},$$

где G_v и N_v – соответственно масса и мощность вентилятора.

При подборе или расчете воздуходвигателя (вентилятора) должны соблюдаться следующие условия:

1. Давление, создаваемое вентилятором, должно превышать давление в подушке на величину потерь давления в воздухопроводной системе (потери на входе в шахту вентилятора, при расширении воздуха в диффузоре вентилятора и в ресивере, при переходе из ресивера в ВП).

2. Производительность вентилятора, соответствующая требуемому давлению, должна быть равна или несколько больше расхода воздуха из воздушной подушки при максимальном значении коэффициента полезного действия вентилятора.

Достаточный запас по давлению и производительности при постоянной (расчетной) частоте вращения ротора вентилятора n_v обеспечит необходимые значения подъемных характеристик СВП в более широком диапазоне эксплуатационных условий.

Рабочая точка A на кривой $\bar{H}(\bar{Q})$ напорно-расходной характеристики вентилятора (рис. 1.17) определяет его напор \bar{H} и производительность \bar{Q} , которые должны соответствовать давлению в ресивере p_p и расходу воздуха из подушки. При этом точка A должна находиться в зоне наибольших значений КПД вентилятора на нисходящей ветви кривой напорной характеристики $\bar{H}(\bar{Q})$. Последнее связано с условием обеспечения устойчивой работы вентилятора.

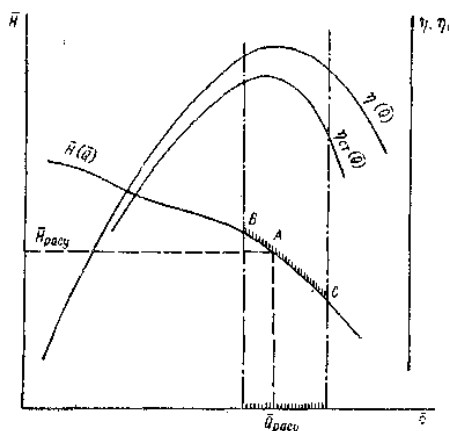


Рис. 1.17. Типовая напорно-расходная характеристика центробежного вентилятора при $n = \text{const}$:

A – рабочая расчетная точка; BC – диапазон колебания \bar{Q} и \bar{H} в эксплуатационных условиях СВП

При движении СВП на волнении расход воздуха из подушки будет периодически меняться, и это оказывает влияние на работу воздухонагнетательной системы. Точка A будет перемещаться влево (при уменьшении расхода) или вправо (при увеличении расхода), определяя на кривой $\bar{H}(\bar{Q})$ рабочий диапазон изменения основных характеристик.

Широкий диапазон периодических колебаний значений \bar{H} и \bar{Q} отрицательно сказывается на устойчивости работы вентилятора и вызывает нежелательные перегрузки вентиляторного двигателя. Целесообразно поэтому увеличить перепад давлений между ресивером и подушкой (этого можно добиться увеличением гидравлического сопротивления при переходе воздуха из ресивера в подушку), что улучшит демпфирующие свойства подъемной системы и снизит у вентилятора пульсацию его напорно-расходных характеристик. На изменение аэродинамических характеристик подушки, а следовательно, и вентилятора существенное влияние оказывает расходно-напорная характеристика гибкого ограждения.

1.6. Материалы и конструкции корпуса

В отличие от водоизмещающих судов и катеров на подводных крыльях суда на воздушной подушке имеют плоские и широкие корпуса, плохо приспособленные к длительному плаванию на морском волнении без воздушной подушки. В первую очередь это относится к амфибийным СВП, поскольку в некоторых проектах скеговых СВП все же наблюдаются попытки создания судна с формой корпуса, близкой к форме глиссирующего катамарана, способного двигаться с ограниченной скоростью на волнении в режиме плавания без использования воздухонагнетательной системы или при ее работе на режиме малой мощности.

С целью снижения давления в воздушной подушке и снижения тем самым мощности энергетической установки, казалось бы, целесообразно проектировать корпуса максимально возможных длины и ширины, что потребует создания весьма легких конструкций. Но невозможно полностью избежать ударов волн в жесткий основной корпус (а на СВПС – и в скеги), который должен нести и другие нагрузки. Следовательно, корпус СВП должен быть достаточно прочным, т. е., как обычно при проектировании, основные требования весьма противоречивы.

Практика проектирования СВП привела к выработке компромиссных решений, основанных в первую очередь на определении допустимой доли массы корпуса в полной мере (водоизмещении) судна.

Как и при проектировании водоизмещающих судов, при росте водоизмещения для корпуса СВП целесообразно применять более прочные материалы, поскольку использование одного и того же материала для корпуса судов различного назначения приводит к росту относительной массы корпуса [4].

Наиболее пригодным материалом для корпусных конструкций СВП, как и для обычных судов, являются металлы. На первом месте по прочностным, технологическим качествам и стоимости стоит сталь. Высокая прочность стали в сочетании с относительно низкими напряжениями в конструкциях СВП позволяет использовать тонкостенные связи. Однако это затрудняет обеспечение устойчивости пластин и выполнение соединений и приводит к появлению выпучивания. Лучшее решение представляет использование менее прочных, но более легких материалов с обеспечением необходимой прочности путем увеличения толщины в два–три раза по сравнению со стальными конструкциями.

Наиболее широкое применение в конструкции корпуса СВП нашли алюминиевые сплавы [7]. Они применяются как для несущих связей, так и для второстепенных конструкций, подкреплений и фундаментов, аэродинамических элементов, конструкций, поддерживающих ГО, и т. д.

Трудности в использовании алюминиевых сплавов – сложность сварки сплавов высокопрочных марок – уменьшаются в связи с успехами освоения клеесварных соединений.

Наряду с алюминиевыми сплавами находят применение дерево (фанера с пропиткой) и пластики. Если на относительно крупных судах пластики используются для отдельных конструкций (ходовые рубки, шахты вентиляторов и т. п.), а также декоративной зашивки и отделки помещений, то корпуса малых СВП целиком выполняются из пластика.

Основными конструктивными элементами СВП обычно являются: несущий непроницаемый корпус (на малых судах платформа или рама, окаймленная прочными отсеками или легкими емкостями плавучести);

легкая (на относительно крупных судах прочная) пассажирская или грузовая надстройка;

ферменные трубчатые или профильные конструкции, поддерживающие ГО ВП.

Требование минимальной массы конструкции при выборе материала корпуса СВП – одно из определяющих. Преимущества различных конструктивных материалов по-разному проявляются в разных условиях нагружения элементов конструкции (растяжение-сжатие, изгиб, сдвиг и т. п.).

2. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ОСНОВЫ ГИДРОАЭРОМЕХАНИКИ СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Гидроаэромеханика СВП охватывает большой круг чрезвычайно сложных вопросов, связанных с изучением физических особенностей статики и динамики СВП и определением внешних сил и моментов, действующих на судно в различных его состояниях в зависимости от скорости движения.

Сложность гидроаэромеханики СВП по сравнению с задачами гидродинамики водоизмещающих судов и аэродинамики самолетов связана с особенностями принципиальной схемы поддержания СВП, которые обуславливают сложность явлений, происходящих вокруг движущегося судна на воздушной подушке, вызывают появление иных сил, несвойственных другим судам.

Судно на воздушной подушке является проницаемым телом. При своем движении судно захватывает и переносит большие массы воздуха, что вызывает появление внешних сил инерционной природы, таких как импульсное сопротивление, силы Кориолиса, возникающие при циркуляции СВП, и др. В этом состоит одна из особенностей аэродинамики СВП.

Другая важная особенность СВП – условие движения этих судов на границе раздела двух сред: воды и воздуха, оказывающихся при этом в сложном взаимодействии. Под подушкой вода деформируется, образуется впадина. Впадина, перемещаясь с судном, создает волну. Окружающая судно вода препятствует истечению воздуха из подушки и частично в виде брызг захватывается воздушным потоком. Воздушно-брызговой поток, образующийся вокруг судна, существенным образом изменяет форму обтекания судна набегающим потоком встречного воздуха. В свою очередь набегающий (встречный) поток влияет на характер истечения воздуха из подушки и т. д. Взаимовлияние воды и воздуха вокруг движущегося СВП является сложным нестационарным процессом динамического характера. Оно зависит от многих факторов и в первую очередь от давления ВП, высоты подъема судна над водой и скорости его движения. Поэтому качественная и, особенно, количественная оценка теоретическим путем сил, действующих на движущееся СВП, весьма затруднительна.

Следует отметить еще одну особенность – деформацию гибкого ограждения при его контакте с водой. Возникает сложнейшая зада-

ча гидромеханики: определить внешние гидродинамические усилия, зависящие от формы тела при условии, что сама форма тела, зависит от этих усилий.

Быстроходным амфибийным СВП свойственна соизмеримость внешних сил гидродинамической и аэродинамической природы. Это также является особенностью судов на воздушной подушке. Аэродинамическая разгрузка, или аэродинамическая подъемная сила, составляет от 10 до 15 % массы судна и оказывает существенное влияние на параметры воздушной подушки, расход воздуха, волновое сопротивление и т. д.

Отмеченные особенности СВП затрудняют теоретическое решение ряда практически важных вопросов, связанных с их проектированием, и требуют широкой постановки экспериментальных исследований как в общем плане для получения систематизированных опытных данных, так и в частных случаях конкретного проектирования.

Теоретически наиболее полно решены задачи статики СВП по определению характеристик подъемного комплекса и статической устойчивости. Задачи динамики, наоборот, разработаны недостаточно, особенно такие наиболее сложные вопросы, как стабилизация движения по курсу на волнении, качка, ходкость на волнении. Эти и другие вопросы являются предметом серьезных научных исследований, которые доступны лишь крупным научным центрам.

В настоящей главе приведены краткие элементарные сведения по основам теории СВП, знание которых необходимо на первоначальной стадии разработки проекта [3].

2.1. Статика судов на воздушной подушке

Статика СВП, как раздел аэрогидромеханики этих судов, рассматривает условия устойчивого равновесия судна в режиме висения (парения) над твердым экраном и над водой, или в режиме равномерного прямолинейного движения судна над жестким экраном или над тихой водой при погоде без ветра. В ней излагаются приближенные методы расчета параметров подъемного комплекса, поперечной и продольной устойчивости СВП. Расчетные формулы пишутся в зависимости от составления аэродинамической схемы образования ВП, конструктивного типа ее ограждения и типа экранной поверхности (твердая поверхность, вода).

Основными подъемными характеристиками СВП являются высота подъема над опорной поверхностью h , расход воздуха из подушки Q и избыточное давление воздуха в подушке $p_{\text{п}}$. Значение этих величин определяет размеры СВП, мореходность и мощность, необходимую для расчетного подъема судна над водой.

В различных исследованиях и расчетах характеристики подъемного комплекса обычно представляют в виде безразмерных параметров:

– коэффициент давления [3]

$$\bar{p} = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{р}}};$$

– относительный расход воздуха [3]

$$\bar{Q} = \frac{Q}{FV_S};$$

– относительная высота подъема [3]

$$\bar{h} = \frac{h}{\sqrt{S_{\text{п}}}},$$

где $p_{\text{п}}$, $p_{\text{р}}$ – давление соответственно в подушке и ресивере, Па;

F – площадь расходного сечения, м²;

V_S – средняя скорость истечения, м/с;

$S_{\text{п}}$ – площадь воздушной подушки, м².

Высота подъема, давление и расход воздуха – взаимосвязанные характеристики: любые две принятые характеристики определяют значение третьей. За основную исходную величину обычно принимают значение давления воздуха в воздушной подушке. Принимают также и значение величины h , а расход воздуха определяют расчетным путем в зависимости от $p_{\text{п}}$ и h .

Аналитические выражения взаимосвязи рассматриваемых величин определяются характером истечения воздуха из ВП, обусловленного аэродинамической схемой ее образования.

Рассмотрим аналитические зависимости между основными подъемными характеристиками для камерной и сопловой схем истечения воздуха из ВП амфибийных СВП.

Камерная схема. Схемы истечения воздуха из ВП камерных СВП в режиме висения над твердым экраном и водой показаны на рис. 2.1, а, б.

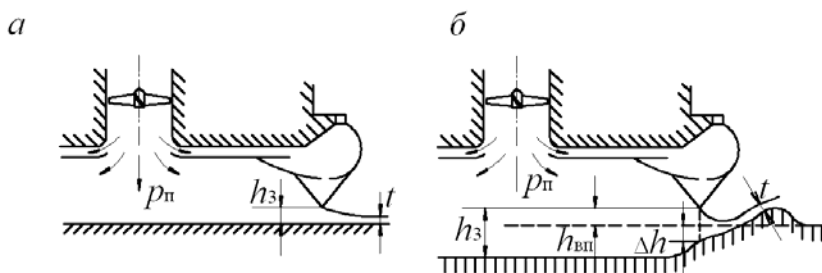


Рис. 2.1. Камерное СВП:

а – в режиме висения над жестким экраном; б – в режиме висения над водой

Среднюю скорость истечения воздуха из подушки, как из резервуара с небольшим давлением в атмосферу, если полагать одинаковыми его удельные объемы ($1/\gamma_{\text{рп}} \approx 1/\gamma_{\text{атм}}$) и пренебрегать трением, можно определить по формуле [3]

$$V_c = \sqrt{\frac{2p_{\text{п}}g}{\gamma}} = \sqrt{\frac{2p_{\text{п}}}{\rho}}, \quad (2.1)$$

где $p_{\text{п}}$ – давление в ВП, Па;

g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$;

γ – удельный вес воздуха, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}^2$;

ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Подставив в формулу (2.1) $\rho = 1,25 \text{ кг}/\text{м}^3$, получим

$$V_c \approx 1,27 p_{\text{п}}^{1/2}.$$

Расход воздуха определим по выражению [3]

$$Q = \Pi h \alpha V_c, \quad (2.2)$$

где Π – периметр истечения воздуха, т. е. наружный периметр подушки, м;

$\alpha = t/h$ – коэффициент сужения истекающего потока;

t – наименьшая толщина выходящего из подушки слоя воздуха (см. рис. 2.1), м.

Значение коэффициента сужения для случая висения СВП над твердым экраном в расчетах принимают в пределах $\alpha_3 = 0,6–0,8$ в зависимости от конструктивного выполнения профиля нижней кромки ограждения ВП (с острыми кромками или округленными).

Подставив в (2.2) значение V_c , получим

$$Q = 1,27 \alpha_3 \Pi h_3 p_{\Pi}^{1/2}, \quad (2.3)$$

где α_3 – коэффициент сужения истекающего потока в режиме висения СВП над твердым экраном;

$h_3 = h$ – высота подъема СВП над твердым экраном.

Из формулы (2.3) получаем выражение для определения высоты подъема СВП над твердым экраном:

$$h_3 = \frac{Q}{1,27 \alpha_3 \Pi p_{\Pi}^{1/2}}. \quad (2.4)$$

Величина среднего давления в подушке также из формулы (2.3) найдется по выражению [3]

$$p_{\Pi} = 0,62 \frac{Q^2}{(\alpha_3 \Pi h_3)^2}. \quad (2.5)$$

Формулы (2.3)–(2.5) выражают взаимосвязь между основными подъемными характеристиками СВП и могут быть использованы в инженерных расчетах для режима висения СВП над твердым экраном: формулы можно использовать для приближенной оценки подъемных характеристик и в режиме установившегося движения СВП над экраном.

В режиме *висения* СВП *над водой* картина истечения воздуха и количественное соотношение подъемных характеристик изменяются. Под подушкой СВП образуется впадина, объем которой примерно соответствует объему воды массой, равной массе судна, т. е.

$$W_{\text{вп}} \approx \frac{D}{\rho},$$

а глубина

$$h_{\text{вп}} \approx \frac{D}{\rho S_{\Pi}},$$

где S_{Π} – площадь воздушной подушки, м^2 .

Высота висения СВП над уровнем гладкой воды $h_{\text{в}}$ (см. рис. 2.1, б) меньше высоты висения $h_{\text{э}}$ над твердым экраном. Она может быть определена приближенным соотношением:

$$h_{\text{в}} \approx h_{\text{э}} - h_{\text{вп}} \approx h_{\text{э}} - \frac{D}{\rho S_{\Pi}}.$$

По аналогии с формулой (2.2) расход воздуха можно определить по выражению

$$Q = \Pi (h_{\text{в}} + \Delta h) \alpha_{\text{в}} V_{\text{с}},$$

где $\alpha_{\text{в}} = \frac{t_{\text{в}}}{(h_{\text{в}} + \Delta h)}$ – коэффициент сужения толщины потока истечения;

$h_{\text{в}} + \Delta h$ – зазор между водой и нижней кромкой ограждения подушки по ее периметру (наибольшая толщина воздушного слоя истечения).

В расчетах можно принимать (при давлении в паскалях)

$$\alpha_{\text{в}} = 0,7\alpha_{\text{э}}; \quad (2.6)$$

$$\Delta h = (0,06 \dots 0,07) \frac{p_{\text{п}}}{\gamma}$$

В режиме движения СВП над водой вследствие инерционных свойств воды глубина впадины под судном уменьшается с увеличением скорости движения. При числах Фруда $Fr \geq 1,5$ она становится практически незначительной величиной и высоту подъема судна над уровнем спокойной воды можно считать равной той же величине, что и в случае движения его над твердым экраном, т. е. $h_{\text{в}} = h_{\text{з}}$. Таким образом, для приближенного расчета подъемных характеристик СВП при установившемся движении над водой можно пользоваться вышеприведенными зависимостями для случая движения над твердым экраном, но коэффициент сжатия потока истечения принимать по зависимости (2.6).

Сопловая схема. Подъем и формирование воздушной подушки СВП над твердым экраном можно представить схемой, показанной на рис. 2.2. При определенном давлении в ресивере воздух из сопла вначале «пробивается» тонкими струями под днище и за пределы судна в атмосферу. После распространения тонким слоем под значительную часть площади днища аппарата воздух начинает подниматься благодаря избыточному аэростатическому давлению под днищем. Воздух, продолжая поступать под днище, образует воздушную подушку и поднимает аппарат (судно) на расчетную высоту $h_{\text{в}}$.

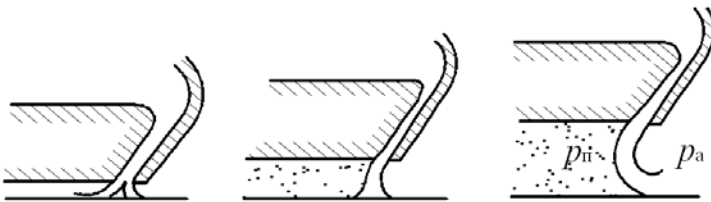


Рис. 2.2. Фазы подъема сопловой СВП:
 $p_{\text{п}}$ – давление ВП; $p_{\text{а}}$ – атмосферное давление

В связи с избыточным давлением в воздушной подушке сопловой поток воздуха в нижней своей части «отжимается» и приобретает криволинейное очертание (см. рис. 2.2), превращаясь в воз-

душно-струйную завесу (ограждение) воздушной подушки. При истечении воздуха из сопл возникает реактивный импульс, который создает дополнительную, хотя и незначительную по своей величине (до 5 % Dg), подъемную силу.

В теоретических исследованиях сопловой поток обычно идеализируется. Форму его принимают в виде дуги окружности с радиусом R , равным высоте подъема $h_{вп}$ над экраном h_3 , а толщину t – одинаковой по всей дуге тока, равной ширине сопла b_c (рис. 2.3).

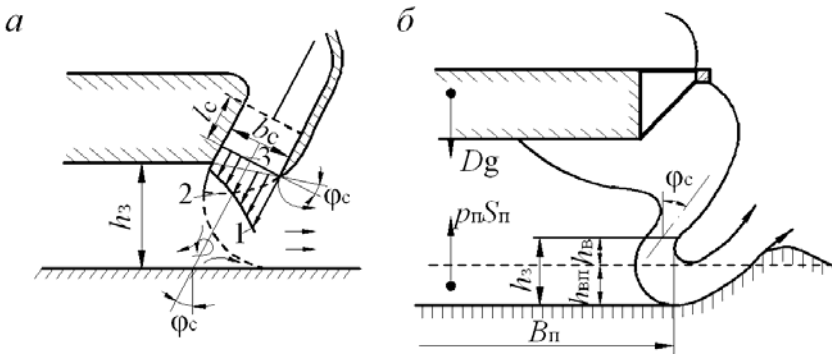


Рис. 2.3. Сопловое СВП:

a – в режиме висения над жестким экраном; *б* – в режиме висения над водой;
 1 – эпюра скоростей соплового потока; 2 – эпюра давлений в сопловом потоке;
 3 – нормальное сечение сопла

Несмотря на условность такого подхода, теоретическое решение дает удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, если при выводе основных уравнений взаимосвязи подъемных характеристик и геометрических параметров соплового устройства принят наиболее близкий к действительному закон распределения скоростей и давлений по ширине выходного сечения сопла. В современных аналитических расчетах чаще принимают экспоненциальный закон распределения скоростей по толщине потока (см. рис. 2.3).

Теоретические исследования соплового истечения на экран проводились как у нас (В.И. Ханжонков, В.В. Кличко, Г.Ю. Степанов и др.), так и за рубежом (Чаплин, Стентон Джонс, Стренд, Коен и др.). Прак-

тически наиболее приемлемыми расчетными методами являются способы, разработанные Стентоном Джонсом, В.И. Ханжонковым, В.В. Кличко.

В соответствии с этими разработками для расчета подъемных характеристик пользуются формулами

$$\bar{p} \approx \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{р}}} \approx 1 - e^{-Cx};$$

$$\bar{Q} \approx \frac{Q}{F_c V_c} \approx \frac{1}{x - e^{-x}},$$

где \bar{p} – коэффициент давления;

$p_{\text{п}}$ – давление в подушке;

$p_{\text{р}}$ – давление в ресивере;

e – основание натуральных логарифмов;

C – коэффициент; в соответствии с экспоненциальной теорией должен быть равен 2. Для реальных условий результат, близкий к действительным значениям, получается при $C = 1,67$ (при висении над твердым экраном). В расчетах СВП с гибким отражением принимается $C = 1,5$;

Q – секундный расход воздуха, м³/с;

$F_c = \Pi b$ – площадь выходного сечения сопла, м²;

Π – периметр соплового канала, м;

b – ширина сопла по нормальному сечению, м;

V_c – средняя скорость истечения воздуха, м/с:

$$V_c = \frac{2p_{\text{п}}}{\rho^{1/2}};$$

x – коэффициент, учитывающий влияние на подъемные характеристики угла наклона сопла φ_0 и отношение толщины соплового потока к высоте подъема t/h_3 . Коэффициент определяется по выражению

$$x = \frac{t}{h_3(1 + \sin \varphi_0)}.$$

Для определения подъемных характеристик СВП необходимо иметь исходные данные, в качестве которых принимаются:

- высота подъема над экраном h_3 ;
- давление в ресивере p_n ;
- угол наклона сопла φ_c (обычно $\varphi_c = 45^\circ$);
- площадь воздушной подушки S_n ;
- коэффициент потерь в нижнем ярусе ограждений $k_{ог}$.

Основными определяемыми величинами являются давление в подушке p_n подъемная сила

$$P = p_n S_n,$$

расход воздуха Q .

Особенности и примеры расчета сил поддержания и необходимого расхода воздуха для СВП с различными схемами образования ВП и ее секционирования подробно рассмотрены в книге [3].

Статическая остойчивость судов на воздушной подушке

Амфибийные СВП камерного типа и с одноконтурной сопловой схемой без секционирования воздушной подушки являются неустойчивыми судами.

Возникновение угла крена на камерных СВП практически не изменяет распределения давления по ширине подушки, и точка приложения равнодействующей сил давления и поддержания перемещения не имеет. В результате пара действующих на судно сил (сила массы судна и сила поддержания) создает не восстанавливающий, а наоборот, дополнительный кренящий момент

$$M_{кр} = DgZ \sin \theta \text{ (рис. 2.4);}$$

при этом возникает дрейф судна в сторону крена и создается опасный случай зарывания корпуса судна в воду.

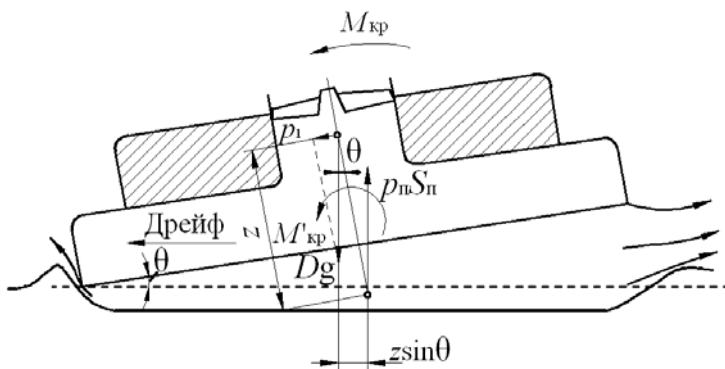


Рис. 2.4. Схема сил, действующих на камерное СВП при крене

На СВП с одноконтурной сопловой схемой при крене увеличивается реактивная сила истекающего воздуха в той части кольцевого сопла, которая приблизилась к экрану (воде). Но этого бывает недостаточно для восстановления равновесия, и судно продолжает крениться. Когда накрененный борт совсем близко подходит к воде (рис. 2.5), сопловой поток по направлению наименьшего сопротивления устремляется внутрь подушки. Вследствие эжекционного эффекта соплового потока под накрененным бортом давление понижается, что ухудшает остойчивость и создает условие для зарывания борта в воду.

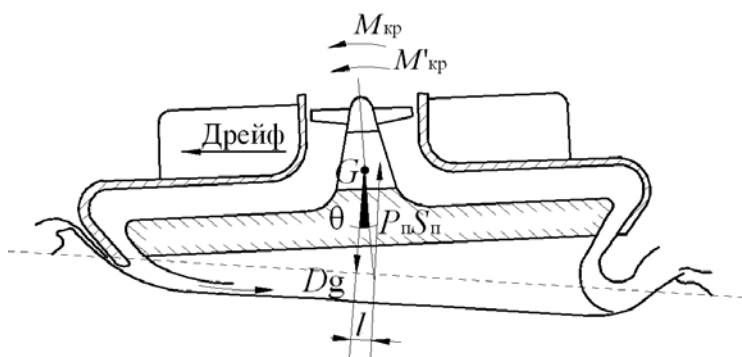


Рис. 2.5. Схема сил, действующих на СВП с одноконтурной сопловой схемой при крене

Остойчивость обеспечивается при двухконтурной сопловой схеме. В этом случае воздушный поток из внутреннего сопла препятствует изменению направления воздушных струй, выходящих из внешнего сопла, «выжимая» их во внешнюю сторону (рис. 2.6). В результате увеличивается давление в зоне между сопловыми потоками и повышается подъемная сила в области накрененного борта. Одновременно с этим радиус сопловых потоков возле приподнятого борта увеличивается, что уменьшает перепад давлений между рядами сопел и снижает подкупольное давление. Крен судна выравнивается.

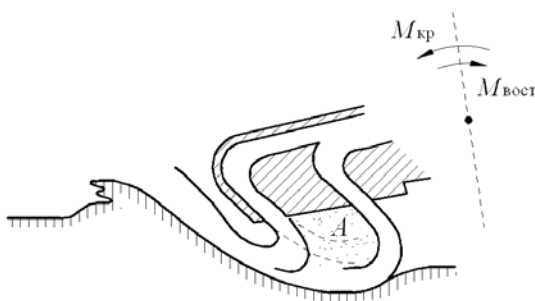


Рис. 2.6. К устойчивости двухконтурного соплового СВП:
A – зона повышенного давления

На современных амфибийных СВП с гибким ограждением основным конструктивным мероприятием, направленным на улучшение устойчивости, является секционирование воздушной подушки.

На рис. 2.7 показана схема действия сил на СВП с продольно-поперечным секционированием ВП, находящегося в режиме висения над твердым экраном.

Благодаря сопловому потоку воздуха из канала, расположенного в диаметральной плоскости, воздушная подушка разделяется на две изолированные секции. Можно принять в расчет, что давление в одной секции ВП не зависит от изменения давления в другой. Это предположение является практически приемлемым, если ресивер также будет соответственно разделен на секции, давление в которых будет независимо самостоятельным вследствие скоростного напора перемещающихся масс воздуха.

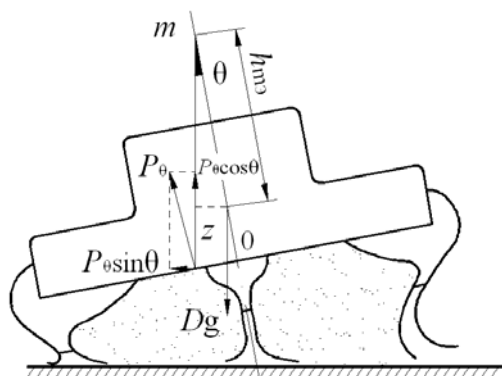


Рис. 2.7. Схема действия сил на СВП в режиме висения над экраном

При крене или дифференте судна давление воздуха в секции ВП под опущенной частью корпуса повышается. Это происходит потому, что сопловой поток воздуха, когда выходное сечение сопла находится близко у экрана, «разбивается» об опорную поверхность и значительная часть его устремляется внутрь подушки. В приподнятой части корпуса, наоборот, давление в подушке снижается в связи с удалением сопла от экрана и уменьшением перепада давлений по толщине соплового потока из-за уменьшения его кривизны. В результате общий центр давления ВП смещается от диаметральной плоскости в сторону крена. Вертикальная составляющая подъемной силы $P_0 \cos \theta$ и сила массы судна D образуют восстанавливающий момент, который может быть записан в виде общеизвестной метацентрической формулы остойчивости:

$$M_B = DgZ = gDh_{M3}\theta_3,$$

где h_{M3} – условная метацентрическая высота.

Аналогичную формулу можно написать и для случая крена СВП над водой (рис. 2.8).

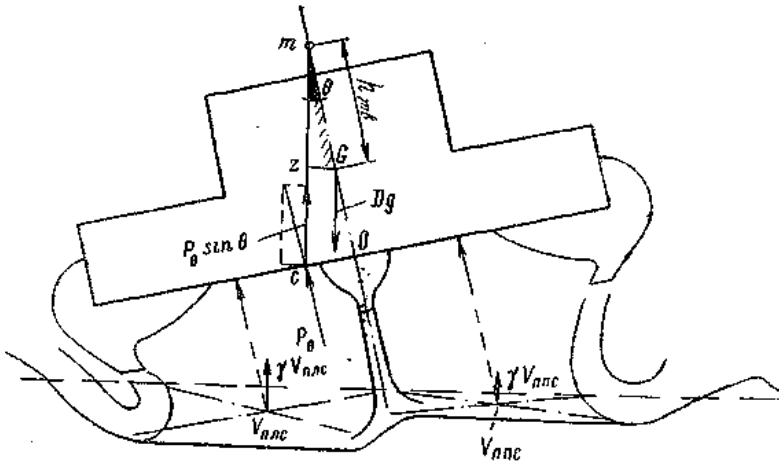


Рис. 2.8. Схема действия сил на СВП в режиме висения над водой

Из рис. 2.7, 2.8 видно, что метацентрическая высота ($h_{МЭ}$ или $h_{МВ}$) легко может быть определена из треугольника OmC , если известна ордината смещения центра давления ВП $y_{п} = \overline{OC}$. Определение этой ординаты, по существу, и составляет содержание расчетов по устойчивости СВП.

Критерием устойчивости амфибийных СВП может служить относительное смещение центра давления при крене судна на 1° , т. е. величина

$$\frac{y_{п}}{\theta} 100 \% = \frac{y_{п} 100}{B_{п} \theta} \%$$

Считается, что необходимый восстанавливающий момент будет обеспечен, если эта характеристика лежит в пределах 0,3–0,6 % на 1° крена.

Положение ЦТ, обеспечивающее положительную устойчивость амфибийных СВП, когда гибкое ограждение не касается твердого экрана, определяется условием

$$Z_g < \frac{B_{п.у.п.}}{2h_{0,3}^{\theta}},$$

где $h_{0,3}^{\theta}$ – средняя высота подъема гибкого ограждения над экраном в наклонном положении.

Остойчивость неамфибийных СВП хорошо обеспечивается водоизмещающими скегами и в начальной стадии проектирования не оценивается.

Вопросы устойчивости СВП подробно изложены [3].

2.2. Сопротивление движению судов на воздушной подушке

2.2.1. Сопротивление амфибийных судов на воздушной подушке

Составляющие сопротивления. Полное сопротивление СВП может быть представлено в виде суммы основных его составляющих [3]:

$$R = R_a + R_{имп} + R_b + R_{ост} + R_{волн}^{доп}, \quad (2.7)$$

где R_a – воздушное или аэродинамическое лобовое сопротивление;

$R_{имп}$ – импульсное сопротивление;

R_b – волновое сопротивление;

$R_{ост}$ – остаточное сопротивление;

$R_{волн}^{доп}$ – дополнительное сопротивление при волнении.

Воздушное сопротивление. Воздушное сопротивление вычисляется по формуле [3]

$$R_a = C_a \frac{\rho V^2}{2} S_{мид}, \quad (2.8)$$

где C_a – коэффициент аэродинамического сопротивления, зависящий от обтекаемости судна. Для обычных СВП его принимают в пределах $C_a = 0,4-0,5$;

V – суммарное значение скорости судна и встречного ветра, м/с;

$S_{мид}$ – площадь наибольшего поперечного сечения СВП, м².

При расчете составляющей R_a сопротивление элементов оперения СВП, аэродинамические рули, кили-стабилизаторы рекомендуется считать отдельно, исходя из условия, что сопротивление поверхностей этих элементов определяется воздействием на них высокой скорости воздушного потока от винтов.

Импульсное сопротивление. Эта составляющая обусловлена инерционным свойством масс воздуха, которые «захватываются» вентилятором и перемещаются вместе с судном. Величина импульсного сопротивления определяется теоретическим выражением

$$R_{\text{имп}} = mV = \rho QV, \quad (2.9)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;

Q – производительность вентилятора, м³/с;

V – скорость судна, м/с.

Часть импульсного сопротивления проявляется сразу же на входе воздуха в нагнетательную шахту, на стенках которой создается разность давлений: на кормовой половине ее поверхности образуются участки повышенного давления, а на носовой – разрежение (рис. 2.9). Таким образом, импульсное сопротивление зависит и от конструктивного оформления всасывающей части вентиляторной шахты.

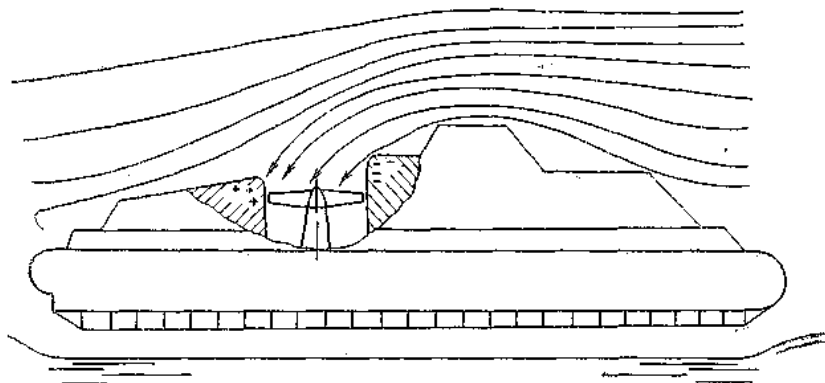


Рис. 2.9. Схема образования импульсного сопротивления

Импульсное сопротивление изменяется по линейному закону и на высокоскоростных судах может составлять существенную долю от полного сопротивления (до 30–35 %).

Волновое сопротивление. Волновое сопротивление у СВП, движущегося над водой, обусловлено деформированием водной поверхности под воздействием воздушной подушки. Таким образом, движущееся СВП можно рассматривать как перемещающийся источник давления, вызывающий образование волны на поверхности воды. Именно по этой модели и был дан ряд теоретических решений для практического определения волнового сопротивления. Механизм воздействия волны на судно через воздушную подушку и возникновение в результате этого воздействия тормозящей силы, названной *волновым сопротивлением*, отдельными исследователями трактуются по-разному. Например, Я.И. Войткунский рассматривает волновое сопротивление как результат перераспределения давлений воздуха вокруг СВП, вызванного волновой поверхностью воды под судном (и вокруг него). Такой подход, в принципе, является наиболее строгим и правильным, однако использовать его на практике весьма сложно. Более простое решение получают, когда волновое сопротивление рассматривается как результат взаимодействия поверхности и днища судна в предположении, что СВП при движении имеет дифферент на корму и его днище параллельно волновому склону. В этом случае равнодействующую сил нормального давления на днище можно приближенно считать вектором, замыкающим силовой треугольник, вертикальная сторона которого соответствует массе судна, а горизонтальная – волновому сопротивлению.

Исходя из такой предпосылки волновое сопротивление для практических целей можно определять по формуле [3]

$$R_v = \alpha Dq,$$

где α – максимальный угол волнового склона при расчетной скорости судна.

Очевидно, что значение угла α может быть определено только по результатам модельных испытаний и, если будет известна зависимость $\alpha = f(Fr_L)$, нетрудно рассчитать волновое сопротивление для различных скоростей движения СВП.

По результатам экспериментально-теоретических исследований волнообразования и волнового сопротивления сделаны следующие выводы:

1. Для амфибийных СВП, как коротких судов, характерна *поперечная* система волн. При увеличении отношения L/B дополнительно появляется система расходящихся волн и волновое сопротивление увеличивается.

2. Волновое сопротивление увеличивается с увеличением давления в воздушной подушке.

3. Величина волнового сопротивления находится в определенной зависимости от числа Фруда ($R_w = f(Fr_L)$). Наиболее выгодный режим наступает при $Fr > 0,6-0,7$. Начиная с этих относительных скоростей, волновое сопротивление монотонно убывает благодаря свойству инертности воды: она «не успевает» деформироваться при высоких скоростях, волны по мере увеличения скорости становятся меньше, волновое сопротивление падает.

Характерные кривые изменения относительного волнового сопротивления в зависимости от числа Фруда показаны на рис. 2.10, *а*. Как видно из этого графика, кривые волнового сопротивления имеют несколько «горбов» при выходе судна на расчетный режим движения. Наибольший «горб» на кривой сопротивления имеет место примерно при $Fr \approx 0,32$. Положение судна в момент выхода при разных числах Фруда показано на рис. 2.10, *б*.

Волновое сопротивление является главной составляющей полного сопротивления в режиме выхода на малых числах Фруда. Оно по абсолютному значению может приближаться к полному сопротивлению при расчетной скорости судна, поэтому при проектировании СВП очень важно определить волновое сопротивление в режиме разгона.

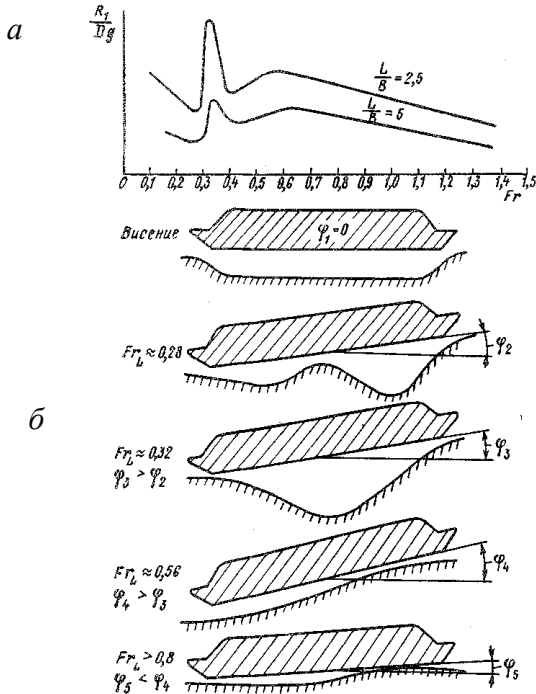


Рис. 2.10. Волновое сопротивление СВП:

a – кривые относительного сопротивления; *б* – схема волнообразования и углы дифферента при разбеге СВП

Его достоверное определение к сожалению, возможно лишь экспериментальным путем. Приближенную оценку значения можно сделать по формуле Ламба [3]

$$R_B = D \frac{2p_{\Pi}}{\rho L_{\Pi}} \left[1 - \cos \left(\frac{gL_{\Pi}}{V^2} \right) \right], \quad (2.10)$$

где D – масса судна, кг;

p_{Π} – избыточное давление в подушке, Па;

ρ – плотность воды, кг/м³;

L_{Π} – длина ВП, м;

g – ускорение силы тяжести;

V – скорость судна, м/с.

Эта формула достаточно точно отражает наличие ряда «бугров» на кривой сопротивления при разбеге судна, последний из которых соответствует числу $Fr_L = 0,563$.

Формула (2.10) получена из рассмотрения плоской системы поверхностных давлений, и ее целесообразно применять для определения волнового сопротивления скеговых СВП, поскольку скеги, ограничивая волны под днищем с боков по фронту, определяют плоский характер движения жидкости.

Для амфибийных СВП волновое сопротивление чаще определяется по зависимости В.П. Большакова [3]:

$$R_B = A \left(\frac{1}{Fr}, \frac{L_{\pi}}{B_{\pi}} \right) \frac{p_{\pi}^2 V^2}{\pi \rho g^2},$$

где A – коэффициент, определяемый по графику В.П. Большакова (см. гл. 3, рис. 3.2).

Определение волнового сопротивления при числе Фруда по ширине подушки $Fr_B > 1,0$, т. е. при установившемся режиме движения, также может быть выполнено по приближенной формуле [7]

$$R_B = 1,2 \frac{D}{B_{\pi}} \frac{p_{\pi}}{\rho} (Fr)^{-3/2}.$$

Все приведенные выше расчетные формулы относятся к режиму движения СВП на глубокой воде. На мелководье волновое сопротивление возрастает, и тем больше, чем меньше относительная глубина H/L_{π} и выше скорость. Однако волновое сопротивление на мелководье растет до определенного предела. Как показали опыты, рост R_B наблюдается при уменьшении коэффициента относительной глубины до 0,2–0,15; при дальнейшем уменьшении H/L_{π} волновое сопротивление не изменяется. В практических расчетах учет влияния мелководья обычно производится увеличением в 1,5–2 раза «горба» сопротивления, соответствующего глубокой воде.

Остаточное сопротивление. В состав остаточного сопротивления входят все трудноопределяемые составляющие, обусловленные брызгообразованием, реактивным воздействием потока воздуха, выходящего из подушки, контактом гибкого ограждения с водой, его замыканием водой при волнении и другими подобными явлениями.

Определение значений этих составляющих затруднительно даже при модельных испытаниях. Так как природа их различна, они обусловлены одновременно и силами вязкости, и поверхностным натяжением, и весомостью, а моделирование и пересчет результатов испытаний возможны лишь по какому-то одному критерию, например по числу Фруда. В связи с этим на результат пересчета заметное влияние оказывает масштабный эффект, поэтому масштаб моделей должен быть по возможности крупным. В целях получения наиболее достоверных результатов пересчета прибегают к испытанию полунатурных моделей.

Важнейшим проектно-геометрическим параметром СВП, во многом определяющим величину остаточного сопротивления, является относительный зазор, т. е. отношение величины воздушного зазора h_v между нижней частью ГО и уровнем воды к длине подушки L_n . При этом большую роль играет конструктивный тип самого гибкого ограждения. При более совершенном ограждении, например двухъярусном ГО с поперечно расчлененным нижним ярусом, относительный зазор может быть принят минимальным по своему значению, и это будет выгодно с точки зрения уменьшения затрат мощности на подъем и поддержание судна. При менее податливом ГО или без гибкого ограждения во избежание большого брызгообразования и замывания бортов или поверхности ограждения относительный воздушный зазор принимают по возможности наибольшим. По опыту эксплуатации английских СВП, приемлемыми можно считать следующие значения величины воздушного зазора в зависимости от конструктивного типа ограждения ВП:

без ГО	$h_v = (0,03-0,04)L_n$;
гибкий ресивер с гибким соплом	$h_v = (0,008-0,015)L_n$;
двухъярусные ГО	$h_v = (0,003-0,008)L_n$;

В диапазоне эксплуатационных скоростей остаточное сопротивление для амфибийных СВП составляет 20–35 % полного сопротивления.

Дополнительное сопротивление на волнении. Эта составляющая практически целиком определяется сопротивлением гибкого ограждения, хотя, несомненно, и собственно волновое сопротивление СВП, и импульсное сопротивление в условиях движения СВП на волнении будут как-то изменяться.

При проектировании СВП величину $R_{\text{волн}}^{\text{доп}}$ определяют по результатам модельных испытаний.

Практическая приближенная оценка этого сопротивления в начальной стадии проектирования может быть произведена по способу, изложенному в гл. 3.

2.2.2. Сопротивление скеговых судов на воздушной подушке

В отличие от амфибийных скеговые СВП имеют постоянный контакт с водой, и в состав полного сопротивления кроме отмеченных в уравнении (2.7) входит еще одна составляющая – сопротивление трения.

Сопротивление трения у скеговых СВП – одна из основных составляющих. Значение $R_{\text{тр}}$ составляет от 30–40 % полного сопротивления. Определяют $R_{\text{тр}}$ по выражению

$$R_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}} \frac{\rho V^2}{2} S,$$

где $\xi_{\text{тр}} = \xi_{\text{гп}} + \xi_{\text{ш}}$ – коэффициент сопротивления трения;

$$\xi_{\text{гп}} = \frac{0,455}{(\lg \text{Re})^{2,58}} - \text{коэффициент трения гладкой пластины};$$

$\xi_{\text{ш}}$ – коэффициент надбавки на шероховатость; можно принимать $\xi_{\text{ш}} = 0,25 \cdot 10^{-3}$;

S – смоченная поверхность скегов, м².

В первом приближении суммарную смоченную поверхность двух скегов можно определить по формуле

$$S = 2L_{\text{п}} \left[\frac{B_{\text{ск}}}{\cos \beta} + \left(T_{\text{ср}} - \frac{P_{\text{п}}}{\gamma} \right) \right],$$

где $L_{\text{п}}$ – длина ВП, м;

$B_{\text{ск}}$ – расчетная ширина скега, м;

β – угол внешней килеватости скега, град.;

$T_{\text{ср}}$ – средняя осадка скега, м;

$P_{\text{п}}$ – среднее давление воздуха в ВП, Па;

γ – удельный вес воды, Н/м³.

Воздушное сопротивление и сопротивление импульсное рассчитываются так же, как и для амфибийных СВП, – по формулам (2.8) и (2.9).

Волновое сопротивление, как уже упоминалось выше, можно рассчитывать по формуле Ламба (см. формулу (2.10)).

Остаточное сопротивление у скеговых СВП обусловлено не только теми причинами, которые отмечались для амфибийных СВП, но и сопротивлением формы скегов, а также выступающими частями (гребные валы, кронштейны, рули). Величину остаточного сопротивления определяют по модельным испытаниям или по близкому прототипу.

В приближенных расчетах волновое сопротивление иногда объединяют с остаточным и вычисляют их совместно, как одну составляющую.

Для кривой полного сопротивления скеговых СВП характерно наличие большого «горба» сопротивления (при $Fr_L = 0,5$), при котором сопротивление нередко превышает расчетное значение на полном ходу.

На рис. 2.11 приведены кривая полного сопротивления ССВП типа «Орион» и диаграмма состава этого сопротивления в зависимости от числа Фруда.

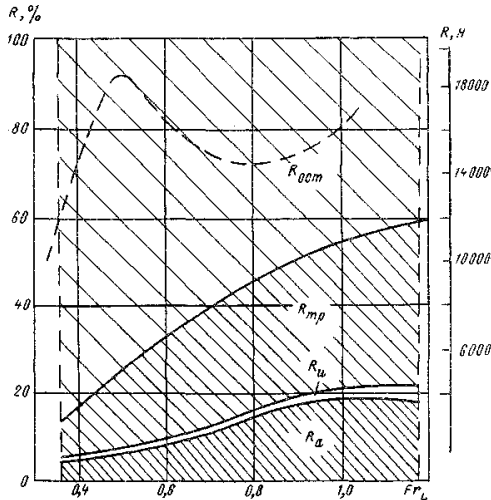


Рис. 2.11. Диаграмма составляющих полного сопротивления ССВП типа «Орион»: $R_a, R_и, R_{тр}, R_{ост}$ – относительные сопротивления (в процентах от Dg) соответственно: воздушное, импульсное, трения и остаточное в зависимости от числа Фруда; - - - кривая полного сопротивления $R = f(Fr_L), H$

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Создание судна на воздушной подушке – сложный и длительный динамический процесс, основные этапы которого – проектирование, строительство и испытание СВП [4].

Под **проектированием судна**, в том числе и СВП, принято понимать процесс разработки технической документации, определяющей основные элементы и характеристики судна, его архитектуру, принципы общего расположения, конструкцию отдельных узлов и агрегатов.

Процесс проектирования СВП включает, как правило, четыре этапа [4]:

- 1) исследовательское или предэскизное проектирование на стадии выработки концепции судна и обоснования его места в системе транспортных средств;
- 2) эскизное проектирование;
- 3) техническое проектирование;
- 4) разработка рабочих чертежей.

Проектирование СВП проводится стадиями последовательных приближений и в методическом плане не имеет особых отличий от проектирования других типов судов. Но проект СВП включает круг совершенно специфичных вопросов, связанных прежде всего с проектированием подъемного комплекса, и это коренным образом отличает его от проектов других типов судов, тем более что инженерное решение этих вопросов на стадиях эскизного и технического проектов связано с проведением большого комплекса испытаний на крупномасштабных моделях.

Наряду с общеизвестными основными характеристиками проектируемого судна (одни из которых задаются, а другие определяются в процессе проектирования) для СВП характерны такие первостепенно важные параметры, как площадь воздушной подушки, среднее давление в подушке, производительность вентилятора, мощность, необходимая для подъема, тяговооруженность, суммарная энерговооруженность и др.

Вместе с водоизмещением определение этих параметров производится в первую очередь, в самом начале проектирования.

Специфичными для разработки проекта СВП являются проектирование элементов гибкого ограждения, компоновка агрегатов энергетического оборудования, проектирование движительных комплексов, обеспечение остойчивости и управляемости и решение ряда других важных вопросов.

Выбор главных элементов СВП в начальной предэскизной стадии проектирования обычно проводится тремя приближениями.

В первом приближении намечаются варианты проектируемого судна, реально возможные в конкретных условиях проектирования в зависимости от требований заказчика. Для каждого варианта выполняют расчет так называемых независимых масс, а затем на основании статистических данных о СВП для каждого варианта определяют водоизмещение, главные размерения, мощность энергетической установки. На этой стадии обосновывают выбор архитектурного типа, разрабатывают эскизы общего расположения, позволяющие установить принципиальную возможность размещения пассажиров, грузов, основного оборудования при принятых главных размерениях [4].

Во втором приближении на основе полученных главных элементов проектируемого СВП по каждому варианту проекта более тщательно определяют водоизмещение с разбивкой его по отдельным составляющим массам и положение ЦТ по длине и высоте. Рассчитывается мощность подъема, выбираются параметры нагнетателей вентиляторов. Затем вычисляется сопротивление движению, уточняются суммарная мощность и состав энергетической установки, проверяются условия остойчивости и мореходности, производится расчет строительной стоимости.

Совместным графоаналитическим решением уравнений масс, мощности, мореходности и вместимости при различных значениях давления воздуха в подушке, а затем построением сводного графика зависимости водоизмещения, суммарной мощности и строительной стоимости от давления в подушке определяют оптимальный вариант проектируемого судна.

На основе полученных оптимальных значений водоизмещения, мощности и давления воздуха в подушке уточняются главные размерения, окончательно выбираются двигатели и вентиляторы, определяются элементы гибкого ограждения. Более тщательно прорабатываются компоновочные чертежи общего расположения и

принципиальная конструкция корпуса. Для разных случаев нагрузки составляются уравнения сил и моментов, действующих на СВП во время движения, в результате решения которых уточняется необходимая центровка и окончательно определяется размещение основных и расходных грузов.

В третьем приближении производятся проверочные расчеты общей и местной прочности, корректируются размеры конструктивных связей, и, если они заметно отклоняются от принятых во втором приближении, необходимо пересчитать и уточнить значение массы металлического корпуса и проверить влияние изменения этой составляющей на основные характеристики СВП.

К третьему приближению относится также ряд расчетов по статике и динамике СВП.

3.1. Проектирование амфибийных судов на воздушной подушке

3.1.1. Характерные величины и зависимости для амфибийных судов на воздушной подушке

Относительная скорость. Современные СВП имеют скорость от 40 до 90 уз. В проектах СВП для постройки в ближайшие годы предусматриваются скорости до 110 уз. При относительно малой массе и длине этих судов указанные скорости обуславливают весьма высокий скоростной режим движения. Число Фруда, взятое по водоизмещению для отдельного СВП, достигает 9,5, а по длине – 3,5 и более. Для большинства эксплуатируемых в настоящее время амфибийных СВП относительные скорости характеризуются числами Фруда в интервале $Fr_D = 4,5-6$ или $Fr_L = 1,75-2,75$. При проектировании СВП пользуются в основном числом Фруда, определяемым по длине судна.

Энерговооруженность. Отношение полной мощности энергетической установки к водоизмещению для эксплуатируемых СВП находится в пределах 22–125 кВт на 1 т водоизмещения. Энерговооруженность СВП зависит не только от скорости судна и пульсивного качества движителей, как это имеет место, например, на СПК, но и от параметров подъемного комплекса, в частности, от среднего давления ВП и зазора между нижней кромкой ограждения и опорной поверхностью, которые определяют расход воздуха и

потребную мощность для вентиляторов. Если исходить из теоретических предпосылок, в качестве комплексного параметра, определяющего изменение суммарной энерговооруженности, должно быть принято произведение числа Фруда на относительный зазор в свету, т. е.

$$\frac{N}{D} = f\left(\frac{Fr_L h}{L_n}\right).$$

Однако отсутствие достоверных данных по величине относительного зазора в свету для построенных СВП исключает возможность использования статистических данных для получения по этой зависимости надежной формулы, пригодной для использования на ранних стадиях проектирования.

Энерговооруженность СВП, если ее рассматривать в зависимости от числа Фруда (рис. 3.1), хотя и проявляет общую закономерность роста с увеличением относительной скорости, но отличается большим разбросом, который тем больше, чем больше относительная скорость.

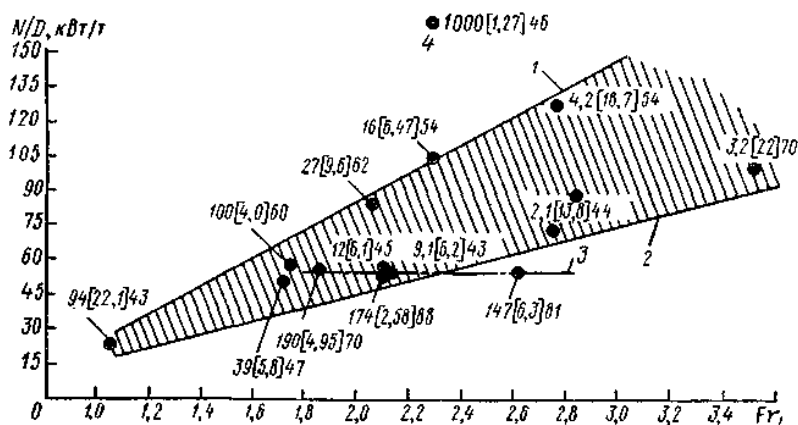


Рис. 3.1. Энерговооруженность СВП в зависимости от числа Фруда: 1 — верхние значения N/D ; 2 — нижние значения N/D ; 3 — постоянное значение $N/D \approx 54$ кВт/т; 4 — СВП для Арктики (проект). $N/D = 157$ кВт/т. Числа около точек означают: первое — водоизмещение, т; второе (в скобках) — LB/D м²/т; третье — скорость, уз

На базе этой зависимости при учете основных характеристик построенных СВП ($D, V, L_{\text{п}} \times B_{\text{п}}$) можно сделать лишь два общих вывода, которые полезно учитывать в начальной стадии проектирования:

1) наибольшую энерговооруженность, до 120 кВт/т, имеют малые СВП ($D = 2\text{--}5$ т), при высоких значениях чисел Фруда (около 2,8 и более). Эти СВП отличаются большим отношением LB/D (до $22 \text{ м}^2/\text{т}$);

2) наиболее крупные эксплуатируемые СВП ($D = 150\text{--}200$ т) при скорости от 70 до 88 уз, $Fr_L = 1,8\text{--}2,6$, имеют примерно одинаковое значение энерговооруженности, равное в среднем 54 кВт/т. Отношение LB/D для этих судов небольшое и находится в пределах $2,6\text{--}6,3 \text{ м}^2/\text{т}$.

Особенно большой энерговооруженностью отличается СВП водоизмещением 1000 т (см. рис. 3.1, точка 4). Это СВП (проект) предназначено для Арктики. Можно предположить, что для повышения проходимости над ледяными торосами и в целях предохранения гибкого ограждения по сравнению с обычными СВП предусмотрен существенно увеличенный зазор в свету. Давление в подушке также увеличено. Оно равняется 7900 Па, что в 2,5–3 раза больше, чем давление в подушке обычных СВП. При высоком давлении и большом зазоре в свету резко увеличиваются расход воздуха и мощность подъема судна. Таким образом, крайне высокая энерговооруженность объясняется большой мощностью вентиляторов в связи с особыми условиями эксплуатации СВП.

На существующих СВП мощность, затрачиваемая на подъем, составляет 33–40 %, иногда 50 % суммарной мощности или соответственно 50–67 %, иногда 100 % мощности, затрачиваемой на движение [3].

Тяговооруженность. Тяговооруженностью СВП называется отношение суммарной тяги движителей к потребляемой мощности T/N , Н/кВт. Эта величина для построенных СВП составляет 8–10 %. Большие значения тяговооруженности относятся к малым СВП, а меньшие – к большим судам. Максимальное значение тяговооруженности должно обеспечивать преодоление «горба» сопротивления при разбеге СВП на тихой воде с ускорением 0,05.

Среднее давление в ВП ($p_{\text{п}}$). Среднее давление для СВП по зарубежному опыту в начале проектирования рекомендуется принимать по зависимости [4]

$$p_{\Pi} = k(D)^{1/5}, \quad (3.1)$$

где p_{Π} – среднее давление в ВП, Па;

k – коэффициент пропорциональности, для пассажирских СВП принимаемый в пределах 900–1050;

D – расчетная масса, т.

Излишне высокое значение среднего давления в подушке увеличивает расход воздуха, волновое сопротивление (особенно на выходе) и брызгообразование (а следовательно, и необходимую мощность подъемного и движительного комплекса), а также обуславливает более «жесткий» ход СВП на волнении, что приводит к увеличению вертикальных ускорений, снижающих комфорт пребывания на судне.

Низкое давление в подушке приводит к увеличению габаритных размеров судна и его массы.

Таким образом, среднее давление в подушке является параметром, который не может назначаться произвольно, а должен определяться как результат комплексной оптимизации основных элементов и параметров проектируемого СВП в зависимости от условий мореходности, энерго- и тяговооруженности, от типа ГО, конструкции и материала корпуса и т. д.

В приведенной выше зависимости (3.1), рекомендуемой для использования в начальной стадии проектирования, коэффициент пропорциональности можно принимать равным 1500–2000, т. е. в 1,5–2 раза больше, если проектируемое СВП имеет какое-то специальное назначение, когда не предъявляются высокие экономические требования и при ходе на волнении допускаются повышенные ударные перегрузки.

В стадии эскизного проектирования, когда проводятся модельные испытания, для пересчета результатов с модели на натуру используются зависимость

$$p_{\Pi} = \bar{p}(D)^{1/3},$$

где p_{Π} – относительное давление.

Значение коэффициента $\overline{p_n}$ для большинства построенных СВП лежит в пределах 550–700, хотя в ряде случаев снижается почти до 300 (N.500 – 300, «Сормович» – 320) или же достигает 800 и более.

Отношение главных размерений ВП ($\lambda_n = L_n/B$). Величина отношения λ_n влияет на сопротивление движению, мощность подъема, остойчивость, компоновочную схему и на ряд других навигационных и эксплуатационных качеств СВП. Для построенных СВП отношение λ_n колеблется в пределах от 1,0 до 2,6. Нижний предел λ_n обеспечивает наименьшие затраты мощности на подъем и движение, но в ряде случаев затрудняет конструктивно-компоновочные решения, ухудшает мореходность и проходимость над участками суши, обуславливает некоторые неудобства при эксплуатации, например швартовочные операции.

Рекомендуется принимать $\lambda_n = 2-2,4$, но необходимо иметь в виду, что критерием выбора этого параметра является требование обеспечения остойчивости и мореходности.

Высота гибкого ограждения $h_{го}$. Высота ГО определяется требуемой мореходностью и по этим соображениям должна приниматься равной высоте расчетной волны 3%-й обеспеченности. Однако по требованию обеспечения остойчивости выбранная высота ГО должна удовлетворять следующим условиям [4]:

$$\begin{cases} h_{го} \leq (0,15 \dots 0,17) B_n; \\ \frac{B_n}{y_c + h_{го}} \geq 3, \end{cases}$$

где B_n – ширина воздушной подушки, м;

y_c – аппликата ЦТ, измеренная от нижней кромки гибкого ограждения, м. Расчет ГО амфибийных судов на воздушной подушке рекомендуется выполнять по методике В.В. Кличко.

3.1.2. Определение массы и выбор главных размерений судов на воздушной подушке в первом приближении

Для определения массы проектируемого СВП в первом приближении следует воспользоваться статистическими данными по укрупненным статьям нагрузки.

Для СВП зарубежной постройки характерны следующие показатели (в процентах от полного водоизмещения) [4]:

Полезная нагрузка.....	24–34
Топливо на 3,5 ч хода.....	15–9
Полезная нагрузка плюс топливо.....	39–43
Корпус с оборудованием.....	43–49
Энергетическая установка.....	9–14

Как видно из приведенных данных, наиболее устойчивым показателем (с расхождением 4 %) является относительное значение суммарной массы.

Таким образом, массу судна можно представить как величину, зависящую от $(p_p + p_{тп})$:

$$D = \frac{p_{гр} + p_{тп}}{0,35...0,43} = 2,3...2,6(p_{гр} + p_{тп}). \quad (3.2)$$

Поскольку масса топлива в начале проектирования неизвестна, ее следует представить в виде зависимости от водоизмещения, воспользовавшись формулой

$$p_{тп} = 0,06Dg_{тп} \frac{r}{V},$$

где $g_{тп}$ – удельный расход топлива в длительном режиме работы энергетической установки. В первом приближении для газотурбинной установки можно принять $g_{тп} = 0,35$ кг/кВт·ч;

r – дальность плавания на скорости полного хода, миля;

V – эксплуатационная скорость, уз.

Подставив $p_{тп}$ в (3.2), получим

$$D = 2,3...2,6 \left(p_{гр} + 0,06Dg_{тп} \frac{r}{V} \right). \quad (3.3)$$

Решив уравнение (3.3) относительно массы, при среднем значении коэффициента перед скобкой, равном 2,45, найдем

$$D = \frac{2,45 p_{\text{гр}}}{1 - 0,147 D g_{\text{тр}} \frac{r}{V}}.$$

Располагая массой судна и заданной скоростью, по прототипу и зависимостям, приведенным в параграфе 3.1.1, необходимо выполнить следующее:

– определить среднее давление в воздушной подушке и ее площадь

$$S_{\text{п}} = \frac{gD}{P_{\text{п}}};$$

– задаться отношением $\lambda_{\text{п}} = L_{\text{п}}/B_{\text{п}}$ и, принимая во внимание, что

$$S_{\text{п}} \approx 0,95 L_{\text{п}} B_{\text{п}} \approx 0,95 \lambda_{\text{п}} B_{\text{п}}^2,$$

определить ширину ВП $\left(B_{\text{п}} = 1,025 \sqrt{\frac{S_{\text{п}}}{\lambda}} \right)$ и ее длину ($L_{\text{п}} = \lambda_{\text{п}} B_{\text{п}}$);

– задаться типом ГО, определить его высоту и способом схематической прорисовки гибкого ограждения по периметру воздушной подушки и профилю поперечных сечений определить длину и ширину корпуса СВП;

– по числу Фруда, пользуясь прототипом и статистическими данными, выбрать предполагаемую энерговооруженность и по ней найти необходимую суммарную мощность энергетической установки;

– выбрать главные двигатели;

– наметить (принять) количество и расположение движителей и вентиляторов;

– выполнить предэскизную проработку общего расположения.

Убедившись в принципиальной возможности размещения груза, пассажиров и основного энергетического оборудования в принятых размерах корпуса, можно переходить ко второму приближению определения главных элементов проектируемого судна.

3.1.3. Определение главных элементов судов на воздушной подушке во втором приближении

Одной из первых задач второго приближения является уточнение нагрузки судна с разбивкой ее по отдельным статьям и определение положения ЦТ по длине и высоте СВП.

Полная масса СВП представляется в виде суммы отдельных ее составляющих по формуле [3]

$$D = P_k + P_{c.y} + P_M + P_{c.c} + P_{э.p.o} + P_{го} + P_{п.г} + P_3 + P_{сн} + P_{тп} + \Delta D. \quad (3.4)$$

Масса перевозимого груза $P_{п.г}$ и масса экипажа с запасами питьевой воды и продовольствия P_3 относятся к группе достоверных слагаемых уравнения (3.4), не зависящих от основных элементов и параметров СВП, и их нетрудно определить по условию задания.

Из остальных составляющих нагрузки СВП наиболее значительны массы корпуса с оборудованием P_k , энергетической установки P_M и топлива $P_{тп}$, и очень важно в самой начальной стадии проектирования определить их возможно точнее.

Масса корпуса P_k . В состав P_k входит металлический корпус с фундаментами и подкреплениями $P_{м.к}$, дельные вещи $P_{д.в}$, изоляция $P_{из}$, окраска и покрытие палуб $P_{о.п}$ и оборудование $P_{об}$.

Массу P_k и ее составляющие надежнее всего определять по прототипу. При отсутствии прототипа можно воспользоваться приближенными формулами, полученными по среднестатистическим зависимостям, например приведенными в [4]:

$$P_{м.к} \approx 0,022W_k;$$

$$P_{к-А} \approx 1,4P_{м.к} \approx 0,03W_k,$$

где W_k – суммарный объем корпуса с надстройкой, м³;

$P_{к-А} = P_k - P_{об}$ – «голый корпус», т. е. масса, соответствующая подразделу «А» в судостроительных расчетах нагрузки.

Объем W_k определяется по предэскизной схеме общего расположения по зависимости

$$W_k = H_{\text{мид}} S_{\text{п}} + W_p,$$

где $H_{\text{мид}}$ – высота корпуса на миделе, м;

$S_{\text{п}}$ – площадь ВП, м²;

W_p – объем надстройки с ходовой рубкой, м³.

Масса корпуса без оборудования («голый корпус») может быть приближенно определена и по формуле, также приведенной в [4]:

$$P_{\text{к-А}} = \left(0,175 + \frac{240}{P_{\text{п}}} \right) D, \quad (3.5)$$

где $p_{\text{п}}$ – среднее давление в воздушной подушке, Па;

D – водоизмещение, кг.

Масса оборудования $P_{\text{об}}$, входящая в состав массы корпуса $P_{\text{к}}$, при отсутствии прототипа для пассажирских СВП может быть оценена по приближенной зависимости [3]

$$P_{\text{об}} = 0,018\Pi,$$

где Π – число пассажиров.

Масса механизмов энергетического оборудования СВП $P_{\text{м}}$. В эту величину включаются главные вентиляторы, воздушные винты, редукторы, валы, воздухоочистительное устройство и другие элементы энергетической установки. Она определяется по выражению [3]

$$P_{\text{м}} = g_{\text{м}} N_{\text{уст}}, \quad (3.6)$$

где $g_{\text{м}}$ – относительная масса энергетического оборудования, кг/кВт;

$N_{\text{уст}}$ – полная установочная мощность энергетической установки, кВт.

Значение g_m следует принимать по прототипу или равным 2,18 кг/кВт.

Масса топлива и масла $P_{\text{тп}}$. Эта величина может быть определена по зависимости [4]

$$P_{\text{тп}} = \frac{1,36k_1k_2g_{\text{тп}}r}{V_3N_310^{-3}} + \Delta P_{\text{тп}},$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий надбавки на расход масла: $k_1 \approx 1,05$;

k_2 – коэффициент, учитывающий навигационный запас топлива на запуск двигателя, подход и выход из порта. Для внутренних водных путей принимают $k_2 = 1,05$; для морских условий $k_2 = 1,1$;

r – заданная дальность плавания, мили;

V_3 – эксплуатационная скорость судна, уз;

N_3 – эксплуатационная мощность, кВт.

Масса гибкого ограждения $P_{\text{го}}$. Эта величина ориентировочно определяется по зависимости [4]

$$P_{\text{го}} = 0,007S_{\text{п}}h_{\text{го}}.$$

Масса электрооборудования. Данная величина также ориентировочно может быть определена по зависимости

$$P_{\text{эл}} = k_{\text{эл}}D,$$

где $k_{\text{эл}}$ – коэффициент, зависящий от мощности потребителей, системы проводки, типа генераторов и кабелей, типа и мощности радиостанции и т. п.

Для морских судов принимается [4]:

$k_{\text{эл}} = 0,02$ при $D < 100$ т;

$k_{\text{эл}} = 0,03$ при $D > 100$ т.

Масса судовых систем $P_{\text{с.с.}}$ $P_{\text{с.с.}}$ принимается равной $0,035D$, масса жидких грузов $P_{\text{ж.г}}$ – равной $0,03D$ и масса по группе «снабжение, расходные материалы» $P_{\text{сн}}$ – равной $0,005D$.

В результате расчета составляющих масс судна во втором приближении уточняется водоизмещение и, если это необходимо, корректируются размеры и давление в воздушной подушке.

После этого следует перейти к уточнению требуемой мощности энергетической установки.

Мощность энергетической установки. Основными слагаемыми общей требуемой мощности для амфибийных СВП являются мощность, необходимая для движения судна с заданной скоростью, $N_{дв}$ и мощность для создания воздушной подушки $N_{п}$. Кроме того, часть мощности энергетической установки расходуется на вспомогательные нужды (привод различных механизмов, работа навешенных генераторов, обеспечение работы различных систем и т. п.) и теряется в передаточных системах (валы, редукторы) и в системах воздухоочистительных устройств. В результате изменения атмосферных условий речь идет о влиянии температуры засасываемого воздуха на режим работы газовых турбин и т. д.

Таким образом, уравнение суммарной требуемой мощности может быть представлено в виде

$$N_{\Sigma} = (N_{дв} + N_{п}) + N_{всп} = N + N_{всп},$$

где $N_{дв} + N_{п} = N$ – основная требуемая мощность.

Учитывая, что газотурбинные двигатели имеют длительный ресурс при работе с нагрузкой, не превышающей 0,9 их полной мощности, а наиболее экономичный режим движения амфибийных СВП соответствует скорости, близкой к полной расчетной, принимают

$$N_{\Sigma} \leq 90 \% N_{полн}.$$

Поскольку $N_{осп} \approx 11 \% N_{\Sigma}$ и примерно 11,25 % N , получаем

$$N = N_{п} + N_{дв} \leq 80 \% N_{полн}.$$

Таким образом, полную мощность энергетической установки следует принимать из расчета

$$N_{\text{полн}} = 1,25N, \quad (3.7)$$

где N – основная требуемая мощность на подъем и движение СВП в специфических условиях режима эксплуатации проектируемого СВП, кВт.

Основная требуемая мощность и скорость судна при полном водоизмещении рассчитываются для двух режимов эксплуатации:

1) на скорости длительного полного хода на тихой воде или при волнении 2–3 балла;

2) скорости хода при специфическом волнении и ветре при движении на неблагоприятных курсовых углах к волне.

В начальной стадии проектирования можно ограничиться одним расчетным режимом – движением на расчетном встречном волнении и ветре, соответствующим заданной мореходности.

Мощность, необходимая для движения СВП, определяется по формуле

$$N_{\text{дв}} = \frac{R_{\text{п}}^{\text{в}} V}{\eta_{\text{дв}}} 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (3.8)$$

где $R_{\text{п}}^{\text{в}}$ – полное сопротивление на волнении, Н;

V – скорость судна, м/с;

$\eta_{\text{дв}}$ – КПД движителя.

КПД воздушных винтов, которые обычно используются в качестве движителей на амфибийных СВП в предварительных расчетах для диапазона скоростей от 28 до 56 м/с, можно определить по эмпирической приближенной зависимости

$$\eta_{\text{дв}} = 79,2V \cdot 10^{-4} + 0,18,$$

где V – скорость судна, м/с.

Полное сопротивление на волнении представляется в виде суммы аэродинамического $R_{\text{а}}^{\text{в}}$, импульсного $R_{\text{имп}}^{\text{в}}$, волнового $R_{\text{в}}$, остаточного $R_{\text{ост}}$ и дополнительного сопротивления на волнении $R_{\text{волн}}^{\text{доп}}$, т. е.

$$R_{\Pi}^B = R_a^B + R_{\text{имп}}^B + R_{\text{ост}} + R_{\text{волн}}^{\text{доп}}.$$

Для приближенного расчета полного сопротивления задаются несколькими значениями (минимум – тремя) скоростей; для каждой скорости находят число Фруда $Fr_L = \frac{V}{\sqrt{gL_{\Pi}}}$ и в табличной форме также для каждой скорости определяют (в даН) следующие величины:

– аэродинамическое сопротивление

$$R_a^B = 0,05C_x\rho(V + V_B)^2 S_{\text{мид}}, \quad (3.9)$$

где $C_x = 0,4-0,5$ – коэффициент профильного сопротивления;

ρ – плотность воздуха: $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$;

V_B – скорость встречного ветра, принимаемая по шкале Бофорта для заданного волнения, м/с;

$S_{\text{мид}} \approx B_{\Pi}H_{\text{мид}} + h_{\text{го}}$ – плотность полного поперечного сечения СВП, м^2 ;

– импульсное сопротивление

$$R_{\text{имп}}^B = 0,102\rho Q(V + V_B), \quad (3.10)$$

где Q – объемный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$, определяемый по пересчету с прототипа ($Q = Q_{\text{прот}}m^{5/2}$) или по приближенным формулам.

В первом приближении полный расход воздуха в 1 с в условиях движения СВП на волнении может быть определен по следующим формулам [3]:

$$Q \approx 0,05 \sqrt{\frac{S_{\Pi} g D}{\pi \rho}}; \quad (3.11)$$

$$Q \approx 0,075 S_{\Pi} \sqrt{h_{\text{го}}}, \quad (3.12)$$

где S_{Π} – площадь ВП, м^2 ;

g – ускорение силы тяжести, м/с^2 ;

D – масса судна, кг;

ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ;

$h_{\text{го}}$ – высота гибкого ограждения, м;

волновое сопротивление [15]

$$R_B = A_B \frac{p_{\Pi}^2 V^2}{\pi \gamma g},$$

где A_B – коэффициент, определяемый по графику (рис. 3.2) в зависимости от (l/Fr_L) и λ_{Π} ;

p_{Π} – давление в ВП, Па;

γ – удельный вес воды, Н/м³;

остаточное сопротивление

$$R_{\text{ост}} = r_{\text{ост}} m^3,$$

где $r_{\text{ост}}$ – остаточное сопротивление прототипа при равных числах Фруда;

m – коэффициент подобия:

$$m = \sqrt[3]{\frac{D}{D_{\text{прот}}}}.$$

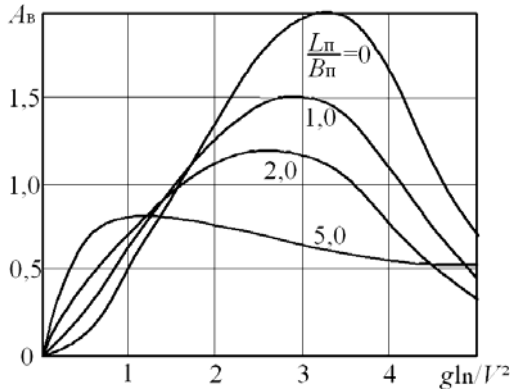


Рис. 3.2. Зависимости волнового сопротивления «воздушной подушки» от числа Фруда

В случае отсутствия прототипа величину остаточного сопротивления приблизительно можно оценить по графикам систематических испытаний буксируемых моделей, приведенных, например, в [4]; один из таких графиков приведен на рис. 3.3.

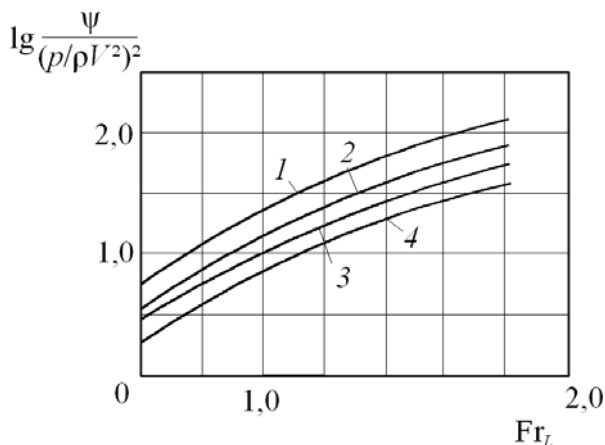


Рис. 3.3. Кривые постоянных значений относительного остаточного сопротивления

$R_{\text{ост}}/Dg$ модели СВП с комбинированным ГО:

1 – 0,03; 2 – 0,02; 3 – 0,01; 4 – 0,0008; φ – угол ходового дифферента

Приближенно остаточное сопротивление можно определить по зависимости

$$R_{\text{ост}} = (0,002 \dots 0,003) Dg.$$

Дополнительное сопротивление на волнении

$$R_{\text{волн}}^{\text{доп}} = r_{\text{волн}}^{\text{доп}} m^3,$$

где $r_{\text{волн}}^{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительного сопротивления, принимаемый по прототипу.

При отсутствии прототипа дополнительное сопротивление можно определить через его относительное значение по формуле

$$R_{\text{волн}}^{\text{доп}} = 0,102 \left(R_{\text{волн}}^{\text{доп}} / Dg \right) Dg,$$

где $R_{\text{волн}}^{\text{доп}} / Dg$ – относительное значение дополнительного сопротивления на волнении, определяемое по графику (рис. 3.4) в зависимости от числа Фруда и отношения расчетной высоты волны к волне гибкого ограждения.

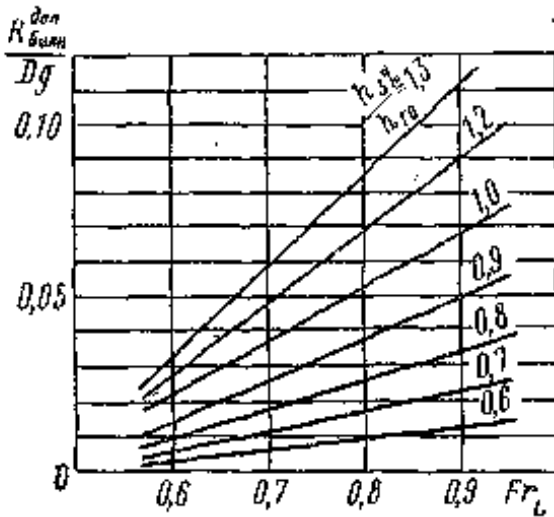


Рис. 3.4. Относительное дополнительное сопротивление на волнении в зависимости от числа Фруда и отношения расчетной высоты волны к высоте гибкого ограждения

По результатам расчетов полного сопротивления $R_{\text{п}}^{\text{в}}$ и мощности на движение $N_{\text{дв}}$ (формула (3.8)), проведенных для нескольких значений скоростей, строится совмещенный график $R_{\text{п}}^{\text{в}} = f(V)$ и $N_{\text{дв}} = f(V)$, по которому и определяются полное сопротивление и мощность, необходимая для на движения при заданной скорости (рис. 3.5).

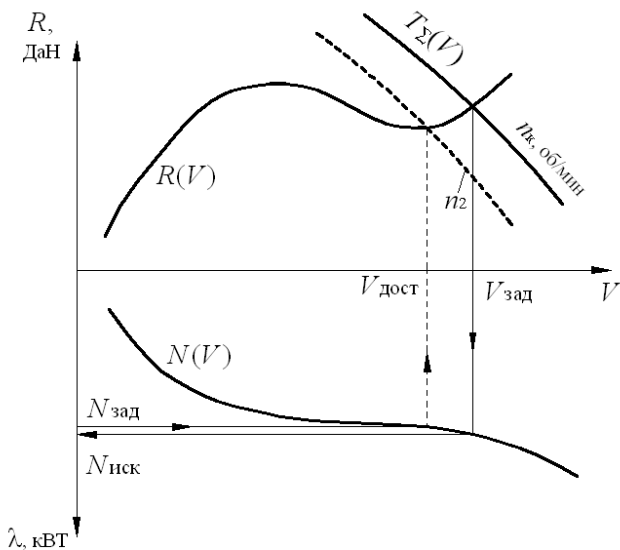


Рис. 3.5. Совмещенный график $R, T, N = f(V)$

Однако необходимо убедиться в том, что движители (воздушные винты), приемлемые для проектируемого судна по конструктивно-габаритным характеристикам, способны реализовать полученную мощность и при заданной скорости обеспечить необходимую суммарную тягу $T_{\Sigma} \geq R_{\text{п}}^{\text{в}}$. Для этого следует провести расчет движителя и на совмещенный график нанести кривую суммарной тяги винтов $T_{\Sigma} = f(V)$, см. рис. 3.5.

Совмещенный график кривых изменения $R_{\text{п}}^{\text{в}}$, T_{Σ} и $N_{\text{дв}}$ в зависимости от скорости позволит достаточно обоснованно решить задачу по определению необходимой мощности на движение СВП с заданной скоростью или, наоборот, определить достижимую скорость судна при мощности двигателя, намеченного для использования на проектируемом судне.

Мощность, необходимая для создания и поддержания воздушной подушки, приближенно определяется по формуле

$$N_{\Pi} = \frac{Q p_p}{\eta_B}, \text{ кВт,}$$

где Q – секундный расход воздуха, м³/с, определяемый по формулам (3.11) и (3.12) или по прототипу;

$p_p = 1,3 p_{\Pi}$ – давление в ресивере, Па;

$\eta_B = 0,5-0,65$ – КПД нагнетательной установки, учитывающий потери в вентиляторе и воздушных каналах и соплах.

Также для определения N_{Π} можно воспользоваться формулой Деккера:

$$N_{\Pi} = \frac{0,184D}{\eta_B} \left(1 + \frac{L_6}{B_{\Pi}} \right) \sqrt{p_{\Pi}}.$$

Полная мощность энергетической установки в соответствии с зависимостью (3.7) определится по выражению

$$N_{\text{полн}} = 1,25(N_{\text{дв}} + N_{\Pi}).$$

3.2. Проектирование скеговых судов на воздушной подушке

3.2.1. Характерные величины и зависимости для скеговых судов на воздушной подушке

Скорость движения. Абсолютная и относительная скорости скеговых СВП существенно ниже по сравнению с амфибийными. Для большинства построенных ССВП скорость движения лежит в пределах 25–40 уз при $F_{rL} = 1,0-1,4$. Однако ряд экспериментальных ССВП имеет более высокие скорости, достигающие 80 уз при $F_{rL} \approx 2,7$. На весьма высокие скорости (до 130–135 уз) рассчитываются и перспективные крупнотоннажные транспортные ССВП океанского плавания водоизмещением до 10 тыс. т.

При небольших размерах ССВП большие скорости обуславливают высокий скоростной режим движения водоизмещающих скегов ($F_{rL} < 2,5$), вследствие чего резко возрастает их сопротивление. Для таких ССВП характерны весьма высокая энерговооруженность и низкое значение коэффициентов буксировочного gD/R и

пропульсивного $g\eta D/R$ качества. Так, для ССВП НМ5 ($D = 73$ т, $V = 40$ уз, $N = 2350$ кВт) пропульсивное качество $k_{\eta} = 6,8$, а для экспериментального ССВП SES 100 В ($D = 100$ т, $V = 79$ уз, $N = 11000$ кВт) коэффициент $k_{\eta} = 3,6$. Наоборот, при больших размерах скеговых судов, несмотря на высокие значения абсолютных скоростей, скоростной режим движения по числу Фруда оказывается умеренным или не особенно высоким ($Fr_L < 2$), и в результате энерговооруженность падает, а пропульсивное качество заметно возрастает. Так, ССВП водоизмещением 10 000 т при скорости $V = 115$ уз и мощности 367 500 кВт (проект) имеет $k_{\eta} = 16$ [3].

Энерговооруженность. Для ССВП, как и для других судов, этот показатель ($N_{вст}/D$) зависит от скорости, массы и пропульсивного КПД движителя. В начальной стадии проектирования энерговооруженность ССВП может быть приближенно определена по графику (рис. 3.6). При составлении графика использованы статистические данные и результаты проектных расчетов, проведенных за рубежом [3].

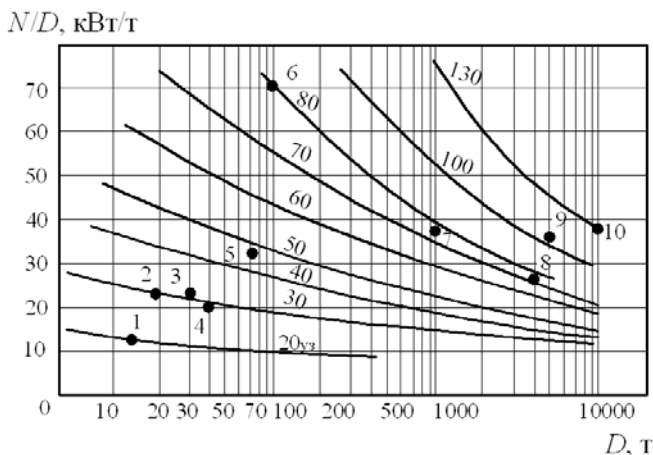


Рис. 3.6. Изменение энерговооруженности ССВП в зависимости от водоизмещения и скорости:

1 — «Зарница»; 2 — НМ-2МКП; 3 — «Орион»; 4 — «Рассвет»; 5 — НМ-5 ($V = 40$ уз); 6 — ESE = 100 В ($V = 80$ уз); 7 — проект ($V = 74$ уз); 8 — проект ($V = 78$ уз); 9 — проект ($V = 108$ уз); 10 — проект ($V = 130$ уз)

Среднее давление в воздушной подушке. В связи с тем что расход воздуха у скеговых судов происходит через относительно

меньший периметр воздушной подушки (только через носовое и кормовое гибкие ограждения), среднее давление в ней может быть взято, в принципе, больше, чем для амфибийных СВП. Так, зарубежные специалисты в проектно-исследовательских проработках перспективных ССВП принимают эту величину от 5000 до 30 000 Па при относительном давлении $\bar{p} = p_{\text{п}}/D^{1/3}$ от 400 до 1200. При этом некоторые фирмы считают, что оптимальное давление определяется отношением $p_{\text{п}}/L_{\text{п}} = 235 \text{ Н/м}^3$.

Для существующих ССВП давление $p_{\text{п}}$ лежит в пределах 2000–4000 Па, отношение $p_{\text{п}}/L_{\text{п}}$ – в пределах 90–200 Н/м^3 , а относительное давление $\bar{p} = 700\text{--}1000$.

Выбор среднего давления воздуха $p_{\text{п}}$ для проектируемого ССВП в конечном итоге производится в зависимости от площади воздушной подушки $S_{\text{п}}$, которая определяется размерами судна, необходимыми для размещения пассажиров, груза и энергетического оборудования и объема погруженной части скегов $V_{\text{ск}}$. Оно может быть определено по выражению [3]

$$p_{\text{п}} = \frac{gD - \gamma V_{\text{ск}}}{S_{\text{п}}}. \quad (3.13)$$

Относительная длина воздушной подушки. Для существующих ССВП относительная длина воздушной подушки $\lambda = L_{\text{п}}/B_{\text{п}}$ колеблется в больших пределах (от 1 до 8). Наиболее приемлемым значением этого отношения следует признать $\lambda = 2,5\text{--}5$. Увеличение относительной длины ВП позволяет уменьшить волновое сопротивление и улучшить ходовые качества, но затрудняет обеспечение необходимой поперечной остойчивости и общей продольной прочности; последнее может привести к увеличению массы металлического корпуса. При движении в условиях волнения излишне удлиненное ССВП обладает большим сопротивлением.

В реальных условиях проектирования оптимальное значение отношения λ выбирается в результате испытания крупномасштабных моделей.

Относительные размеры скегов. Скеги выполняют в основном две функции: ограждают воздушную подушку с бортов и обеспечи-

вают необходимую поперечную остойчивость судну. Исходя из этих назначений скегов и определяют их размеры.

В результате исследований, проведенных Д.Н. Васильевым, В.К. Зороастровым и В.В. Шаталовым, установлено, что элементы скегов зависят только от λ_{π} , \bar{p} , \bar{h} и не зависят от V и D .

Здесь $\lambda = L_{\pi}/B_{\pi}$ – относительная длина подушки;

$\bar{p}_{\pi} = p_{\pi}/D^{1/3}$ – относительное давление воздуха в ВП;

$\bar{h}_{\text{м}} = h_{\text{м}}/B$ – относительная поперечная метацентрическая высота;

B – полная ширина судна, м;

V – скорость, м/с;

D – масса ССВП, т.

При фиксированных значениях относительной метацентрической высоты $\bar{h}_{\text{м}}$ отношение суммарной ширины скегов к ширине ВП может быть представлено как многозначная функция в зависимости от λ и \bar{p}_{π} :

$$\frac{2B_{\text{ск}}}{B_{\pi}} = f(\lambda, \bar{p}) \text{ при } \bar{h}_{\text{м}} = \text{const.} \quad (3.14)$$

Аналогичной зависимостью выражается и значение отношения суммарного водоизмещения скегов к водоизмещению судна, т. е.

$$\frac{2D_{\text{ск}}}{D} = f(\lambda, \bar{p}) \text{ при } \bar{h}_{\text{м}} = \text{const.} \quad (3.15)$$

И относительная ширина скегов, и относительное водоизмещение возрастают с увеличением λ , и тем быстрее, чем больше \bar{p}_{π} . При постоянных значениях λ и \bar{p}_{π} ширина и водоизмещение скегов увеличиваются с ростом значения $\bar{h}_{\text{м}}$.

Для обеспечения необходимой остойчивости ССВП рекомендуется удовлетворение условия

$$\bar{h}_{\text{м}} \geq 0,5.$$

Кривые зависимостей (3.14) и (3.15) при $\bar{h}_M = 0,5$ приведены на рис. 3.7 и 3.8. Пользуясь этими графиками, при известных значениях B_{Π} , \bar{p} и D (а они определяются в первую очередь), легко найти значение ширины skeгов $B_{ск}$ и их водоизмещение $D_{ск}$.

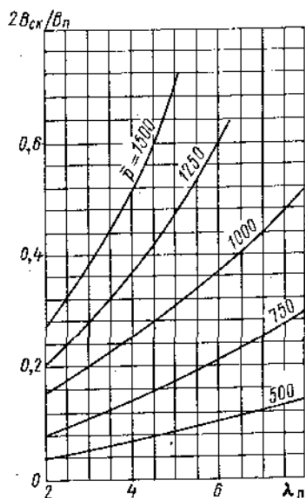


Рис. 3.7. Изменение относительной ширины skeгов в зависимости λ_{Π} при фиксированном значении \bar{p}

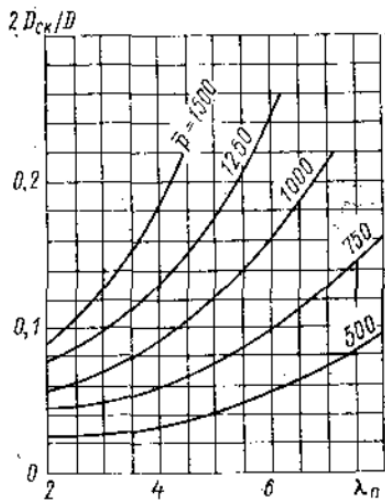


Рис. 3.8. Изменение относительного водоизмещения skeгов в зависимости от λ_{Π}

Ориентируясь на построенные ССВП и проектные проработки, приближенно можно принимать $\frac{2B_{ск}}{B_{\Pi}} = 0,2$ для речных судов (при $p_{\Pi} = (2-2,5) \cdot 10^3$ Па) и $\frac{2B_{ск}}{B_{\Pi}} = 0,4$ для морских (при $p_{\Pi} = (3-3,5) \cdot 10^3$ Па).

Водоизмещение skeгов, определяемое по их средней осадке в положении висения (при статическом положении судна на подушке), приблизительно составляет $0,1D$ и более для грузовых судов.

Высота skeгов выбирается из условия мореходности. Она должна приниматься не менее высоты волны 3%-й обеспеченности при заданной мореходности. По некоторым зарубежным рекомендациям, высоту skeгов следует принимать из условия

$$H_{\text{ск}} \geq 0,075L_{\text{п}}. \quad (3.16)$$

Для ССВП средняя высота скегов составляет:

$$H_{\text{ск}} = (0,02-0,03)L_{\text{п}} - \text{для речных ССВП}; \quad (3.17)$$

$$H_{\text{ск}} = (0,068-0,078)L_{\text{п}} - \text{для морских ССВП}.$$

Расход воздуха. Расход воздуха из воздушной подушки у скеговых судов значительно меньше, чем у амфибийных, и требуемая мощность и производительность вентилятора также намного меньше. Тем не менее определение этой величины, необходимой для подбора вентилятора и определения потребной суммарной мощности энергетической установки, является важным вопросом проектирования ССВП, решать который следует в самой начальной стадии разработки проекта.

Для определения необходимой производительности вентилятора обычно используются эмпирические и полуэмпирические формулы, многие из которых получены с учетом действия волнового поршня, вытесняющего воздух из подушки.

Наиболее близкий к действительному результат дает формула Е.П. Роннова:

$$Q = kk_V B_{\text{п}} \frac{h_{\text{в}}}{2} V,$$

где $k = 0,6$ – коэффициент, характеризующий частичную стабилизацию ССВП на волнении;

$k_V = 0,6$ – коэффициент, учитывающий снижение скорости судна на волнении;

$h_{\text{в}}$ – высота расчетной волны. Ее следует принимать равной $H_{\text{ск}}$;

V – скорость движения судна, м/с.

Расход воздуха может быть оценен по формуле

$$Q = \frac{10^3 N_{\text{п}} \eta_{\text{в}}}{P_{\text{п}}}, \quad (3.18)$$

где $N_{\text{п}}$ – мощность подъема, кВт;

η_v – коэффициент полезного действия нагнетательной системы вентилятора, воздушных каналов. В первом приближении можно принять $\eta_v = 0,5-0,6$;

$p_{\text{п}}$ – давление в воздушной подушке, Па.

Мощность подъема может быть выражена зависимостью

$$N_{\text{п}} = 10^{-3} h_v g D, \text{ кВт}, \quad (3.19)$$

где h_v – высота подъема, на обеспечение которой расходуется мощность вентилятора;

D – масса судна, кг.

3.2.2. Определение полной массы и выбор главных размерений скегов судов на воздушной подушке в первом приближении

Как и в случае проектирования амфибийных СВП, для определения массы ССВП в первом приближении следует воспользоваться статистическими данными по нагрузке судов.

Для отечественных и зарубежных пассажирских ССВП характерны следующие значения основных групп нагрузки, процент от полной массы:

Корпус с оборудованием	32–42
Энергетическая установка	5–20
Запасы топлива и масла	3–9
Полезная нагрузка	18–31
Дедвейт (полезная нагрузка плюс топливо)	23–36

Приведенные данные показывают, что наиболее интересующие нас коэффициенты утилизации водоизмещения по полезной нагрузке и дедвейту не отличаются стабильностью. Тем не менее, как и в случае с амфибийными СВП, для определения водоизмещения в первом приближении следует воспользоваться выражением

$$D = \frac{P_{\text{гр}} + P_{\text{тп}}}{\eta_{d\omega}}, \quad (3.20)$$

где $\eta_{d\omega} = \frac{P_{\text{гр}} + P_{\text{тп}}}{D}$ – коэффициент утилизации водоизмещения.

Для морских пассажирских ССВП значение коэффициента приближенно можно оценить по выражению

$$\eta_{d\omega} = 0,217\Pi^{0,15} - 0,152, \quad (3.21)$$

где Π – заданное количество пассажиров.

Формулой (3.21) можно пользоваться при расчете $\eta_{d\omega}$ для судов с количеством пассажиров от 50 до 300, дизельными установками, скоростью 30–40 уз и дальностью пробега 200–250 миль.

В других случаях следует ориентироваться на прототип.

Определив значение $\eta_{d\omega}$, расчет следует вести по формуле (3.20) в том же порядке, как это было рассмотрено в п. 3.1.2. Для выражения массы топлива через водоизмещение следует воспользоваться формулой

$$P_{\text{тп}} = 0,054D \frac{r}{V},$$

если на проектируемом судне предполагается дизельная установка. Вместо уравнения (3.3) для решения принимается зависимость

$$D = \frac{1}{\eta_{d\omega}} \left(P_{\text{гр}} + 0,054D \frac{r}{V} \right).$$

Определение $P_{\text{гр}}$ для пассажирских ССВП рекомендуется производить из расчета массы одного пассажира, равной 0,09 т.

После определения массы с учетом изложенного в п. 3.2.1 необходимо выполнить следующее:

– в зависимости от заданной скорости оценить энерговооруженность (по графику на рис. 3.6 или по прототипу) и по ней определить требуемую суммарную мощность $N = (N/D)D$, выбрать необходимый двигатель;

– задаться давлением воздуха в воздушной подушке, определить относительное давление и длину ВП из соотношения $p_{\text{п}}/L_{\text{п}} = 100\text{--}240 \text{ Н/м}^3$;

– из выражения (3.13), принимая $\gamma V_{\text{ск}} = 0,1D$, определить площадь воздушной подушки, а затем ее ширину ($B_{\text{п}} = S_{\text{п}}/L_{\text{п}}$) и убедиться, что отношение $L_{\text{п}}/B_{\text{п}}$ не выходит за рекомендуемые пределы 2,5–5;

– по графикам на рис. 3.7 и 3.8 определить минимальное значение ширины и водоизмещения скегов, а по зависимостям (3.16) и (3.41) выбрать их высоту;

– выполнить предэскизную проработку архитектурно-компоновочной схемы с общим расположением всех основных и вспомогательных помещений судна. На основе этой проработки уточнить принятые размеры подушки, ее параметры, размеры скегов.

Приведенная схема последовательности выбора основных параметров ВП и элементов судна пригодна при наличии близкого прототипа и опыта проектирования. При других обстоятельствах трудно рассчитывать на удачное решение с первого раза и поэтому расчеты по выбору основных характеристик проектируемого ССВП целесообразно вести одновременно в нескольких вариантах.

Для этого необходимо задаться минимум тремя значениями относительных давлений (например, $\bar{p}_{п1} = 750$, $\bar{p}_{п2} = 1000$, $\bar{p}_{п3} = 1250$) и каждое из них рассматривать для нескольких значений относительной длины воздушной подушки. Следует принять также минимум три значения $\lambda_{пi}$, охватывающих реально возможные значения отношений $L_{пi}/B_{пi}$. Можно принять, например, $\lambda_{п1} = 2,5$, $\lambda_{п2} = 4$, $\lambda_{п3} = 6$.

В результате получаем девять сочетаний \bar{p}_i и λ_i , для которых и необходимо определить размеры воздушной подушки, водоизмещение и основные размеры скегов. Расчет следует вести в табличной форме по схеме, приведенной в таблице. Расчет несложный и не отнимает много времени, но в результате его проведения удобно отобрать три варианта из девяти для дальнейшего исследования в целях достижения оптимального решения задачи по разработке проекта.

Расчетная схема выбора основных параметров воздушной подушки снеговых судов в первом приближении

Расчетные формулы	\bar{p}_1			\bar{p}_2			\bar{p}_3		
	$\lambda_{п1}$	$\lambda_{п2}$	$\lambda_{п3}$	$\lambda_{п1}$	$\lambda_{п2}$	$\lambda_{п3}$	$\lambda_{п1}$	$\lambda_{п2}$	$\lambda_{п3}$
$p_{п} = \bar{p}_{п} \sqrt[3]{Dg}$, Па	$p_{п1}$			$p_{п2}$			$p_{п3}$		
$\frac{2D_{ск}}{D} = f(\lambda_{пi}, p_{пi}) = A$	A_1	A_2	...	...	...	...	...	A_8	A_9

Расчетные формулы	\bar{p}_1			\bar{p}_2			\bar{p}_3		
	$\lambda_{п1}$	$\lambda_{п2}$	$\lambda_{п3}$	$\lambda_{п1}$	$\lambda_{п2}$	$\lambda_{п3}$	$\lambda_{п1}$	$\lambda_{п2}$	$\lambda_{п3}$
По графику рис. 3.8 $2D_{ск} = AD$, кг	$2D_{ск1}$	...	...	...	...	...	...	...	$2D_{ск9}$
$S_{п} = \frac{(D - 2D_{ск})g}{p_{п}}$, м ²	$S_{п1}$	$S_{п2}$	...	...	...	...	...	$S_{п8}$	$S_{п9}$
$B_{п} = \sqrt{S_{п}/\lambda_{п}}$, м	$B_{п1}$	$B_{п2}$	...	...	...	...	...	$B_{п8}$	$B_{п9}$
$L_{п} = \lambda_{п}B_{п}$, м	$L_{п1}$	$L_{п2}$	...	...	...	...	...	$L_{п8}$	$L_{п9}$
$\frac{2B_{ск}}{B_{п}} = f(\lambda_{п}, p_{п}) = B$	B_1	B_2	...	...	...	...	...	B_8	B_9
По графику рис. 3.8 $2B_{ск} = BB_{п}$, м	$2B_{ск1}$	...	...	...	...	...	...	$2B_{ск8}$	$2B_{ск9}$
$H_{ск} = 0,075L_{п}$, м, или принять $H_{ск} = \text{const}$	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$h_{вп} = p_{п}/\gamma$, м	$h_{вп1}$			$h_{вп2}$			$h_{вп3}$		
$N_{п} = h_{в}p_{п}S_{п}$, Вт	$N_{п1}$	$N_{п2}$	...	...	...	...	...	$N_{п8}$	$N_{п9}$
$Q = \frac{N_{п}\eta}{p_{п}}$, м ³ /с	Q_1	Q_2	...	...	...	...	...	Q_8	Q_9

По данным расчета необходимо построить график изменения всех расчетных величин в зависимости от $\lambda_{п}$ (рис. 3.9, а) и перейти к эскизной проработке общего расположения судна, которая позволит установить приемлемые значения $B_{п}$ и $\lambda_{п}$ с точки зрения наилучших компоновочных решений. Желательно рассмотреть не менее трех вариантов возможных схем общего расположения, изменяя, например, число пассажирских кресел в поперечных рядах, расположение машинного отделения по длине судна и т. д.

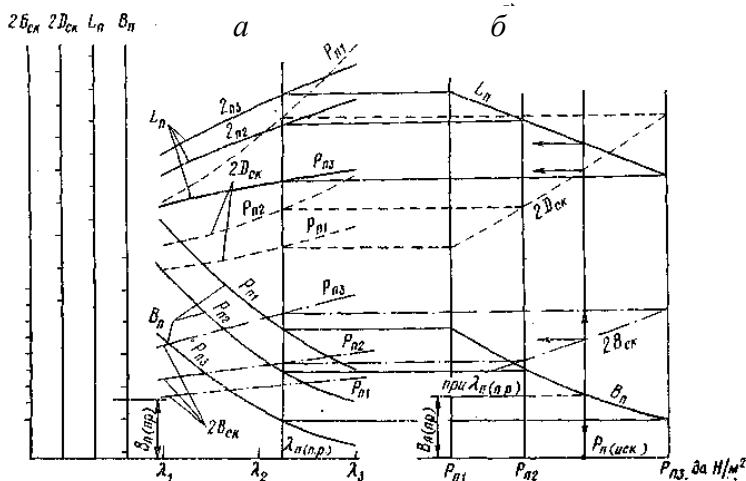


Рис. 3.9. Изменение размеров ВП и скегов в зависимости от p_n и λ_n к вариантному расчету основных характеристик ССВП:

$a - B_n, L_n, 2B_{ск}, 2D_{ск}, \dots = f(\lambda_n)$ при $p_n = \text{var}$; $b - B_n, L_n, 2B_{ск}, \dots = f(p_n)$ при постоянном λ_n (принятом)

Таким образом, будут приняты три значения отношения λ_n , которые можно обозначить $\lambda_{n(пр)1}$, $\lambda_{n(пр)2}$, $\lambda_{n(пр)3}$. Для этих фиксированных значений λ_n с упомянутого графика, построенного по результатам вариантного расчета, следует снять значение расчетных величин и построить кривые их изменения в зависимости от давления (рис. 3.9, б). По этим кривым легко найдутся все расчетные характеристики (p_n , $2B_{ск}$, $2D_{ск}$ и др.) для соответствующих значений ширины или длины ВП по принятым вариантам общего расположения [3].

3.2.3. Определение основных проектных характеристик скеговых судов на воздушной подушке во втором приближении

Во втором приближении уточняется масса проектируемого судна по ее основным разделам, производится приближенный расчет сопротивления движению для различных скоростей при фиксированных значениях главных размерений, а также предварительный расчет двигателей, уточняется суммарная мощность и состав энергетической установки, разрабатывается эскиз теоретического чертежа, уточняется общее расположение и определяется центровка судна.

Масса ССВП. Как и для обычных судов, различают несколько видов массы проектируемого ССВП, характеризующихся составом его нагрузки. При проектировании обычно рассматриваются следующие массы:

1. *Строительная масса* – масса полностью готового судна без какого-либо переменного груза на нем. В состав этой массы входят корпус с оборудованием, судовые устройства и системы, энергетическая установка, электро- и радиооборудование.

2. *Масса порожнего судна D_0* – масса порожнего судна в его эксплуатационном состоянии, когда на нем находятся экипаж, провизия, снабжение и так называемые жидкие грузы, представляющие собой остатки воды, масла и топлива в корпусе и трубопроводах различных общесудовых и машинных систем; основные запасы топлива, воды и масла отсутствуют.

3. *Масса порожнего судна с полными запасами топлива, командой и балластом* – масса судна, полностью готового начать транспортные операции по перевозке груза и пассажиров.

4. *Полная масса судна D* , состоящая из его массы «порожнем» D_0 , массы полных запасов топлива, воды и масла $P_{\text{тп}}$ и массы перевозимого груза $P_{\text{гр}}$. Последние две массы образуют так называемый дедвейт судна.

Наиболее сложной задачей расчета полной массы проектируемого судна является определение строительного водоизмещения по статьям нагрузки:

– $P_{\text{к-А}}$ – «голый корпус», включающий $P_{\text{к.м}}$ – металлический корпус, $P_{\text{ф}}$ – фундаменты и подкрепления, дельные вещи, $P_{\text{окр}}$ – окраску, $P_{\text{из}}$ – изоляцию и $P_{\text{покр}}$ – покрытия;

– $P_{\text{об}}$ – оборудование пассажирских жилых и служебных помещений;

– $P_{\text{св}}$ – судовые устройства, в том числе и устройство по ограждению воздушной подушки;

– $P_{\text{с.с}}$ – судовые системы;

– $P_{\text{м}}$ – машинная установка;

– $P_{\text{э}}$ – электрооборудование;

– $P_{\text{вн}}$ – внешняя связь, радиолокационное штурманское оборудование.

Масса «голового корпуса». Из приведенных статей нагрузки наиболее значительными являются $P_{к-А}$ и $P_{м}$. Поэтому в первую очередь именно эти нагрузки следует определить с наибольшей достоверностью, что на ранней стадии проектирования, к сожалению, возможно лишь при наличии близкого прототипа.

При отсутствии прототипа для определения массы «голового корпуса» можно воспользоваться формулой (3.5), но с введением в нее поправочного множителя:

$$P_{к-А} = k \left(0,175 + \frac{240}{p_{п}} \right) D.$$

Поправочный коэффициент следует брать по зависимости

$$k_{ск} = 0,09\sqrt[3]{p_{п}},$$

где $p_{п}$ – давление в воздушной подушке, Па.

В зарубежной практике проектирования ССВП применяется формула

$$P_{к-А} = \left[\frac{k}{(p_{п}/L_{п})^{2/3} D^{1/3}} + \frac{k_1 D^{1/3}}{(p_{п}/L_{п})^{2/3}} \right], \quad (3.22)$$

где $p_{п}$ – давление в воздушной подушке, кг/м²;

D – полная масса ССВП, т.

Для крупнотоннажных ССВП в формуле (3.22) принимают следующие значения коэффициентов: $k = 9,75$, $k_1 = 0,0344$.

Для небольших пассажирских ССВП с массой до 100 т значение коэффициента k является переменной величиной, и для его ориентировочной оценки можно воспользоваться зависимостью

$$k \approx 8,5 \frac{D^{1/3}}{\left(\frac{p_{п}}{L_{п}} \right)^{1/3}} - B,$$

где $B = 7,15$ – для речных ССВП;

$B = 6,1$ – для морских ССВП прибрежного плавания.

Коэффициент $k_1 = 0,0344$.

Масса энергетической установки. Эта составляющая для ССВП с дизельными установками мощностью до 2,0 тыс. кВт определяется по формуле (3.6) при значении коэффициента $g_m = 7,9-10,6$ кг/кВт. Нижний предел g_m целесообразно принимать для речных ССВП, а верхний – для морских, при наличии отдельного двигателя для привода вентилятора.

Для крупнотоннажных ССВП с газотурбинными установками ориентировочно можно принимать $g_m = 2,3$ кг/кВт.

Массы остальных составляющих можно принимать по зависимостям для амфибийных СВП или по зависимостям для СПК.

Центровка ССВП. После расчета составляющих нагрузок и полной массы проектируемого ССВП, если это требуется, следует откорректировать размеры подушки и скегов, а затем определить положение ЦТ по длине (от транца) и высоте (от основной); в дальнейшем необходимо проверить положение ЦТ и по ширине (от ДП), поскольку несимметричное расположение отдельных составляющих масс может ухудшить поперечную остойчивость судна.

Модельные и натуральные испытания показывают, что положение ЦТ по длине судна заметно влияет на величину сопротивления, а также на мореходность, и это следует учитывать при разработке общего расположения судна.

ССВП при расчетном режиме движения на воздушной подушке должны иметь некоторый дифферент на корму, при котором обеспечивается наиболее благоприятное сочетание факторов, обуславливающих хорошую ходкость и мореходность.

Оптимальный ходовой дифферент для проектируемого судна может быть определен лишь в результате испытаний крупномасштабных самоходных или буксируемых моделей.

Задаваясь расчетной ходовой посадкой судна, подобной посадке модели, при наличии масштаба Бонжана по скегам и координат точки приложения равнодействующей сил давления ВП нетрудно найти необходимое положение ЦТ. Тщательный расчет центровки при заданном дифференте судна обычно производится на стадии разработки технического проекта.

В предэскизной и эскизной стадиях разработки проекта в отношении необходимой центровки и угла дифферента можно ориентироваться на статистические данные по эксплуатируемым ССВП.

Для скеговых судов отечественной постройки значение относительной центровки $\bar{x}_g = x_g/L_{\Pi}$ (от транца) лежит в пределах 0,433–0,493, а углы ходового дифферента на корму соответственно в пределах 0,5–1,0° при абсолютной разности осадок носа и кормы $d \approx 0,2–0,4$ м.

Для ССВП массой 40–60 т при давлении в воздушной подушке 3500–400 Па и числе Фруда $Fr_L = 1,0$ в первом приближении можно принимать $x_g = 0,48–0,49$ с ходовым углом дифферента на корму $\varphi = 1,0–1,1^\circ$.

Сопротивление движению ССВП. Приближенный расчет полного сопротивления движению скегового СВП можно произвести по уравнению

$$R = R_{\text{тр}} + R_{\text{имп}} + R_a + R_{\text{ост}}, \quad (3.23)$$

где $R_{\text{тр}}$, $R_{\text{имп}}$, R_a – соответственно сопротивление трения, импульсное сопротивление и аэродинамическое (воздушное), кгс;

$R_{\text{ост}}$ – остаточное сопротивление, кгс.

Сопротивление трения вычисляется обычным путем, импульсное и воздушное сопротивления – по формулам (3.9) и (3.10), а остаточное, состоящее в основном из волнового сопротивления, определяется по эмпирической формуле, предложенной В.В. Шаталовым [8]:

$$R_{\text{ост}} = \xi_{\text{ост}} \frac{\rho V^2}{2} L_{\Pi} B_{\Pi} \left(\frac{p_{\Pi}}{\gamma L_{\Pi}} \right)^{1,5} \left(\frac{L_{\Pi}}{B_{\Pi}} \right)^{-0,5} \left(1 + \frac{g D_{\text{ск}}}{p_{\Pi} L_{\Pi} B_{\Pi}} \right)^3. \quad (3.24)$$

Обозначив в формуле (3.24) $L_{\Pi} B_{\Pi}$ через S_{Π} , L_{Π}/B_{Π} – через λ_{Π} , получим

$$R_{\text{ост}} = \xi_{\text{ост}} \frac{\rho V^2}{2} S_{\Pi} \left(\frac{p_{\Pi}}{\gamma L_{\Pi}} \right)^{1,5} (\lambda_{\Pi})^{-0,5} \left(1 + \frac{g D_{\text{ск}}}{p_{\Pi} S_{\Pi}} \right)^3, \quad (3.25)$$

где $\xi_{\text{ост}} = \frac{2R_{\text{ост}}}{\rho V^2 S}$ – коэффициент остаточного сопротивления;

S – смоченная поверхность скегов, м²;

ρ – массовая плотность, $\text{кг} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$;
 V – скорость расчетная, м/с ;
 γ – удельный вес воды, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}^2$;
 $S_{\text{п}}$ – площадь воздушной подушки, м^2 ;
 $D_{\text{ск}}$ – водоизмещение скегов, кг .

Кэффициент остаточного сопротивления принимают к расчету на основании результатов модельных и натурных испытаний. Достаточно устойчивая кривая среднестатистической зависимости $\xi = fFr_{L_{\text{п}}}$ аппроксимируется формулой, по которой и можно определить значение $\xi_{\text{ост}}$:

$$\xi_{\text{ост}} 10^3 = 0,6Fr_{L_{\text{п}}}^{-2} + 0,45.$$

Формула (3.25) дает практически удовлетворительный результат применительно к ССВП с характеристиками, лежащими в пределах

$$L_{\text{п}} / B_{\text{п}} = 2,9-6,4 ;$$

$$P_{\text{п}} / L_{\text{п}} = 90-350 \text{ Н/м}^3$$

и

$$L_{\text{ск}} / B_{\text{ск}} \geq 10.$$

Расчет сопротивления следует вести в табличной форме одновременно для нескольких скоростей, что позволит построить кривую $R = f(V)$, необходимую для определения реально достижимой скорости при выбранной мощности в зависимости от тяговой характеристики движителя.

Мощность энергетической установки. Как и для амфибийных СВП, мощность энергетической установки ССВП выбирается из условия обеспечения движения судна с заданной скоростью $N_{\text{дв}}$, создания воздушной подушки $N_{\text{п}}$ и работы вспомогательных потребителей $N_{\text{всп}}$. Кроме того, должен быть предусмотрен некоторый запас мощности, гарантирующий получение спецификационной скорости и необходимой также для обеспечения регламентирован-

ного моторесурса дизелей, быстро изнашивающихся в условиях частых перегрузок [3].

Основная требуемая мощность $N_{\text{дв}} + N_{\text{п}}$, рассчитанная для режима движения на спокойной воде, должна быть увеличена по крайней мере на 8–10 % для ССВП внутреннего плавания и на 15–20 % – для судов морского плавания.

Мощность $N_{\text{дв}}$, необходимая для движения судна, во втором приближении предэскизной стадии проектирования определяется через величину полного сопротивления по выражению

$$N_{\text{дв}} = \frac{RV}{10^3 \eta}, \text{ кВт.}$$

Полное сопротивление на тихой воде рассчитывается по уравнению (3.23). Значение пропульсивного КПД выбирается в зависимости от типа принятого движителя.

Для ССВП морского плавания на скоростях 20–40 уз целесообразно использовать гребные винты, отличающиеся высоким КПД ($\eta_{\text{в}} \approx 0,68$). При скоростях более 40 уз следует применять суперкавитирующие гребные винты или водометы. В приближенных расчетах мощности, когда движитель еще не рассчитан, КПД суперкавитирующего винта для скоростей от 40 до 80 уз можно принимать по зависимости

$$\eta_{\text{СКВ}} = 55(12,9 - V^{1/3})10^{-3},$$

где V – расчетная скорость, м/с.

Для водометных движителей приближенное значение КПД в зависимости от скорости можно определять для диапазона скоростей от 30 до 60 уз по выражению

$$\eta_{\text{ВМ}} = 0,165(V^{1/4} + 0,55),$$

где V – скорость, м/с.

Коэффициент полезного действия водометных движителей на невысоких скоростях (27–32 уз) заметно ниже по сравнению с гребными винтами, но они удобны в условиях ограниченных осадок и находят широкое применение на речных ССВП.

Мощность, потребляемая вентилятором, определяется по ранее приведенным формулам (3.18) и (3.19).

Форма корпуса ССВП. Во втором приближении предэскизной проработки проекта необходимо составить эскиз теоретического чертежа, сделать по нему предварительные расчеты плавучести и начальной остойчивости, определить положение центра тяжести и значение поперечного метацентрического радиуса [3].

Специфика формы корпуса скеговых СВП определяется его П-образным очертанием поперечного сечения, обусловленного наличием узких водоизмещающих корпусов — скегов, объединенных основным корпусом понтонного типа.

Днище основного корпуса плоское, в носовой части по продольному сечению имеет «слом» и подъем к форштевням, что необходимо для обеспечения мореходности и установки носового гибкого ограждения воздушной подушки. В плане корпус имеет прямоугольную форму, несколько закругленную в носовой части. Корма обрезаемая (транцевая).

Водоизмещающие скеги, как правило, имеют несимметричную остроскулую форму поперечного сечения с прямыми вертикальными наружными бортами и плоскокилеватым днищем с углом внешней килеватости 30° и более. Но встречается и другая, плавная форма очертания скегов по наружной стороне. Внутренние стенки борта скегов делаются или вертикальными, или несколько наклонными к ДП с плавным переходом к днищу основного корпуса. На рис. 3.10 показаны типовые формы поперечного сечения скегов.

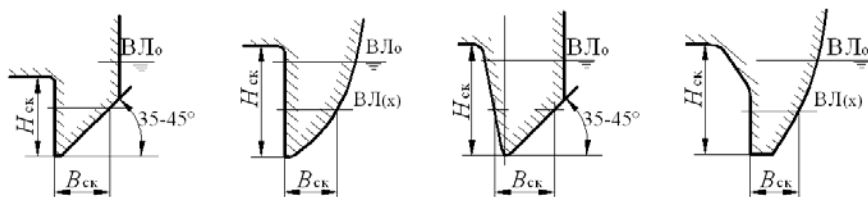


Рис. 3.10. Формы поперечного сечения скегов

Выбор формы скегов подчинен требованиям обеспечения необходимой остойчивости, ходкости, мореходности и технологично-

сти; также важным является требование в части обеспечения общей поперечной прочности.

Особенное внимание следует уделять проектированию обводов носовой части скегов. Основным является требование обеспечения мореходности. Объем и форма носовой части скегов при встрече судна с волной должны создавать избыточные гидростатические и гидродинамические силы настолько, чтобы исключить «зарывание» судна в воду и возможное при этом его опрокидывание.

В кормовой части скегов с внутренней стороны иногда делают местное плавное уширение, обусловленное необходимостью размещения водометных движителей. Для размещения машинной установки уширение скегов делается и в надводной части с наружной стороны.

На рис. 3.11 приведена схема обводов корпуса ССВП типа «Рассвет».

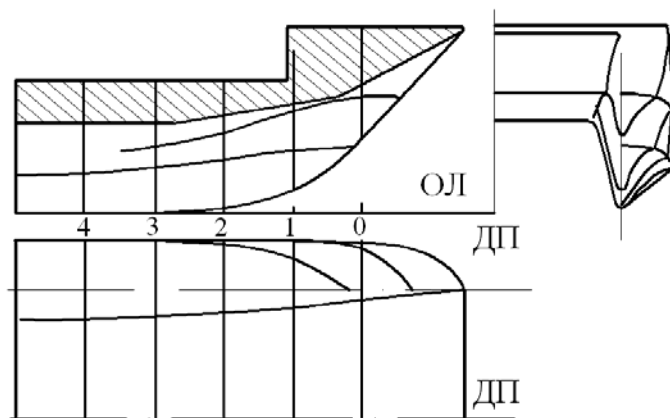


Рис. 3.11. Схема обводов носовой оконечности корпуса СВВП

Список использованных источников

1. Макливи, Р. Суда на подводных крыльях и воздушной подушке / Р. Макливи ; пер. с англ. Н.И. Слижевского. – Л. : Судостроение, 1981. – 208 с.
2. Гарин, Э. Н. Конструкция корпуса судов на воздушной подушке : учебное пособие / Э. Н. Гарин. – Л., 1979. – 96 с.
3. Ваганов, А. М. Проектирование скоростных судов / А. М. Ваганов. – Л. : Судостроение, 1978. – 279 с.
4. Козылаев, Б. А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания / Б. А. Козылаев, А. И. Косоруков, В. А. Литвиненко. – Л. : Судостроение, 1981. – 472 с.
5. Чижиумов, С. Д. Примеры конструкций судов : учебное пособие / С. Д. Чижиумов. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 133 с.
6. Честнов, Е. И. Зарубежные суда на воздушной подушке / Е. И. Честнов // Труды ЦНИИЭВТ. – 1975. – Вып. 117.
7. Злобин, Г. П. Суда на воздушной подушке / Г. П. Злобин, Ю. А. Симонов. – Л. : Судостроение, 1971. – 212 с.
8. Шаталов, В. В. Расчет остаточного сопротивления скеговых СВП / В. В. Шаталов // Материалы по обмену опытом НТО СП. – 1970. – Вып. 153.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. Общие сведения о судах на воздушной подушке.....	5
1.1. Развитие судов на воздушной подушке.....	5
1.2. Классификация судов на воздушной подушке.	
Схемы формирования воздушной подушки.....	10
1.3. Гибкие ограждения воздушной подушки.....	18
1.4. Архитектурно-конструктивные особенности судов на воздушной подушке.....	26
1.4.1. Амфибийные суда на воздушной подушке.....	27
1.4.2. Скеговые суда на воздушной подушке.....	30
1.4.3. Полуамфибийные суда на воздушной подушке.....	32
1.5. Главные двигатели, движители и вентиляторы судов на воздушной подушке.....	33
1.6. Материалы и конструкции корпуса.....	40
2. Элементарные основы гидроаэромеханики судов на воздушной подушке.....	43
2.1. Статика судов на воздушной подушке.....	44
2.2. Сопротивление движению судов на воздушной подушке... 57	
2.2.1. Сопротивление амфибийных судов на воздушной подушке.....	57
2.2.2. Сопротивление скеговых судов на воздушной подушке.....	64
3. Проектирование судов на воздушной подушке.....	66
3.1. Проектирование амфибийных судов на воздушной подушке.....	68
3.1.1. Характерные величины и зависимости для амфибийных судов на воздушной подушке.....	68
3.1.2. Определение массы и выбор главных размерений судов на воздушной подушке в первом приближении... 72	
3.1.3. Определение главных элементов судов на воздушной подушке во втором приближении.....	75
3.2. Проектирование скеговых судов на воздушной подушке... 85	
3.2.1. Характерные величины и зависимости для скеговых судов на воздушной подушке.....	85

3.2.2. Определение полной массы и выбор главных размерений скеговых судов на воздушной подушке в первом приближении.....	91
3.2.3. Определение основных проектных характеристик скеговых судов на воздушной подушке во втором приближении.....	95
Список использованных источников.....	104

Учебное издание

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

Ча с т ь 3

СУДА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

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

Подписано в печать 10.11.2014. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 6,22. Уч.-изд. л. 4,86. Тираж 100. Заказ 1336.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.