

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ю. Н. Кормилцини, О. А. Хализев

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК

Рекомендовано Министерством образования
Российской Федерации в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению «Кораблестроение и океанотехника»
и специальности «Кораблестроение»

УДК 629.36.36



Санкт-Петербург
1999

Кормицихин Ю. Н., Халилов О. А.
Проектирование подводных лодок. Учебник. СПб:
Изд. центр СПбГМТУ, 1999, стр.344.

В учебнике излагаются методологические основы проектирования подводной лодки, рассматриваются применяемые на практике общие методы определения водоизмещения ПЛ и ее дифференциалы, вопросы выбора архитектуры подводной лодки и определения ее главных размерностей, а также некоторые другие, связанные со спецификой подводного корабля.

Учебник написан в соответствии с программой курса "Проектирование подводных лодок" для студентов специальности "Кораблестроение" Санкт-Петербургского Государственного Морского технического университета, может быть рекомендован для использования в учебном процессе в высших учебных заведениях кораблестроительного профиля. Весь графический и числовой (табличный) материал, приведенный в учебнике, носит иллюстративный характер.

Илл., 124. Табл., 22. Библ.список, 109 назв.

Рецензенты:

Военно-морская академия, начальник кораблестроительного факультета, доктор технических наук,
профессор В. Н. Половинкин.
Доктор технических наук, профессор Л.Б. Бреслав

Учебник написан в соответствии с программой курса лекций для студентов, обучающихся по специальности «Кораблестроение». В книге изложен необходимый объем сведений по учебной дисциплине «Проектирование подводных лодок». Вместе с тем в учебник не включено то, что дублирует содержание лекций по другим кораблестроительным наукам, однако приведенная библиография, позволит студентам и всем пользующимся книгой подобрать необходимые материалы для получения информации по другим дисциплинам.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Государственного морского технического университета и Центрального конструкторского бюро морской техники «Рубин»: Н.В. Алешину, М.К. Глозману, А.И. Гайковичу, А.В. Котлову, А.А. Малютину, А.Н. Пинегину и И.В.Чепланову, за помощь в создании книги, а также рецензентам Л.Б. Бреславу и В. Н. Половинкину за ценные замечания, сделанные в процессе подготовки рукописи.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	8
1. Организация и методы проектирования подводных лодок	
1.1. Организация проектирования подводных лодок	12
1.2. Методы проектирования подводных лодок	19
1.3. Применение электронно-вычислительной техники в проектировании подводных лодок	26
2. Водоизмещение подводной лодки	
2.1. Виды водоизмещения подводной лодки	32
2.2. Разбивка полного водоизмещения (нагрузки) на стандартные группы	34
2.3. Разбивка нагрузки на начальных стадиях проектирования. Измерители масс	37
3. Зависимость масс отдельных групп и статей нагрузки от основных характеристик подводной лодки	
3.1. Нагрузка по группе "Корпус"	41
3.2. Нагрузка по группам "Судовые устройства, действующие вешки" и "Судовые системы"	61
3.3. Нагрузка по группе "Механическое оборудование, трубопроводы и системы энергетических установок"	64
3.4. Нагрузка по группе "Электрооборудование и кабели электроэнергетических систем, электрических сетей и радиолокационная техника"	89
3.5. Нагрузка по группе "Специальные и специальные устройства и оборудование, обслуживающие системы"	90
3.6. Нагрузка по группам "Запасы и команды" и "Запас водоизмещения". "Твердый балласт"	92
4. Уравнение нагрузки и функции водоизмещения. Определение водоизмещения	
4.1. Составление и решение уравнения нагрузки в первом приближении	95
4.2. Уравнение нагрузки во втором приближении	96
4.3. Влияние изменения параметров корабля и несбалансированных масс на нагрузку. Дифференциальная форма уравнения нагрузки в функции водоизмещения. Коэффициент Нормана	100
4.4. Контроль нагрузки при проектировании и постройке ПЛ	102
5. Постоянный плавучий объем (ППО) подводной лодки	
5.1. Постоянный плавучий объем и его связь с нормальной нагрузкой подводной лодки	108
5.2. Соотношения слагаемых ППО, используемые на ранних стадиях проектирования	111
5.3. Определение объема прочного корпуса. Измерители объема	113
5.4. Уравнение объемов. Соотношения объемов подводной лодки	150
6. Удифференцировка подводной лодки	
6.1. Приближенное определение плеч масс	156
6.2. Приближенное определение плеч слагаемых ППО	158
6.3. Удифференцировка подводной лодки	169
6.4. Уточнение массы твердого балласта и его расположения по длине ПЛ	160
7. Замена переменных грузов на подводной лодке	
7.1. Общие положения замены переменных грузов	163
7.2. Замена оружия	169
7.3. Замена топлива и масла	172
7.4. Компенсация изменения плавучести ПЛ от плавания гидрологических факторов	174
7.5. Расчет замены переменных грузов	175
7.6. Определение необходимого объема шестерти всплывающего балласта	178
8. Проектирование формы корпуса подводной лодки	
8.1. Выбор архитектурно-конструктивного типа	183

8.2. Форма обводов наружного корпуса и выступающих частей.....	188	11.4. Методы, применяемые при проектировании оперения подводной лодки.....	294
8.3. Влияние соотношения главных размерений L/V и H/V на ходовые и маневренные качества подводной лодки.....	194	12. Военно-экономический анализ и его роль в проектировании подводных лодок	
8.4. Влияние относительной проточности гидродинамической вставки, носовой и кормовой оконечностей на ходовые качества ПЛ.....	201	12.1. Предмет военно-экономического анализа.....	302
8.5. Коэффициенты полноты формы наружного корпуса.....	208	12.2. Основные понятия военно-экономического анализа.....	305
8.6. Выбор формы отражения выдвинутых устройств.....	209	12.3. Модель оценки военно-экономической эффективности.....	311
8.7. Влияние количества выдвов на форму корпуса и гидродинамические качества ПЛ.....	214	12.4. Модель боевого использования подводной лодки.....	313
8.8. Влияние конструктивных факторов на выбор параметров формы наружного корпуса.....	221	12.5. Определение численности парка подводных лодок. Коэффициенты оперативного направления и оперативного использования.....	319
9. Определение главных размерений подводной лодки		12.6. Понятие о динамических задачах военно-экономического анализа.....	322
9.1. Общие положения.....	223	12.7. Оценка технико-экономических показателей подводной лодки.....	325
9.2. Определение длины корпуса подводной лодки.....	224	Литература	334
9.3. Определение ширины корпуса подводной лодки.....	226	Об авторах	340
9.4. Определение высоты корпуса подводной лодки.....	227		
9.5. Запас плавучести. Приближенное определение осадки по заданному запасу плавучести.....	228		
9.6. Использование уравнения остойчивости для определения главных размерений.....	240		
10. Теоретический чертеж подводной лодки.			
10.1. Общие положения.....	243		
10.2. Особенности разработки теоретического чертежа на разных этапах проектирования ПЛ.....	248		
10.3. Методы, применяемые при проектировании и задании корабельных обводов.....	252		
10.4. Теоретический чертеж отражения выдвинутых устройств и оперения подводной лодки.....	270		
10.5. Современные инструментальные средства построения теоретического чертежа.....	273		
11. Проектирование оперения подводной лодки			
11.1. Назначение оперения. Состав оперения подводной лодки.....	275		
11.2. Определение гидродинамических характеристик комплекса корпус — оперение.....	282		
11.3. Критерии, используемые при проектировании оперения.....	289		

Развитие теории проектирования подводных лодок

По аналогии с надводным судостроением под теорией проектирования подводных лодок (ПЛ) будем понимать научную дисциплину, изучающую творческий процесс создания ПЛ и, в первую очередь, соразделение ее основных элементов и обоснование оптимальных проектных решений.

Физический смысл некоторых уравнений теории проектирования судов, таких как уравнения масс, вместимости и некоторых других сохраняется и для подводных лодок. Однако подводные лодки настолько специфичны, что простой перенос аналитического аппарата и применяемых в надводном судостроении методов по самой структуре и физическому смыслу зависимостей, как правило, неприемлемо. Поэтому нам представляется, что теория проектирования подводных лодок имеет право на самостоятельность, и ее нельзя рассматривать только как частную особенность теории проектирования судов.

Развитие подводного кораблестроения за последние 30 лет привело к формированию собственных особенностей проектирования, например, особенностей проектирования подводных аппаратов, пассажирских подводных лодок и др.

При этом процесс формирования общей теории проектирования ПЛ в самостоятельную дисциплину начался сравнительно недавно и его нельзя считать завершенным.

Первые работы в этой области были выполнены в 1939—1941 гг. выдающимся конструктором подводных лодок, профессором кораблестроительного института Б.М.Малиновым [55]. На основании анализа проектов ПЛ им были получены зависимости отдельных групп весов, составляющих нагрузку, от водоизмещения и других характеристик ПЛ, что позволило использовать при определении водоизмещения уравнение весов (масс). Были также получены приближенные зависимости для определения на начальных стадиях проектирования характеристик остойчивости, смоченной поверхности и других величин. В 1940 г. была опубликована книга А. Н. Щеглова "Проектирование ПЛ" [92], содержащая определение главных размеров и водоизмещения ПЛ. В 1949 г. году под редакцией профессора

Б.М.Малинова выдана "Справочник конструктора подводника" — духотомный труд, обобщивший опыт подводного кораблестроения в России с 1927 по 1945 г. [80]. В том же году С. А. Егоровым, З. А. Дерибиным и другими была выполнена работа по методике проектирования ПЛ, которая к сожалению не была опубликована. В работе был предложен метод аналитического определения водоизмещения ПЛ путем составления и рядельного решения двух независимых уравнений: уравнения весов (масс) и уравнения плавающих объемов с последующим согласованием полученных результатов.

Все названные работы базировались на довоенном опыте подводного кораблестроения. Разработка в 50-е годы подводных лодок с резко отличными конструктивными и техническими характеристиками привела к тому, что многие полученные ранее зависимости стали непригодными.

В 1952 г. А.Н.Донченко были проанализированы весовые нагрузки первых ПЛ послевоенной постройки и получены новые численные коэффициенты, а также новые зависимости между водоизмещением и отдельными составляющими нагрузки корабля. Следует отметить, что с 50-х годов в различных организациях (главным образом ВМФ и МСП) было выполнено большое число работ, посвященных частным задачам, находящимся на стыке теории проектирования ПЛ с другими кораблестроительными науками. Здесь необходимо отметить работы Скобцова Д.П., Калачевой Л.В., Золотова С.С., Рождественского В.В. в области динамики подводной лодки, Шуманского Ю.А., Соломенко Н.С., Томашевского В.Т. в области прочности ПЛ, Правдина А.А., Глозман М.К., Смерда Н.Д. в области проектирования конструкции корпуса и многих других.

В те же годы вопросы теории проектирования получили изложение в учебной литературе. В 1954 г. было выпущено учебное пособие В.Н.Кастрикова и М.В.Савельева [35], а в 1959 г. — учебник К.П.Ефремова [31].

Значительный вклад в развитие теории проектирования ПЛ внес профессор С.А.Базилевский [9]. В своих научных трудах, а также лекциях для слушателей Военно-морской академии он развил аппарат теории проектирования ПЛ в направлении более широкого использования теории подобия и теории ошибок.

Начиная с середины 50-х годов в результате создания новых, более эффективных средств ведения морской войны постоянно повышается боевая эффективность подводных лодок, растут их боевые возможности. С ростом оснащенности ПЛ современными средствами

ведение войны увеличивается и число возможных проектных решений. В этих условиях все большая доля принимаемых проектных решений приходится на начальные стадии проектирования корабля, когда на основе анализа эффективности оружия, вооружения и технических средств, учета предоплаченных затрат на создание и эксплуатацию ПЛ происходит разработка задания на проектирование. Эта стадия создания корабля получила название исследовательского проектирования (ИП). Развитие ИП стимулировало дальнейшее развитие теории проектирования ПЛ в направлении расширения и более глубокого обоснования арсенала аналитических методов, применимых при проектировании ПЛ и выдвинул вычислительной техники в практику ИП.

Среди многочисленных работ, направленных на обеспечение исследовательского проектирования, могут быть отмечены исследования Л.Б.Бреслава, К.Б.Малинина, Н.И.Григорьева, Л.Ю.Худякова.

В первой из названных работ применение современных методов математической статистики позволило уточнить структуру приближенных формул для определения масс и объемов проектируемой ПЛ, во второй рассмотрены вопросы построения эскиза теоретического чертежа с использованием аналитических методов, в третьей — разработан способ определения нормального водонизмещения по массам и объемам, в четвертой — затронуты методологические вопросы исследовательского проектирования.

Особое значение для современного кораблестроения имеют вопросы военно-экономического анализа проектов ПЛ, находящиеся на стыке целой группы наук — теории проектирования, тактики, экономики, специальных вопросов математического анализа.

В этом направлении также было выполнено большое число работ: Л.Б.Бреслав [1], А.А.Нарусовов [58], И.Г.Захаров [66], Л.Ю.Худяков [87] и ряд других авторов.

Как уже упоминалось, теория проектирования подводных лодок тесно связана с другими кораблестроительными дисциплинами — с гидромеханикой, строительной механикой и теорией корабля, с технологией и экономикой, рядом других дисциплин. В теории проектирования широко используется научный аппарат этих дисциплин при решении ряда вопросов, связанных, например, с ходкостью, маневренностью, прочностью проектируемой ПЛ. Однако используется этот аппарат во-первых, с других исходных позиций, что обусловлено следующими особенностями его применения.

Во-первых, в теории проектирования решаются не прямые задачи, как в других дисциплинах, и обратные. Так, например, если целью расчетов по теории корабля является определение скорости хода конкретной ПЛ, то целью проектирования является определение элементов разрабатываемой подводной лодки, гарантирующих достижение желаемой скорости.

Во-вторых, в отличие от всех остальных дисциплин, рассматривающих свойства и характеристики подводной лодки по отдельности, вне связи друг с другом, для теории проектирования ПЛ характерен комплексный (системный) подход к проектируемой подводной лодке как к единому целому, в котором все взаимосвязано и взаимозависимо. Поэтому принимается во внимание, как совпадают то или иное решение не на одно какое-то качество, улучшение которого нужно добиться, а на весь корабль в целом, т.е. и на другие качества ПЛ и ее показатели. По этой причине не все рекомендации, выработанные на основе теории проектирования подводных лодок, совпадают с аналогичными рекомендациями других дисциплин [14].

Вместе с тем следует отметить, что несмотря на кажущееся обилие исследований, теория проектирования ПЛ до сих пор не разработана с достаточной полнотой даже в таких классических разделах, как методология проектирования. Выполненные в различных организациях и ведомствах работы недостаточно систематизированы и обобщены.

В иностранной литературе, насколько известно, практически нет работ по теории проектирования ПЛ. Исключение составляет обстоятельная английская публикация [96], излагающая ряд частных вопросов проектирования ПЛ, и монография [23], в которой рассмотрены общие вопросы организации проектирования кораблей.

1. ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ЛУДОК

1.1. Организация проектирования подводных лодок

Для разработки программы развития военно-морских сил на определенной промежуток времени выполняется перспективное военно-экономическое планирование, необходимым данным для которого является прогнозирование внешнеполитических задач страны и роли, которую будут играть в решении этих задач вооруженные силы, в частности ВМС. Большое значение имеют также прогнозы развития вооружения и военной техники как отечественной, так и других стран.

Перспективное военно-экономическое планирование осуществляется по иерархическому принципу, на разных уровнях, начиная от состава флота до отдельных классов кораблей. В частности, перспективным военно-экономическим планированием должны быть замечены и типы подводных лодок, которые предполагается строить или проектировать в течение рассматриваемого периода. Конечным результатом является программа развития ВМС, которая составляется обычно на срок порядка 10 лет. Включение в программу строительства новых типов кораблей производится после выполнения первоначальных стадий проектирования (обычно после разработки и утверждения тактико-технического задания). В период выполнения программы в нее могут быть внесены коррективы, учитывающие изменения полетившей обстановки, производственных и экономических ресурсов и возможностей развития военной техники.

В перспективном военно-экономическом планировании ВМС и разработке программ принимают участие научно-исследовательские институты ВМФ, судостроительной и смежных отраслей промышленности, военно-морские специалисты и конструкторы-кораблестроители.

Известно, что в технике при проектировании сложных инженерных сооружений невозможно разработать проект сразу за один этап. Обязательно наличие нескольких последовательных этапов или стадий проектирования (рис. 1.1)



Рис. 1.1. Стадии разработки проекта

Проектирование большинства кораблей, в том числе и подводных лодок, начинается с исследовательского проектирования – обобщающего планами исследовательских работ проектного характера, которые постоянно проводятся в секторах перспективного проектирования проектно-исследовательских подразделений судостроительной промышленности и ВМФ.

На этой стадии проектирования исследуются вопросы, связанные с использованием на подводных лодках перспективной техники и состав вооружения, новых материалов, конструктивных решений; анализируется влияние изменений в марках пределах тактико-технических элементов, например, скорости хода,

глубины погружения и других, на водозащитные и архитектурный тип ПЛ, стоимость и возможность постройки; проводят работы по перспективным типам подводных лодок. Исследовательскому проектированию свойственна многовариантность, широкое применение военно-экономического анализа для обоснования принимаемых решений и использование аналитических способов определения элементов ПЛ.

Начало работ по осуществлению новой программы строительства флота вносит в тематику исследовательского проектирования определенную целенаправленность по технико-экономическому обоснованию планируемых типов ПЛ и разработки для них оперативно-тактических заданий. Как правило, исследовательскому проектированию придает именно этот более узкий смысл, как стадии обоснования и выработки требований заказчика [87]. В исследовательском проектировании синтезируется стратегия и тактика ВМФ, наука и техника судостроения и смежных отраслей промышленности.

Разработка *оперативно-тактических заданий (ОТЗ)* производится руководящими органами и научно-исследовательскими организациями флота. При этом привлекаются и проектно-конструкторские бюро судостроительной промышленности.

В оперативно-тактическом задании:

- конкретизируется назначение подводной лодки и определяются задачи, которые она будет решать;
- уточняются и анализируются данные о предполагаемом противнике, оценивается его противодействие с учетом перспектив; возможные районы боевых действий, места и условия базирования, обеспечение ремонта и др.

Исходя из ОТЗ, формулируются оперативно-тактические требования, которые являются исходными, предварительными требованиями ВМФ к составу и основным характеристикам вооружения, защиты, автономности, скорости хода и дальности плавания, глубины погружения и мореходным качествам будущей подводной лодки.

При разработке ОТЗ ставится задача определения наиболее рациональной с военной и экономической точек зрения комбинации тактических характеристик ПЛ, при которой поставленная задача будет выполнена наилучшим образом.

Чтобы связать тактические характеристики ПЛ с ее техническими элементами и убедиться в первом приближении в их соот-

ветствии друг другу выполняются проектные проработки ПЛ при достаточно широком варьировании исходных тактических данных в рамках исследовательского проектирования. Для всех вариантов определяются водозащитные и главные размеры, мощность энергетической установки, а также ориентировочная стоимость постройки. Отдельные, так называемые «облачные» варианты, прорабатываются более подробно, с большим объемом расчетных и графических работ. После выполнения исследовательского проектирования, используя методы военно-экономического анализа, определяют эффективность рассматриваемых вариантов, производят их сравнительную оценку и отбирают рекомендуемый вариант ОТЗ, который представляют на утверждение командованию ВМФ [75].

Разработку ОТЗ и исследовательское проектирование в его обеспечении следует считать начальной стадией проектирования корабля.

Разработка *технического предложения и технико-технического задания* корабля.

Техническое предложение на проект подводной лодки (ранее этот этап проектирования назывался аванпроектом или предэскизным проектом) разрабатывается проектно-конструкторской организацией судостроительной промышленности на основании утвержденного ОТЗ. Целью данного этапа проектирования является обоснование целесообразности и проверка технической возможности создания подводной лодки по утвержденному ОТЗ.

Задачи, которые решаются при разработке технического предложения могут быть сгруппированы следующим образом:

- проверка совместности требований ОТЗ с техническими и экономическими возможностями; выработка основных технических решений, обеспечивающих получение заданных тактических данных. Для этого выполняются основные кораблестроительные расчеты, необходимые для определения элементов ПЛ, схемы общего расположения, составляется объяснительная записка, проводятся ориентировочные расчеты стоимости проектирования, постройки и эксплуатации;
- в первом приближении рассматриваются организационные вопросы создания ПЛ; составляются перечни предполагаемого к установке вооружения и основных технических средств (энергетической установки, механизмы, приборы); определяются предпроектно-строительки и поставщики, а для новых образцов техники и органи-

защиты-разработчики; составляется перечень опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ для обеспечения создания новых образцов техники и проверки новых технических решений; производится ориентировочный расчет сроков создания ПЛ по этапам;

— производится оценка технического уровня проектируемой ПЛ на фоне достижений отечественной и зарубежной науки и техники, которая сопровождается военно-экономическим обоснованием целесообразности ее создания; определяется необходимое число ПЛ, потребное для решения поставленной задачи и другие вопросы военно-экономического анализа. Данная группа задач выполняется, как правило, научно-исследовательскими организациями ВМФ.

По существу разработке технического предложения можно рассматривать как завершающую стадию исследовательского проектирования. Она отличается от предыдущей значительно меньшим числом вариантов, но имеет существенно больший объем расчетно-графических работ в каждом варианте. В техническом предложении варьируются главным образом принципиальные технические решения, например, архитектурный тип ПЛ, тип энергетической установки и другие существующим образом влияющие на ее основные элементы. Здесь определяются водоизмещение и главные размерения в первом приближении, основные элементы ПЛ при различных вариантах состава вооружения, скорости хода и т.д.

На основании решения перечисленных выше задач отбирается оптимальный вариант технического предложения, который служит основой для разработки тактико-технического задания (ТТЗ).

Тактико-техническое задание представляет собой развернутые требования заказчика (ВМФ) к будущей подводной лодке и содержат обычно следующие данные:

- 1) назначение подводной лодки;
- 2) вооружение: ракетное, торпедное, миныное, радиоэлектронное (гидроакустическое, радиолокационное, радиосвязь, электронные вычислительные системы и т.д.);
- 3) требования по защите и скрытности (уровень интенсивности физических полей ПЛ и собственных помех работе гидроакустических станций);

4) кораблестроительные элементы (водоизмещение — ориентировочное, скорости хода и дальность плавания, глубина погружения, маневренные качества, автономность и т.д.);

5) условия обитаемости;

6) степень автоматизации;

7) энергетическая установка (тип и основные параметры);

8) дополнительные требования, предъявляемые к кораблю в целом или отдельным его элементам в целях получения тех или иных дополнительных качеств.

Тактико-техническое задание рассматривается и согласовывается в различных инстанциях судостроительной промышленности и ВМФ и после утверждения проект включается в кораблестроительную программу.

Эскизный проект разрабатывается на основании утвержденного ТТЗ и является основной стадией проектирования. При разработке эскизного проекта должны быть решены следующие вопросы, определяющие реальность осуществления ТТЗ:

а) уточнены водоизмещение и главные размерения, а также ходовые и маневренные качества, скорости и дальности плавания в надводном и подводном положениях;

б) разработаны принципиальные схемы систем и устройств;

в) разрешены вопросы размещения оборудования по отсекам и компоновки корабля в целом;

г) выбраны главные механизмы и основное оборудование;

д) решены принципиальные вопросы технологии и организации постройки.

На стадии эскизного проекта проводятся испытания моделей ПЛ в опытовом бассейне. По данным этих испытаний обрабатывается и фиксируется теоретический чертеж подводной лодки и выступающих частей, определяются элементы гребного винта.

Проводятся также эксперименты в аэродинамической трубе с целью определения характеристик управляемости проектируемой ПЛ. При разработке эскизного проекта может возникнуть невозможность удовлетворения некоторых требований ТТЗ, в результате чего последние должны быть пересмотрены. Эскизное проектирование желательно провести настолько глубоко, чтобы на последующих стадиях не пришлось вносить существенных изменений в выбранный вариант проекта. Эскизный проект состоит из так называемых представляемых и не представляемых материалов, а также проектов и материалов контрагентов [25]. Объем

представляемых материалов, т.е. чертежей, расчетов, схем и других технических материалов в окончательно сформулированном виде устанавливается в зависимости от типа и особенностей проектируемой подводной лодки.

Технический проект — разрабатывается на базе утвержденного эскизного проекта с учетом изменений и дополнений, которые имели место при его согласовании. Они должны быть такими, чтобы не вызывать изменений основных элементов проектируемой подводной лодки.

Назначением технического проекта является подготовка постройки ПЛ, а также подготовка производства и выдачи соответствующих заказов на материалы для корпуса и конструктивных поставки, оборудование и вооружение. Для этого выполняются достаточно подробные комплекты чертежей, расчетов и другой технической документации. В техническом проекте с большой полнотой разрабатываются все технические вопросы, подтверждаются все тактико-технические элементы подводной лодки. Составляются технические условия и спецификация на постройку ПЛ. Перечень представляемых материалов и общий объем работ по проекту примерно в три раза больше, чем по эскизному проекту.

Для наилучшего решения вопросов размещения и монтажа оборудования на ПЛ изготавливаются чертежи общего расположения по каждому отсеку в достаточно крупном масштабе (обычно 1:10).

Особое внимание на стадии технического проекта уделяется технологии постройки, которая разрабатывается применительно к конкретному заводу-строителю, уточняются сроки строительства подводной лодки и ее экономические характеристики.

Эскизный и технический проекты рассматриваются и утверждаются организациями заказчика (ВМФ) и судостроительной промышленности.

Рабочий проект. Его основной задачей является разработка и выпуск полного комплекта рабочих чертежей по корпусной, механической и электромеханической части, который обеспечит постройку подводной лодки. В соответствии с этим основной частью рабочего проекта являются рабочие чертежи, количество которых достигает 6–10 тысяч. Важное место занимает детализация технологии постройки. В рабочий проект входит, кроме того, разработка монтажных чертежей отсеков, составление ведомо-

стей заказов материалов, разработка технических условий и спецификаций на постройку ПЛ.

Стадия рабочего проектирования завершается выпуском исполнительной документации, которая представляет собой материалы технического проекта, откорректированные в соответствии с рабочими чертежами. Например, составляется исполнительный расчет нагрузок, проверяется положение центра тяжести корабля и т.д. Большой объем составляют инструкции по эксплуатации различного оборудования подводной лодки.

Постройка подводной лодки. Во время постройки функции организации проектировщика состоят в повседневном наблюдении и контроле выполнения требований проекта в ходе постройки (например, соблюдение весовой дисциплины), в организации технической помощи заводу-строителю. Представители проектирующей организации принимают активное участие в слаточных испытаниях ПЛ.

Составление отчетной механической документации. После окончания постройки подводной лодки последним этапом работы проектной организации является составление отчетных чертежей и документации. Их назначением является снабжение вступающей в строй подводной лодки, баз, технических учебных заведений и других заинтересованных организаций чертежами и технической документацией, полностью соответствующими построенному кораблю в части конструкции, размещения оборудования и всех ее УТЭ и характеристик. Выпуск отчетных чертежей и документации есть по существу корректировка рабочего проекта, в соответствии с имеющим место в процессе постройки отклонениями от рабочих чертежей и выявленными путем испытаний головной подводной лодки действительными значениями отдельных тактико-технических элементов и характеристик.

1.2. Методы проектирования подводных лодок

Известно, что в технике при проектировании сложных инженерных сооружений общим методом проектирования является метод последовательных приближений, или как его называют в иностранной практике, "Метод проб и ошибок" (англ. trial and error method). Это полностью относится и к подводным лодкам. Суть метода состоит в том, что проект нельзя разработать сразу, за один этап. Обязательно наличие нескольких последовательных этапов проектирования (см. рис. 1.1.).

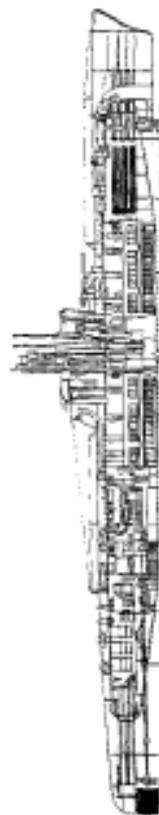
На начальных стадиях разработки проекта широко применяется метод вариаций, позволяющий найти такое решение, которое наилучшим образом отвечает бы поставленной перед ПЛ задаче.

Каждый этап в методе последовательных приближений отличается от предыдущего более полным и углубленным обоснованием выбранных параметров, проработкой основных задач. Элементы проекта уточняются и подтверждаются более точными расчетами. Объем проектной документации растет, а чертежей на каждом последующем этапе разрабатывается все больше. Содержание одних и тех же документов также меняется. В документацию вносятся уточненные данные разрабатываемого параллельно проекту подводной лодки оборудования и вооружения. Соответственно в эскизном и рабочем проектах существенно отличаются по объему расчеты нагрузки и постоянного плавающего объема (ППО), усложняются методы расчета параметров и характеристик разрабатываемого проекта.

В методе последовательных приближений на каждой стадии проектирования производится уточнение не всех параметров и элементов корабля. Это затруднило бы подготовку производства к его постройке, а также и сам процесс проектирования, которые имеют большую протяженность по времени (от 3 до 10 лет) [16]. Поэтому ряд параметров и характеристик проекта на определенных этапах желательно фиксировать и в дальнейшем не изменять. На стадии технического проекта, как правило, не должны существенно изменяться такие технические характеристики корабля, принятые в эскизном проекте, как главные размеры, форма и архитектурно-конструктивный тип корабля, хотя в определенных пределах они, конечно, претерпевают изменения.

В зависимости от тактико-технического задания на разрабатываемый проект, его отличий от предшествующих, перечень стадий проектирования корабля может меняться. Так, в драгитике известны случаи, когда проектирование начиналось сразу с технического проекта, (например, проект 641, так как он представлял собой в значительной степени развитие и совершенствование проекта 611) (рис. 1.2 и 1.3) [43], [91], [95].

Исключительно важную роль в процессе проектирования имеет использование прототипов, т.е. материалов предшествующих проектов и статистической информации по параметрам и характеристикам построенных ПЛ. Однако при их использовании в процессе проектирования необходимо иметь в виду, что практи-



Количество торпедных аппаратов	10
Боевая торпеда, ед. (калибр, мм)	22 (533)
Поразительное вооружение, м ³	1831
Главные размеры, м:	90,5
длина наибольшая	7,5
ширина корпуса наибольшего	17
Скорость полного подводного хода, узл.	16
Скорость полного надводного хода, узл.	40
Дальность плавания по плану скоростью 2,1 узл., миль	200
Предельная глубина погружения, м	75
Автономность, сут.	ДЗУ
Тип ГЗУ	ДЗУ
Мощность подводного хода, л.с. (частота вращения, об/мин)	38000 (500)
двигатель	14 (500 (540))
конструктивный	2x1350 (1410)
Количество людей	3
Уникал, чел.	72

Рис. 1.3 Подводная лодка проекта 611



Количество сварных аппаратов	10
Объемы торцев, кв. (длина, см)	22 (5313)
Порядковое волюметрическое, м ³	1952
Главные размеры, м:	
длина	91,3
диаметр корпуса	7,5
диаметр конуса рубки	16,8
Скорость полного подводного хода, узл.	16
Скорость полного подводного хода, узл.	400
Длина в подводном положении автономной энергией, миль	280
Предельная глубина погружения, м	70
Автономность, сутки	ДЗУ
Тип ДЗУ	ДЗУ
Мощность полного хода, л.с. (частота вращения, об/мин)	3x2000 (5600)
запасная энергия	1x2700 (5400)
	2x1350 (440)
Количество актов	3
эксплуат. чел.	70

Рис. 1.3. Подводная лодка проекта 611

чески невозможно подобрать прототип, который полностью соответствовал бы проектной задаче. И это вполне понятно. Наличие такого прототипа, по существу, сделало бы разработку нового проекта ненужной.

Тем не менее, использование прототипов в проектировании такого сложного объекта как подводная лодка целесообразно и необходимо. Только понятие "прототип" можно понимать гораздо шире. При разработке нового проекта можно использовать в качестве прототипов ряд проектов. Так, один из них может быть использован при выборе формы обводов, другой — при разработке вопросов общего расположения, третий — при расчетах прочности, нагрузок и необходимых для размещения оборудования объемов и т. д. Но даже при использовании прототипов в таком широком понимании следует помнить, что любой прототип — это пройденный этап. Прошло определенное время после его разработки, наука и техника ушли вперед, поэтому при проектировании корабля необходимо учитывать изменения требований к проектированию, которые произошли за данный отрезок времени.

Другими словами, необходимо определенным образом корректировать данные какого прототипа. То же самое следует сказать и в отношении статистической информации. Используя при разработке проекта статистические данные, необходимо прежде всего хорошо знать их происхождение, когда, как и для каких типов ПЛ они получены. При этом надо учитывать, что статистические данные и прототипы, не более чем накопленный на данное время опыт. Развитие оборудования, применение новых материалов, изменение требований к проектированию, разработка новых конструктивных схем, применение новых технологических решений — все это влияет на различные измерения, параметры и характеристики.

Из изложенного следует, что использование накопленного предыдущими поколениями проектировщиков опыта оправдано и необходимо, но только творческое к нему отношение позволяет успешно решить поставленную задачу [17].

Из всех стадий разработки проекта рассмотрим наиболее подробно начальную стадию, в которой можно отметить проработку технического предложения и тактико-технического задания. Эти стадии представляют для проектировщиков большой творческий интерес в наиболее сложное, так как перед ними имеется только проектное задание и чистые листы бумаги. На этой стадии почти все незна-

неопределинно, имеются только идеи, замечены отдельные соображения, которые желательно реализовать в будущем проекте. На этой стадии больше, чем на любой другой проектирование скорее искусство, чем наука. Успех проекта в значительной степени зависит от широты кругозора и опыта конструктора и проектного коллектива. Опытный конструктор, знакомый с подводными лодками различных проектов, использующ различные коэффициенты и измерители, может на ранней стадии проектирования получить достаточно точные значения основных элементов корабля.

Какими же методами можно пользоваться при разработке проекта ПЛ на самых ранних стадиях?

В принципе можно применять все методы, рекомендуемые в теории проектирования судов [6], [60], [61]. Однако особенности подводных лодок в значительной степени затрудняют использование многих из них. Наличие прочных и наружных корпусов, их взаимная компоновка, необходимость строгого согласования нагрузки и постоянного плавучего объема, сложность дифферентовки в различных режимах плавания — вот примеры далеко не всех особенностей при проектировании подводных лодок. В этих условиях выполнение закона Архимеда — закона номер один для подводника, достаточно сложная задача. Кроме того нельзя забывать, что в отличие от других кораблей, в том числе и от космических, ПЛ многократно испытывает переменное давление от 1 до 100 атмосфер, а специальные подводные лодки и до 1000 атмосфер.

Выбор метода разработки проекта ПЛ на начальной стадии зависит также от характера задания на проектирование. Так, если подводная лодка проектируется под реальную, заданную энергетическую установку, заданный комплекс вооружения и электроника, то это в известной мере облегчает проектирование, т.к. массогабаритные характеристики части оборудования становятся известными в самом начале проектирования, но такие условия задания бывают не всегда. Чаще большинство составляющих ПЛ необходимо подобрать, оптимизирова их элементы по многим параметрам: мощность, вес, объем, потребление энергии, необходимость охлаждения и др.

Все применяемые в настоящее время методы опираются на накопленный опыт проектирования, в развитии которого внесли значительный вклад ведущие конструкторы отечественного подводного флота: Баранов И. Л., Горизтедан Е.А., Исаев Н.Н., Кассинер А. С., Коталев С.Н., Малинин Б. М., Перегудов В.Н., Рудинский М. А., Спасский И.Д., Черышев Г.Н. и многие другие [53]. На практике

каждая школа конструкторов использует на ранней стадии проектирования свои традиционные методы разработки проекта [82].

Метод рисования или графический метод

Разработка проекта данным методом начинается с графической проработки размещения оборудования по отсекам прочного корпуса и общей проработки всего архитектурного облика ПЛ. Затем по данным графической проработки рассчитываются в первом приближении нагрузка и постоянный плавучий объем, проверяется удифферентовка корабля по силам и моментам. Если проведенная проектная проработка оказывается с указанными позициями неудачной, в нее вводятся определенные изменения и производится новая проверка результатов.

Данный метод может использоваться, очевидно, только тогда, когда уже в самом начале разработки проекта известно (или задано) насыщение корабля, например, ГЭУ и массогабаритные характеристики большей части оборудования известны. При разработке проекта этим методом возможна проработка ограниченного числа вариантов, т.к. метод весьма трудоемок.

Однако, использование современной вычислительной техники и создание необходимого банка данных делает этот метод весьма перспективным.

Графоаналитический метод

Суть данного метода состоит в том, что для определения водонесущности, главных размеров и других элементов ПЛ используются как графические проработки, так и расчетные зависимости.

Так, например, используя уравнение масс, определяют водонесущие подводной лодки, выбирают энергетическую установку. Далее уравнение масс уточняется, снова определяется водонесущие корабля, производится графическая проработка размещения по отсекам, выбирается приближенно запас плавучести, далее определяют величину ПЛЮ и оценивают в первом приближении удифферентованность ПЛ. Как правило, расположение оборудования разрабатывается в нескольких вариантах. Однако, следует иметь в виду, что при выборе прочного корпуса возможные варианты решения задачи ограничены. В отдельных случаях могут быть разработаны несколько вариантов прочного корпуса.

Аналитический метод

В отличие от предыдущих методов, данный метод основывается не на графических проработках, а на исследовании различных аналитических зависимостей. Так, располагая уравнением масс, уравнением объемов, остойчивости, ходкости и т. д., выраженных в функции элементов тактико-технического задания, водозатяжения и других проектных параметров, и решая совместно эти уравнения можно определить наиболее водозатяжение, главные размерения и другие проектные характеристики корабля. Аналитический метод широко применяется при исследовательском проектировании. Он не требует трудоемких графических проработок и дает возможность рассматривать большое число вариантов решения поставленной задачи. Этот метод позволяет получать оптимальные решения задачи по выбранным критериям. Очевидно, что достоверность полученных результатов во многом зависит как от выбранного критерия, так и от правильного выбора диапазона изменений варьируемых переменных.

В тоже время качество проекта в одинаковой степени зависит как от опыта конструктора, так и от его умения распорядиться теми средствами, которые даются ему другими дисциплинами, связанными с кораблестроением, а также всеми достижениями в других отраслях науки и техники, которые могут быть использованы для повышения качества проектирования.

1.3. Применение электронно-вычислительной техники в проектировании подводных лодок

Одной из характерных особенностей современного проектирования ПЛ является все более расширяющееся применение вычислительной и чертежно-графической техники.

Вначале (60—70-е годы) ЭВМ применялись для выполнения отдельных наиболее типичных кораблестроительных расчетов, методов которых, как правило, использовались для ручного счета и не требовали их значительной переработки. Это, прежде всего, расчеты нагрузки, статки и динамики корабля, прочности типовых конструкций и т.п. [39], [97].

Однако развитие и совершенствование самой вычислительной техники способствовало совершенствованию и методов расчетов, например, за счет отказа от различных упрощений и допущений. Получили распространение и новые универсальные методы, такие как метод конечных элементов, который позволяет более точно определять напряженные состояния в конструкциях, что дает большую надежность при минимальных затратах материала [81].

Существенно расширилась и сама область применения ЭВМ, охватывая новые стороны инженерной и проектной деятельности [61], [98].

В настоящее время кроме указанных выше расчетов ЭВМ используются для составления ведомостей, спецификаций, вычерчивания чертежей и т.д. Автоматизируются, прежде всего, наиболее трудоемкие и рутинные работы. Успешно решаются задачи по размещению оборудования в помещениях и выпуска чертежей общего расположения. Существенным шагом является возложение на ЭВМ функций выбора оптимальных решений.

Цель и направленность использования ЭВМ в проектировании во многом определяется стадией разработки проекта (ОГЗ, ТТЗ, технико-предваритель, эскизный, конструкторский, рабочий проекты).

Так, в процессе подготовки оперативно-тактического задания или тактико-технического задания производится выбор и обоснование требований к тактико-техническим элементам корабля, состав и номенклатура основного вооружения, оборудования и т.п. Главной целью использования ЭВМ на этом этапе является получение такого сочетания характеристик корабля, которое обеспечило бы ему решение поставленных перед ним задач наилучшим образом.

На стадии технического предложения и на начальных этапах эскизного проекта основной задачей является формирование архитектурно-конструктивного облика ПЛ, уточнение состава технических средств, определение основных кораблестроительных элементов, включая нормальное водозатяжение, главные размерения, маневренные характеристики и др.

Целью использования ЭВМ на этих стадиях является определение не просто элементов, а оптимальных элементов корабля и его компоновки, обеспечение, например, минимум нормального водозатяжения и скорости ПЛ при условии удовлетворения требованиям ТТЗ.

На последующих стадиях проектирования корабля наблюдается существенный рост трудоемкости работ, определяющийся ростом как геометрической прогрессии количеством информации, которую нужно зафиксировать, откорректировать, использовать по назначению или передать для дальнейшего использования в различные отделы проектного бюро. Такую работу при полной согласованности всей конструкторской документацией нерационально выполнять традиционным ручным способом, как по причине ее трудоемкости, а значит и длительности выполнения, а также неизбежных ошибок, связанных с человеческим фактором. Здесь также незаменима ЭВМ, но цель ее использования уже другая — снижение трудоемкости и повышение качества конструкторских работ.

Наибольший интерес представляют именно ранние стадии разработки проекта, когда методы теории проектирования используются наиболее широко и с практическими результатами.

Использование ЭВМ при проектировании любого инженерного сооружения, в том числе и ПЛ, предполагает наличие ее математической модели и соответствующего программного обеспечения, реализующего алгоритм данной модели.

Сформулируем задачу проектирования ПЛ как экстремальную задачу. Пусть $C = (C_1, \dots, C_n)$ — вектор элементов технического задания, данных прототипов и т.д. (например, глубина погружения, скорость).

Вектор $X = (X_1, \dots, X_n)$ — вектор оптимизируемых параметров, в качестве которых выступают кораблестроительные элементы (водоизмещение, главная размерность).

На компоненты вектора X накладываются двусторонние ограничивающие виды:

$$(X_i)_{\min} \leq X_i \leq (X_i)_{\max}, \quad i=1, \dots, n. \quad (1.1)$$

Эти ограничения вытекают, например, из условий эксплуатации и строительства.

Требования к ПЛ формулируются в виде

$$B_j(X, C) \oplus A_j(C), \quad j=1, \dots, m, \quad (1.2)$$

где B_j — оценка j -го качества варианта проекта

\oplus — знак отношения ($>$, $<$ и т.д.); $A_j(C)$ — требования к j -у качеству.

В данном случае любой вариант (любой набор X), удовлетворяющий (1.1) и (1.2), является допустимым.

Для выбора наилучшего варианта вводится критерий эффективности, т.е. мера совершенства проекта:

$$Z(X, C) \rightarrow \text{ext}. \quad (1.3)$$

Предполагается, что $Z(X, C)$ монотонно связан с качеством проекта.

Таким образом задача проектирования ПЛ — это нахождение такого вектора X , когда при известных C и выполнении (1.1) и (1.2) критерий (1.3) достигает экстремальных значений.

Математическая модель ПЛ, представляющая собой совокупности функций B_j, A_j и C , приведена на рис. 1.4 [82].



Рис. 1.4. Математическая модель корабля

Главным требованием, которое предъявляется к математической модели ПЛ, является требование к ее адекватности, т.е. решения, получаемые с помощью этой теории, должны подтверждаться существующей практикой.

Выполнение этих требований обеспечивается за счет:

- построения геометрической модели ПЛ, позволяющей описывать различные формы наружного и прочного корпусов, а также выступающих частей;
 - построения алгоритмов, отражающих физическую сущность описываемых взаимосвязей, а также построения алгоритмов на базе расчетных процедур;
 - повышения степени детализации математического описания проектирования;
 - применения прямых кораблестроительных методов расчета.
- Математические модели, которые используются в конструкторских бюро, разрабатываются, главным образом, для решения следующих проектных задач:
- оценки возможности реализации заданных заказчиком требований на проектирование ПЛ, проверки совместимости и непротиворечивости этих требований, выполнения обоснованной характеристики ПЛ, заданных в задании на проектирование;
 - определения (уточнения) основных кораблестроительных элементов ПЛ, ее архитектурно-компоновочного облика.

Первая задача решается, главным образом, на стадии разработки технического предложения (рис.1.5) и включает в себя формирование различных вариантов ПЛ, оценку их элементов и характеристик, выбор наиболее предпочтительного варианта для последующего проектирования.



Рис. 1.5. Решение задачи на стадии технического предложения традиционными методами

На рис. 1.6 приведена одна из возможных схем общепроектной системы автоматического проектирования (САПР), предназначенной для решения задач первого типа.

Вторая задача является логическим продолжением первой. Здесь детализируется описание наружного и прочного корпусов, уточняется компоновка, выполняются расчеты статки и динамики корабля, готовится информация для последующей ее обработки специалистами смежных подразделений.

Вместе с тем необходимо отметить, что ЭВМ хотя и мощный, с большими возможностями, но все же инструмент в руках конструктора, позволяющий более быстро, более глубоко и широко решать поставленные задачи, но не более. Результаты, полученные с его помощью, будут в значительной степени зависеть от того, насколько

сам конструктор представляет физические основы того или иного явления и умеет проанализировать полученные результаты.



Рис. 1.6. Пример архитектуры САПР

Здесь уместно отметить, что проектирование любого объекта и, в том числе самого сложного, каким является подводная лодка, является искусством. Проектант должен обладать и постоянно совершенствовать свои знания, отличная их практикой ручного рисования и анализа не доверяя производству своего детища только машине [50].

2. ВОДОИЗМЕЩЕНИЕ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ

$$D_x = D_0 + \rho \sum V_{изх}; \\ V_{из} = V_0 + \sum V_{изх} = V_0 \cdot (1 + \varepsilon) \quad (2.2)$$

где $\varepsilon = \frac{\sum V_{изх}}{V_0}$ — относительный запас плавучести.

Полное весовое $D_{из}$ и объемное $V_{из}$ подводные водоизмещения учитывают массу и объем воды в ЦГБ и во всех пронизаемых частях корпуса.

$$D_{из} = D_0 + \rho \sum V_{изх} + \rho \sum V_{изв}; \\ V_{из} = V_0 + \sum V_{изх} + \sum V_{изв}. \quad (2.3)$$

Полный подводный объем вычисляется по наружной поверхности обшивки корпуса, включая все объемы выступающих частей. Необходимо также учесть наружные покрытия корпуса.

Основную часть $V_{из}$ составляет объем голого корпуса $V_{гк}$, который вычисляется по теоретической поверхности (без учета толщин обшивки, покрытий наружного корпуса ЦЛ и выступающих частей).

Перечисленные выше виды водоизмещений относятся к любым плавацим подводным объектам.

Дизель-электрические подводные лодки могут принимать усиленный запас топлива в специально оборудованные топливно-балластные цистерны. Чтобы подводная лодка могла находиться в подводном положении, для поддержания положительной остаточной плавучести топлива необходимо принять соответствующее количество локальных запасов (масло, вода, промизня) и водной балласт в цистернах вспомогательного балласта (ΔP). Для случая приема усиленного запаса топлива вводится понятие "водоизмещение с топливом в перегрузку", $D_{изр}$, $V_{изр}$, определяемое зависимостями

$$D_{изр} = D_0 + \rho \sum V_{изг} + \Delta P = D_0 + \rho \sum V_{изг}; \\ V_{изр} = V_0 + \sum V_{изг} \quad (2.4)$$

где $V_{изг}$ — объем нетто топливно-балластных цистерн.

Из зависимостей (2.4) видно, что все перечисленные водоизмещения являются модифицированными нормальными водоизмещениями, поскольку в каждом из рассматриваемых случаев дело сводится к распределению метода приема груза, широко примененного в теории корабля, на те или иные объемы корпуса, заполняемые водой.

Каждое из перечисленных водоизмещений имеет определенный физический смысл и применяется для решения своего круга вопро-

2.1. Виды водоизмещения подводной лодки

В отличие от надводных судов для подводных лодок устанавливается только одно естественное состояние нагрузки — нормальная нагрузка. Это объясняется, в соответствии с законом Архимеда, необходимостью равенства веса ЦЛ силе плавучести в подводном положении, однозначно определяемой (при плотности воды $\rho = const$) ее постоянным плавучим объемом в подводном положении.

Под нормальной нагрузкой понимается совокупность веса и координаты центра тяжести совершенно готовой подводной лодки, укомплектованной личным составом, готовыми к действию механизмами, системами и устройствами, штатными специальными грузами и нормальными запасами переменных грузов (топливо, масло, вода, промизня и т.д.), удифференцированной твердым балластом [74].

Нормальной нагрузке соответствует нормальное асоевое водоизмещение подводной лодки D_0 , равное произведению расчетной плотности воды на величину объемного водоизмещения, в качестве которого в подводном положении выступает постоянный плавучий объем (ЦПО) V_0 , а в надводном — объемное водоизмещение $V_{из}$, соответствующее крейсерской ватерлинии, равные по величине, но различные по форме.

$$D_0 = \rho V_0 \quad D_{из} = \rho V_{из} \quad (2.1)$$

В подводном кораблестроении употребляется еще несколько понятий водоизмещения, связанных с учетом массы жидкости, заполняющей объемы корпуса, не входящие в ЦПО — это объемы цистерн главного балласта $V_{изв}$ и пронизаемых частей $V_{изр}$.

Весовое D_0 и объемное V_0 подводные водоизмещения учитывают массу и объем воды в объеме нетто ЦГБ.

Весовое $D_{из}$ и объемное $V_{из}$ подводные водоизмещения представляют собой весь водонепроницаемый объем, который сохраняет герметичность до начала ухода подводной лодки под воду.

сов. Так, нормальное весовое водоизмещение определяет массу подводной лодки в воздухе без воды в ЦГБ и прочищаемых частях. Производные от этого водоизмещения используются в вопросах технологии постройки, транспортировки ПЛ в экономических расчетах (спусковая масса, транспортная масса). В ТТЗ обычно указывается величина именно нормального водоизмещения.

Нормальное водоизмещение является основным, исходным. Однако оно еще не определяет форму корпуса, главные размеры и такие важнейшие качества подводной лодки как ходкость и управляемость в надводном и подводном положениях. Указанные качества определяют соответственно надводное и полное подводное водоизмещения, ибо только они характеризуют форму корпуса, главные размеры, полную движущую массу и смоченную поверхность ПЛ. В этом заключается одна из главных особенностей проектирования подводных лодок. Учитывая изложенное, а также зависимость уровня физических полей от полного подводного водоизмещения, было бы целесообразно при заказе корабля оговаривать требования именно по этому водоизмещению.

2.2. Разбивка весового водоизмещения (нагрузки) на стандартные группы

Для упорядочения расчетов нагрузки и уменьшения вероятности ошибок, а также для возможности сопоставления нагрузок различных проектов подводных лодок (прототипов) и использования этого материала при проектировании результаты расчета нагрузки должны быть представлены единообразно. Поэтому расчеты нагрузки ПЛ, как и надводных судов, регламентируются соответствующими отраслевыми стандартами, которые содержат некоторые общие правила выполнения расчетов, устанавливают разбивку масс, составляющих нагрузку подводной лодки, и определяют форму таблиц, в которых записываются результаты расчета.

Все массы, составляющие нормальную весовую нагрузку ПЛ, разбиваются на группы, подгруппы и виды. Каждой массе присвоен цифровой код. Разбивка масс на группы и коды групп соответствует "Классификатору ЕСКД класс 36 (сула, суловое оборудование)" [33], согласно которому производится выпуск рабочих чертежей подводной лодки на стадии рабочего проекта.

В табл. 2.1 показана схема записи составляющих нагрузки.

В зависимости от стадии проектирования нагрузка рассчитывается с разной степенью подробности и разными методами. При разработке технического предложения обычно ограничиваются составлением

нагрузки по группам, а в эскизном проекте — по подгруппам. Большая часть масс в этих случаях определяется методом пересчета с прототипов по приближенным формулам или определяется на основе устойчивых статистических закономерностей, полученных при анализе нагрузки ряда ранее построенных или спроектированных ПЛ. Точность вычисления элементов нагрузки и водоизмещения в целом с помощью этих методов невелика (около 10%), что объясняется возможностью вариаций исходных данных в широком диапазоне. На последующих этапах проектирования, когда требуется повышенная точность расчетов, указанные методы применяются в ограниченном объеме.

Таблица 2.1

Табличная форма записи результатов расчета нагрузки

Код элемента	Наименование элемента	Р, т	Центры			Моменты			Примечание
			X, м	Y, м	Z, м	M _x , тм	M _y , тм	M _z , тм	
нагрузка	капсула								

В техническом проекте нагрузка составляется по подгруппам и элементам. Массы и плечи определяются более точно за счет большего дробления масс и использования достаточно подробных конструктивных чертежей, чертежей общего расположения и принципиальных схем систем, электрооборудования и т. д.

На стадии рабочего проекта массы и плечи рассчитываются по рабочим чертежам, на основании подробных чертежей общего расположения и технических условий контрагентских поставок.

В итоге выпускается так называемая исполнительная нагрузка (нагрузка по рабочим чертежам).

Кроме плеч и моментов по высоте от основной плоскости и по длине от миделя на стадии технического и рабочего проектов должны быть вычислены моменты масс относительно диаметра для того, чтобы убедиться в отсутствии статического крена, а также при необходимости его ликвидации конструктивными методами или с помощью балласта.

В расчете нагрузки должно быть четко указано положение плоскости отсчета абсцисс относительно ближайшего практического шпангоута и приведена таблица отстояний практических шпангоутов относительно плоскости отсчета.

В табл. 2.2 приведена стандартная разбивка масс подводной лодки по группам [16], [33], [65], [69].

Стандартная разбивка масс удобна для расчета нагрузки при разработке чертежей проектируемой подводной лодки и для весового контроля в процессе ее постройки.

Таблица 2.2

Группы, составляющие нагрузку ПЛ

Номер группы	Наименование	ДМП	АПЛТ	АЛПР
000	Запас водоизмещения	0,5-1,5	1,0-1,5	1,0-1,5
100	Корпус	37-38	38-39	39-40
200	Судовые устройства, аэские мачты	3-4	3-4	2-3
300	Мебель и оборудование помещений, персонал, пассажиры, инвентарь, тренажеры, ЗИП и снабжение	8	6-7	6,5-7,5
400	Механическое оборудование, трубопроводы и системы энергетических установок	8-9	16-18	13-14
500	Судовые системы	8,0-8,5	8,0-8,5	6-7
600	Электрооборудование и кабели, электротехнические системы, электротехнический персонал и радиоэлектронная техника	16-20	7-8	6-8
700	Средства связи и сигнализации; устройства и оборудование, обеспечивающие эксплуатацию	4-5	5	11-16
800	Запасы и команда	3-5	4-5	2-3
*	Итого по группам нагрузки без баласта Тяжелый балласт Нормальная нагрузка корабля при $\rho = 10^3$	88,5-99,0	88-96	87-100

В исследовательском проектировании, когда основные элементы ПЛ еще подлежат определению, проявляются некоторые недостатки стандартной разбивки, связанные с объединением масс, зависящих от различных характеристик и элементов ПЛ.

Здесь необходимо сделать одно очень важное замечание. С появлением вычислительной техники широко используется ее возможность в подсчете всех составляющих нагрузки элементов: масс, моментов и их сумм. Это естественно. Но если, особенно на ранних стадиях, не будет аэстик "ручной" и сравнительный контроль расчетов масс и моментов, неизбежно будут ошибки, которые часто приводят к плачевным результатам.

2.3. Разбивка нагрузки на начальных стадиях проектирования. Измерители масс

Уравнение масс, которое определяет водоизмещение корабля, может быть решено только в том случае, если будут установлены связи между массами, входящими в нагрузку ПЛ, и ее характеристиками и элементами. Поэтому разбивку масс в начальных стадиях производит иначе, чем это указано в стандарте.

Во-первых, выделяются составные части ПЛ, массы которых достаточно полно определяются данными проектного задания. К ним относятся массы вооружения, запасов и команды, энергетических установок и т. п.

Во-вторых, оставшиеся массы группируются по степени их зависимости от основных характеристик и неизвестных пока элементов ПЛ.

Такой принцип разбивки нагрузки (назовем его проектным) позволяет уже на ранних стадиях проектирования более точно подсчитать заданные массы, а для остальных установить физические зависимости более наглядные, чем получаемые в рамках стандарта [74].

Рассмотрим перегруппировку нагрузки ПЛ при переходе от стандартной разбивки масс к проектной.

Прежде всего, в отдельную статью нагрузки выделяются конструкции, работающие под избыточным давлением: собственно прочный корпус (обшивка, набор и подкрепления), конструкции разнородные ПК (концевые переборки, прочная рубка, прочные шестерни и т. д.). Обозначим эти массы P_{22} и P_{23} .

Остальные составляющие группы 100 "Корпус" стандартной разбивки объединяются в статью "легкий корпус" P_{24} , которая при необходимости более точных расчетов может быть разделена на ряд подстатей.

Системы и устройства ПЛ (группы 200 и 500) объединяются в одну статью P_{25} , однако как и P_{24} , могут быть рассчитаны более точно.

В группе 300 целесообразно выделить в отдельную статью "Покрытия" P_{302} , поскольку их масса определяется в основном требованиями защиты и может быть рассчитана отдельно.

При проектировании ДЭПЛ группа 400, как правило, состоит из следующих статей:

- дизельная установка P_{30} ;
- гребная электрическая установка P_{312} ;
- валопровод P_{31} с соответствующими вспомогательными механизмами и устройствами по принадлежности.

Для АПЛ она состоит из главной энергетической установки P_{310} и вспомогательной энергетической установки P_{310V} .

Группы 600 целесообразно представить в виде трех статей:

- аккумуляторная установка P_{303} ;
- общекорабельное электрооборудование и прокладка кабеля по кораблю P_{304} ;
- радиоэлектронное вооружение P_{305} .

Для атомных подводных лодок P_{303} можно рассматривать вместе с массой главной энергетической установки.

Группы 800 следует перегруппировать на статьи:

- топливо и масло P_{311} ;
- команда, запасы провизии и пресной воды P_{312} ;
- транспортируемые грузы P_{313} ;
- дифференточная и остаточная вода P_{314} .

В группе 000 рассматривается запас водонизменения на модернизацию P_{300} и запас водонизменения на проектирование и постройку P_{300} . Твердый балласт P_{301} выделен в отдельную статью.

В зависимости от особенностей проектируемой подводной лодки, объема исходной информации и наличия близкого прототипа, предельная разбивка масс может быть изменена. В частности, она может быть более подробной или, наоборот, укрупненной. Может оказаться рациональной группировка масс по принципу одинакового назначения или по принципу модульной разбивки масс ПЛ.

Зависимости, использующие измерители для приближенного определения масс ПЛ, можно разделить на две группы.

Первая группа — массы представлены в функции ТТХ и основных элементов проектируемой ПЛ, определяющих ее геометрию

$$P_i = p_i f_i(D_{301}, l_i, B, H, \delta, \dots, H_{301}, R) \quad (2.5)$$

где p_i — измеритель массы i группы;

f_i — функции основных элементов;

L — длина корпуса ПЛ;

B — ширина корпуса ПЛ;

H — высота корпуса ПЛ над вилеле;

δ — коэффициент общей полноты;

δ — скорость хода ПЛ;

H_{301} — предельная глубина погружения ПЛ;

R — дальность плавания ПЛ в рассматриваемом режиме (надводный, РДП, подводный).

Зависимости аналогичного вида широко используются в проектировании надводных судов и кораблей. При проектировании ПЛ использование таких зависимостей затруднено, так как расчет масс ведется для нормального водонизменения, которое не определяет главных размерений и формы наружного корпуса ПЛ. Соотношение между D_{30} и D_{301} , как будет показано далее, малоустойчиво даже в рамках одного архитектурного типа ПЛ, и переход к D_{301} в выражениях для определения масс связан с увеличением погрешности расчета. Поэтому зависимости первой группы для определения масс, применяемые при проектировании ПЛ, обычно имеют вид:

$$P_i = p_i f_i(D_i, \phi_i, H_{301}, R, \dots) \quad (2.6)$$

Вторая группа формул используется для определения масс отдельных конструкций по известным их размерам или объему

$$P_i = g_i \varphi_i(V_i, l_i, b_i, h_i, \dots) \quad (2.7)$$

где g_i — измеритель массы второй группы;

φ_i — функции характерных размеров конструкции;

V_i — объем конструкции;

l_i, b_i, h_i — длина, ширина и высота конструкции.

Зависимостями второй группы пользуются для более детальных расчетов, когда принципиальные схемы общего расположения составлены, но расчеты прочности и детальные чертежи конструкций еще не выполнены.

Источниками получения измерителей масс могут являться следующие документы:

- документация подводных лодок-прототипов (одна или несколько);

— документация проектов ПЛ, в которых расчеты нагрузки были выполнены достаточно подробно;

— конструкторские документы, на основании которых могут быть определены, например, измерители масс энергетической установки, электрооборудования и т. д.;

— частные проектные проработки, которые выполняются для предварительной проверки возможности реализации на ПЛ тех или иных новых решений;

— перспективные измерители, принимаемые в исследовательском проектировании на основании анализа перспектив развития техники.

При решении практических задач проектирования важно выбрать измеритель, соответствующий уровню решаемой задачи.

Если рассчитывается масса целой группы, применяются измерители вычисленные для всей группы нагрузки; если определяется масса подгруппы — должны использоваться измерители для подгруппы; наконец, если определяется масса отдельной конструкции применяются измерители, вычисленные по характерному размеру или параметру данной конструкции.

Однако уместно повторить, что, используя измерители и другие величины, получаемые из указанной выше документации, проектировщик должен помнить: прямой перенос их на проектируемый корабль может означать сохранение технического уровня прототипа. Поэтому использование измерителей и документации прототипов должен предшествовать их творческий анализ и корректировка с учетом последних достижений техники и особенностей проекта.

3. ЗАВИСИМОСТЬ МАСС ОТДЕЛЬНЫХ ГРУПП И СТАТЕЙ НАГРУЗКИ ОТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ

3.1. Нагрузка по группе "Корпус"

Для определения массы корпуса подводных судов существует ряд формул, связывающих ее с водоизмещением судна и его главными размерениями, к которым относятся высота борта и коэффициент обшивки.

Для подводной лодки использование этих формул невозможно по двум причинам:

— во-первых, главные размерения корабля определяются только полнотой подводным водоизмещением;

— во-вторых, из-за наличия двух корпусов — прочного и легкого, каждый из которых выполняет свои функциональные задачи. Поэтому при расчете массы по группе "Корпус" будем рассматривать эти корпуса раздельно.

Прочный корпус и равнопрочные конструкции

Масса прочного корпуса $P_{ПК}$ зависит от расчетного давления (глубины погружения), геометрических характеристик, физических и механических свойств материала. Кроме этого, она зависит от конструктивных особенностей, например, от расположения шпангоута (внутреннее или наружное), размера принятой шпангоута, от принятых методов расчета и нормы прочности [1], [64], [77], [90].

На стадии определения основных элементов проектируемой ПЛ, когда размеры отсеков ПК еще не определены, для приближенного нахождения его массы используются следующие простейшие зависимости:

$$P_{ПК} = \rho_{ПК} D_0 \quad (3.1)$$

$$P_{ПК} = \gamma_{ПК} V_{ПК} \quad (3.2)$$

где $V_{ПК}$ — теоретический объем ПК, принятый по внутренней поверхности обшивки.

Формула (3.1) может применяться на стадии определения водоизмещения ПЛ. Она выражает наиболее простую, но и наименее точную зависимость массы ПК от водоизмещения ПЛ. Измеритель $P_{ПК}$ (относительная масса ПК), как и все измерители данного типа, безразмерен.

Формула (3.2) применяется в начальных стадиях проектирования весьма широко. Входящий в нее размерный измеритель $g_{ПК}$ (т/м^3), называемый иногда удельной массой ПК, показывает ее величину, приходящуюся на 1 м^3 создаваемого ПК плавучего объема. Этот измеритель имеет вполне определенный физический смысл. Разность

$$\rho_{ПК} = \rho - g_{ПК} \quad (3.3)$$

можно рассматривать в качестве показателя эффективности ПК, как средство создания плавучести ПЛ. Величина $g_{ПК}$ определяет, какую полезную нагрузку может нести ПК на 1 м^3 своего объема.

Сопоставляя зависимости (3.1) и (3.2), получим формулу связи между измерителями $P_{ПК}$ и $g_{ПК}$, которая показывает, что измеритель

$$P_{ПК} = g_{ПК} \frac{1}{\rho} \left(\frac{V_{ПК}}{V_s} \right) \quad (3.4)$$

должен быть менее стабилен, т.к. зависит от $g_{ПК}$ и отношения

$\left(\frac{V_{ПК}}{V_s} \right)$, которое, как будет показано далее, может изменяться в довольно широких пределах. Так, например, при одном и том же значении $g_{ПК} = 0,18 \text{ т/м}^3$ относительная масса ПК колеблется в пределах $P_{ПК} = 0,13—0,17$.

Рассмотрим вопросы, связанные с практическим использованием зависимости (3.2).

Чтобы исключить индивидуальные особенности конфигурации конкретных ПК подводных лодок, обычно представляющих собой комбинации цилиндров и конических участков, введем условный аналог прочного корпуса в виде цилиндра с постоянным по всей длине радиусом, подкрепленного шпангоутами одинаковой жесткости без вырезов и местных подкреплений, имеющего одинаковую с реальным ПК величину объема и длину, вид материала и его марку, и рассчитанного на одинаковую внешнюю нагрузку по одной и той же методике (рис. 3.1).

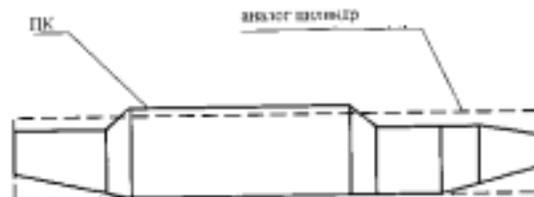


Рис. 3.1. Схема аналога прочного корпуса

Массу обшивки и набора такого аналога-цилиндра будем называть теоретической массой ПК

$$P_{ПК}^T = g_{ПК}^T V_{ПК},$$

где $g_{ПК}^T$ — измеритель теоретической массы ПК.

Для перехода к массе реального корпуса введем два статистических коэффициента $k_{сд}$ и $k_{г}$:

$$P_{ПК} = k_{сд} \cdot k_{г} \cdot g_{ПК}^T V_{ПК}. \quad (3.5)$$

Коэффициент $k_{сд}$ учитывает наличие в реальном корпусе мелких рассредоточенных подкреплений и усилений обшивки и набора, конических участков, а также вырезов в обшивке и снятие части шпангоутов ПК в равнопрочных шпангоутах. Если величина измерителя определена по спецификационным толщинам обшивки, а объем равнопрочных шпангоутов составляет 2—3% от D_0 , то приближенное значение $k_{сд} = 1,02—1,04$.

Коэффициент $k_{г} = 1,05—1,22$ учитывает крутые сосредоточенные подкрепления — выкружки гребных валов, конических ракетных шпангоутов и т. д. и определяется пересчетом с прототипа, близкого по характеру и объему подкреплений.

Сопоставляя выражения (3.2) и (3.5), получим связь между измерителями фактической и теоретической массы ПК.

$$g_{ПК} = k_{г} k_{сд} g_{ПК}^T \quad (3.6)$$

Близость реального ПК подводной лодки к аналогу-цилиндру и идентичность факторов, определяющих их массу, дает возможность проводить исследование этих факторов на измерителе $g_{ПК}^T$.

Общий вид функциональной зависимости для $g_{ПК}^T$ может быть представлен в виде:

$$g_{\text{ПК}}^T = f(P, \rho_{\text{ПК}}, \sigma_T, E, d_{\text{ПК}}, \ell_{\text{ПК}}), \quad (3.7)$$

где P — расчетная нагрузка;

$\rho_{\text{ПК}}$ — плотность материала корпуса;

σ_T — предел текучести материала корпуса;

E — модуль упругости;

$d_{\text{ПК}}$ — диаметр прочного корпуса;

$\ell_{\text{ПК}}$ — длина отсека ПК.

В случае аналога-цилиндра измеритель $g_{\text{ПК}}^T$ можно определить по одной шпанге (рис. 3.2).

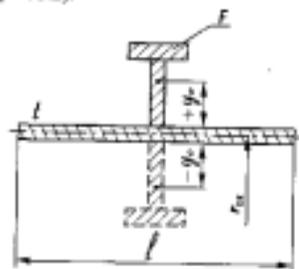


Рис. 3.2. Схема расчетной шпанги

$$g_{\text{ПК}}^T = \frac{P_{\text{ПК}}^T}{V_{\text{ПК}}} = \frac{P_{\text{обш}} + P_{\text{ш}}}{V_{\text{ПК}}} = \frac{2\pi r_{\text{ПК}} \ell \rho_{\text{ПК}} + 2\pi(r \pm y_{\text{н}}) F \rho_{\text{ПК}}}{\pi r_{\text{ПК}}^2 \ell}$$

После преобразования получим:

$$g_{\text{ПК}}^T = 2\rho_{\text{ПК}} \frac{\ell + \frac{F}{r_{\text{ПК}}} (1 \pm \frac{y_{\text{н}}}{r_{\text{ПК}}})}{r_{\text{ПК}}} = 2\rho_{\text{ПК}} \frac{\ell_{\text{ПК}}}{r_{\text{ПК}}} \quad (3.8)$$

где ℓ — толщина обшивки ПК;

ℓ — шпанга;

F — площадь шпангоута;

$y_{\text{н}}$ — ордината нейтральной оси профиля шпангоута (*+ для наружных шпангоутов);

$\ell_{\text{ПК}}$ — приведенная толщина обшивки.

Раскроем характер функциональной зависимости измерителя $g_{\text{ПК}}^T$ (3.7) от определяющих параметров.

Входящие в (3.8) конструктивные элементы ПК (ℓ , F и $\ell_{\text{ПК}}$) определяются расчетами прочности ПК по напряжениям и на устойчивость обшивки и шпангоутов. Получить для измерителя $g_{\text{ПК}}^T$ достаточно точное аналитическое выражение, учитывающее все условия расчета ПК, весьма затруднительно даже для такой простой конструкции, как подкрепленный цилиндр. Если допустить, что толщина обшивки определяется только из условий прочности, то можно переписать $g_{\text{ПК}}^T$ с прототипа при одинаковом виде материала по зависимости:

$$g_{\text{ПК}}^T = g_{\text{ПК}}^T \frac{N_{\text{пр}}}{N_{\text{пр}}} \frac{\sigma_T}{\sigma_T} \quad (3.9)$$

где $N_{\text{пр}}$ — предельная глубина погружения для принятого корпуса прототипа;

σ_T — предел текучести материала корпуса прототипа.

Данной зависимостью можно пользоваться для быстрой оценки ориентировочной величины измерителя массы ПК при различных $N_{\text{пр}}$ и σ_T в случае небольших изменений этих величин, так как игнорирование условий устойчивости и другие допущения могут приводить к существенным погрешностям. Поэтому используют результаты систематизированных расчетов прочности круговых цилиндров, имитирующих прочные корпуса ПЛ с вариациями исходных данных: материала ($\rho_{\text{ПК}}$, σ_T и E), расчетной нагрузки (P) и геометрических параметров ПК ($r_{\text{ПК}}$ и $\ell_{\text{ПК}}$). Полученные в результате таких расчетов значения $g_{\text{ПК}}^T$ представляют в виде графиков.

Рассмотрим влияние геометрических параметров диаметра ПК — $d_{\text{ПК}}$ и длины отсека $\ell_{\text{ПК}}$ на величину $g_{\text{ПК}}^T$.

Глубину погружения и марку материала будем считать неизменными.

При строгой постановке задачи для определенности результатов следует в каждом варианте $d_{\text{ПК}}$ и $\ell_{\text{ПК}}$ искать такую комбинацию ℓ , F , $\ell_{\text{ПК}}$, которая минимизирует $g_{\text{ПК}}^T$; т.е. дает минимальную массу ПК.

На рис. 3.3 представлены зависимости

$$\begin{aligned} (g_{\text{ПК}}^T)_{\text{min}} &= f_1(d_{\text{ПК}}, \ell_{\text{ПК}} = \text{const}) \\ (g_{\text{ПК}}^T)_{\text{min}} &= f_2(d_{\text{ПК}}, \ell_{\text{ПК}} / d_{\text{ПК}} = \text{const}) \end{aligned} \quad (3.10)$$

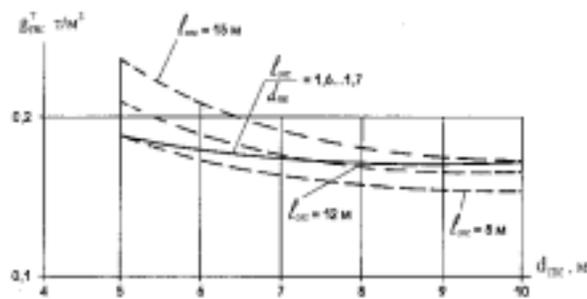


Рис. 3.3. Зависимость измерителя гребного корпуса от его диаметра и длины отсека

В первом случае $g_{ПК}^T$ заметно уменьшается при увеличении $d_{ПК}$, что объясняется усилением влияния переборок, которые становятся относительно баннее.

Во втором случае влияние $d_{ПК}$ существенно меньше, чем в первом. В диапазоне диаметров и относительных длин отсеков $\frac{l_{отс}}{d_{ПК}} = 1.6 \dots 1.7$, характерных для современных ПЛ, его можно считать практически отсутствующим.

Следовательно, при неизменных R_p и σ_t оптимизация диаметра ПК с целью получения абсолютного минимума его массы при $V_{ПК} = const$ не имеет практического смысла. Поперечные размеры и отношение длины ПК к диаметру определяются в большинстве случаев общим расположением ПЛ с учетом требований ходкости к форме корпуса ПЛ, соображениями технологии и другими, но не соображениями уменьшения массы ПК.

Рассмотрим теперь зависимости $g_{ПК}^T$, построенные в функции от $H_{ПК}$ и σ_t для стали (рис. 3.4 и 3.5). Подобными графиками пользуются при проектировании ПЛ.

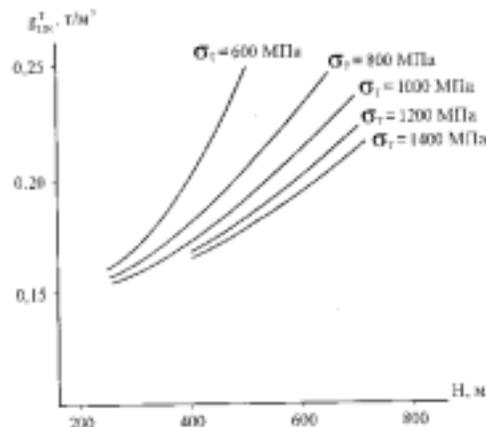


Рис. 3.4. Зависимость измерителя $g_{ПК}^T$ от глубины погружения

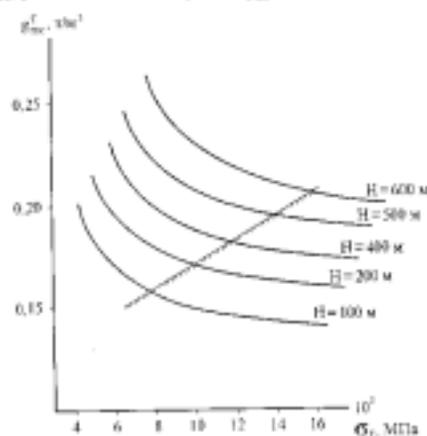


Рис. 3.5. Зависимость измерителя $g_{ПК}^T$ от σ_t материала

Рассматривая рис. 3.4 и 3.5 можно видеть, что при постоянной расчетной нагрузке (глубине погружения) увеличение σ_1 приводит к постепенному снижению полезного эффекта — выигрыш в величине измерителя и в массе ПК уменьшается и при больших значениях σ_1 стремится к нулю. На рис. 3.5 линия, соединяющая точки с условием предельности (в случае влияния на массу ПК значениями σ_1 , отмечена штриховкой.

Увеличение расчетной нагрузки (глубины погружения) расширяет зону эффективного влияния предела текучести на массу ПК.

Указанный характер влияния σ_1 на массу ПК объясняется фактором устойчивости, поскольку при изменении σ_1 модуль нормальной упругости E не изменяется, что не позволяет снизить толщину обшивки без изменения шпаций. Напряжения в материале будут ниже допускаемых, и его высокие механические свойства будут использоваться не полностью.

Строго говоря, уменьшение измерителя $g_{ПК}^T$ при увеличении σ_1 будет иметь место и в случаях, когда толщина обшивки определяется условиями устойчивости, однако это уменьшение невелико и не влияет на сделанные общие выводы.

Представление о шпации вида материала на величину измерителя массы ПК дает рис. 3.6, откуда видно, что переход на новые материалы с высокой удельной прочностью может существенно снизить массу ПК или соответственно увеличить глубину погружения ПЛ.

Масса ПК зависит и от места установки шпангоутов. Наружная установка шпангоутов увеличивает измеритель $g_{ПК}^T$ по сравнению с внутренней:

при $d_{ПК} < 8,0$ м примерно на 1,5—3,0 %

при $d_{ПК} = 8—11$ м примерно на 3,0—5,0 %

Однако следует иметь в виду, что шпангоуты при выносе их наружу кроме увеличения массы ПК создают дополнительную плавучесть. Сопоставляя увеличение массы с величиной дополнительной плавучести, М. К. Глазман [1] получил условие, при выполнении которого увеличение $g_{ПК}^T$ будет компенсировано (точно или с избытком) дополнительной плавучестью.

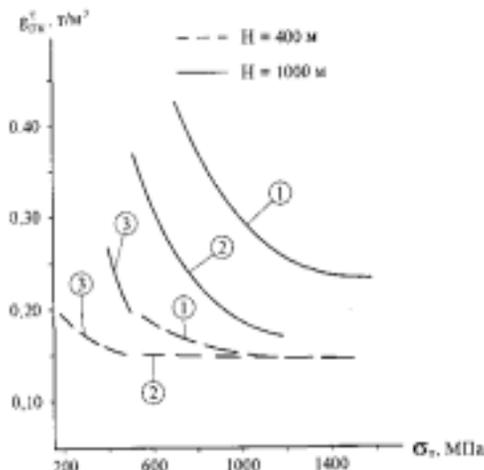


Рис. 3.6. Влияние вида материала на измеритель прочного корпуса ПЛ
1 — сталь, 2 — титан, 3 — АМГ.

$$r_{ПК} \geq \frac{2\rho_{ПК} - \rho}{\rho} y_0 \quad (3.11)$$

где $r_{ПК}$ — радиус прочного корпуса;

y_0 — расстояние нейтральной оси шпангоута до оси прочного корпуса.

Для стальных корпусов ($\rho_{ПК} = 7,85$ т/м³) условие (3.11) будет иметь вид: $r_{ПК} \geq 14,7 y_0$.

На практике условие (3.11), как правило, соблюдается, однако, следует заметить, что вопросы установки шпангоутов снаружи или внутри ПК более сложны, поскольку необходимо учитывать требования общего расположения, конструкции корпуса (двухкорпусная схема ПК), эксплуатационные требования и т. д.

При установленных размерах ПК на величину измерителя $g_{ПК}^T$ оказывает влияние величина шпации — l , которую можно выбрать

так, чтобы вместе с другими конструктивными элементами ПК — т, F — минимизировать величину измерителя $g_{ПК}^T$.

Однако, эта задача "внутренней" оптимизации, она относится к проектированию корпусных конструкций и здесь не рассматривается.

Кроме того, влияние величины шапации на массу ПК сравнительно невелико, но при ее выборе следует учитывать влияние шапации на трудоемкость, а, следовательно, длительность и стоимость постройки корабля [104].

Ниже приведены способы приближенного определения массы ПК и зависимости от характера исходной информации и решаемой задачи. Объем ПК полагаем известным.

1. Имеется близкий (по прочному корпусу) прототип.

а) марки материала и расчетные глубины проекта и прототипа одинаковы $g_{ПК}^T = g_{ПК}^T$.

$$P_{ПК} = P_{ПК}, \frac{V_{ПК}}{V_{ПК}} \quad (3.12)$$

б) марки материала и расчетные глубины у проекта и прототипа различны: с помощью зависимостей $g_{ПК}^T (P_T; \sigma_T)$ (см. рис. 3.4), играющая роль экстраполятора, измеритель прототипа $g_{ПК}$, пересчитывается на проектные P_T и σ_T и определяется масса ПК.

$$g_{ПК} = g_{ПК}, \frac{g_{ПК}^T(P_T; \sigma_T)}{g_{ПК}^T(P_T; \sigma_T)}$$

$$P_{ПК} = g_{ПК} V_{ПК} \quad (3.13)$$

2. Близкого прототипа нет.

По рис. 3.4 находится теоретический измеритель $g_{ПК}^T (P_T; \sigma_T)$.

По зависимости (3.5) определяется масса ПК.

3. Имеются схема и размеры отсеков ПК.

Проводится предварительный расчет прочности по действующей методике каждого отсека ПК, определяются t_i и P_i (шапацию задают одинаковой для всего корпуса). Далее, по формуле, предложенной Е.А. Горинделаджаном определяю массу ПК.

$$P_{ПК} = (P_{ПК} \cdot k_{ПК} + P_{ПК} \cdot k_{ПК}) k_{ПК} + P_{ПК} \quad (3.14)$$

где $P_{ПК} = \sum_i P_{ПК}$ — масса обшивки без учета вырезов и усиления, получаемая суммированием по отсекам;

$P_{ПК} = \sum_i P_{ПК}^T - \Delta P_{ПК}$ — масса набора по отсекам с вычетом шпангоутов, не устанавливаемых в районе равнопрочных цистерн (рис. 3.7);

$\sum_i P_{ПК}^T$ — масса набора по отсекам без вычета шпангоутов, не устанавливаемых в равнопрочных цистернах;

$\Delta P_{ПК}$ — масса частей шпангоутов, не устанавливаемых в равнопрочных цистернах;

n — количество отсеков ПК;

$k_{ПК} = 1,02$ — коэффициент, учитывающий вырезы и усиления обшивки;

$k_{ПК} = 1,03—1,05$ — коэффициент, учитывающий усиления и подкрепления набора, например, в районе съемных листов;

$k_{ПК} = 1,02$ — коэффициент, учитывающий металл сварных швов;

$P_{ПК}$ — масса крупных сосредоточенных подкреплений (концы ракетных шахт и т. д.).

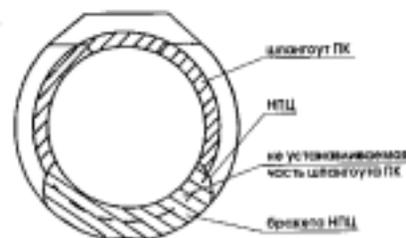


Рис. 3.7. Схема прочного корпуса при расчете его массы по зависимости (3.14)

Существует ряд конструкций корпуса ПЛ, которые рассчитываются, как и прочный корпус, на расчетную нагрузку и масса которых зависит от тех же параметров, что и масса ПК.

Эти конструкции, назовем их равнопрочными (РК), включают в себя:

- концы переборки прочного корпуса;
- равнопрочные прочному корпусу цистерны;

— прочие рубки.

Для первоначальной оценки суммарной массы этих конструкций можно полагать:

$$P_{PK} = p_{PK} D_s \quad (3.15)$$

Изменение расчетной нагрузки и марки материала по сравнению с прототипом учитывается пересчетом измерителя p_{PK} .

$$p_{PK} = \frac{P_p}{P_s} \frac{\sigma_s}{\sigma_p} \quad (3.16)$$

Зависимости (3.15) и (3.16) не отражают всех факторов, определяющих массу равнопрочных конструкций, однако доля их в нагрузке невелика и неточность определения их массы не может привести к заметной погрешности в массе ПЛ.

Измеритель $p_{PK} = 0,03-0,04$ и с увеличением D_s его величина несколько уменьшается.

Масса концевых переборок составляет устойчивую долю около 0,01 от водоизмещения (0,03—0,04 от массы ПК). Основная часть массы РК приходится на равнопрочные цистерны (РЦ). Доля прочих рубок в массе современных ПЛ очень мала и не превышает 0,2—0,3 %.

При наличии схемы отсеков и цистерн, позволяющей определить характерные размеры ПК, расчет масс РК следует вести дифференцировано, используя измерители g_i или результаты предварительного расчета прочности данных конструкций.

Концевые переборки:

$$P_{PK} = P_{PK}^I + P_{PK}^E = g_{PK}^I S_{PK}^I + g_{PK}^E S_{PK}^E \quad (3.17)$$

где $S_{PK}^{(i)} = \frac{\pi}{4} (d_{PK}^{(i)})^2$ — площадь сечения, перекрываемая переборкой.

Измерители $g_{PK}^{(i)}$, определяемые по прототипу, существенно зависят от диаметра переборки (возрастая по мере его увеличения) и от конструктивного типа переборки (плоская или сферическая). Несмотря на то, что сферическая переборка работает на устойчивость, ее масса по сравнению с плоской концевой переборкой получается меньше в 1,05—1,3 раза.

Равнопрочные цистерны:

$$P_{PK} = \sum_i g_{PK} V_{PK} \quad (3.18)$$

Также можно использовать измеритель 1-й группы, который связан с g_{PK} следующей зависимостью:

$$P_{PK} = \frac{P_{PK}}{D_s} = g_{PK} \frac{1}{\rho} \left(\sum \frac{V_{PK}}{V_s} \right) \quad (3.19)$$

где g_{PK} — усредненный измеритель массы равнопрочных цистерн.

Из (3.19) следует, что доля РЦ в нагрузке зависит от относительного объема РЦ. В массу этих цистерн всегда включаются поперечные переборки, отделяющие РЦ от других. Масса переборок и обшивки РЦ относительно велика, поэтому измеритель g_{PK} существенно больше измерителя ПК g_{PK} (иногда в 3—4 раза). Из-за влияния этих факторов у цистерн большого объема измеритель g_{PK} меньше.

Значения измерителя g_{PK} отличаются нестабильностью и могут колебаться в пределах 0,4—0,8 т/м³, причем для внутренних цистерн характерны меньшие значения.

Легкий корпус

В соответствии с принципами проектной разбивки масс будем понимать под легким корпусом (ЛК) все конструкции, оставшиеся в группе 100 после выделения прочного корпуса и равнопрочных конструкций.

Доля ЛК в нагрузке ПЛ зависит от архитектурного типа корабля и степени развитости наружного корпуса (НК).

Для двухкорпусных ПЛ с запасом плавучести, обеспечивающим принятые сегодня требования надводной непотопляемости^{*}, масса ЛК составляет до 45—50% от массы всего корпуса (группа 100), причем наружный корпус у таких ПЛ занимает до 60% от массы ЛК.

Легкий корпус объединяет разнородные конструкции, имеющие различные функциональные значения, разные расчетные нагрузки и марки материала. Для расчета массы таких многофункциональных систем, как легкий корпус в целом (рис.3.8) — нулевой уровень детализации, можно использовать корреляционную зависимость типа (3.20), корректируя ее по прототипу:

* ПЛ должны оставаться на плаву при затоплении одного отсека ПК и двух прилегающих к нему цистерн главного баллиста [30, 39].

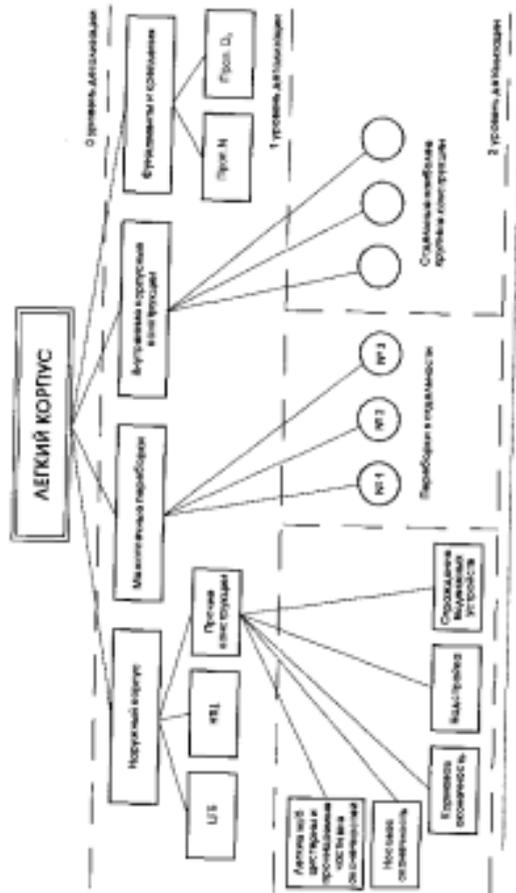


Рис. 3.8. Схема разбивки легкого корпуса в зависимости от уровня детализации расчетов

$$P_{\text{вк}} = A_{\text{вк}} D_0^3 + B_{\text{вк}} \quad (3.20)$$

где $B_{\text{вк}}$ — масса конструкций легкого корпуса, не зависящая от водоизмещения.

Статистическая обработка материалов показала, что простейшая зависимость массы легкого корпуса от нормального водоизмещения дает вполне удовлетворительные результаты:

$$P_{\text{вк}} = p_{\text{вк}} D_0 \approx 0,16 + 0,18 D_0 \quad (3.21)$$

Учитывая большую долю легкого корпуса в нагрузке ПЛ, для получения более точного результата следует детализировать расчет его массы.

Рассмотрим расчет массы ЛК на первом уровне детализации. Поскольку все составляющие ЛК на данном уровне могут быть выражены приближенно в функции водоизмещения, в табл. 3.1, даны примерные величины измерителей $p_i = P_i / D_0$.

Размеры наружного корпуса являются габаритными для ПЛ, поэтому более фактическими для него являются формулы, содержащие подводное водоизмещение или главные размеры, однако и зависимость $P_{\text{вк}} = p_{\text{вк}} D_0$ дает хорошие результаты.

Таблица 1

Измерители масс конструкций, составляющих легкий корпус, отнесенные к нормальному водоизмещению

Наименование масс	Условные обозначения	Величина измерителей,
Наружный корпус	$P_{\text{вк}}$	0,10—0,11
Механические переборки*	$P_{\text{мк}}$	0,020—0,025
Наружные корпусные конструкции	$P_{\text{нк}}$	0,02—0,03
Функции и оборудование	$P_{\text{фк}}$	0,020—0,025
Итого легкий корпус	$P_{\text{лк}}$	0,16—0,19

* При создании на ПЛ отсека-убежища механические переборки, ограничивающие его, выполняются равнопрочными прочному корпусу. В этом случае их масса может быть определена по зависимости 3.17.

Массу наружного корпуса можно уточнить, представив в виде

$$P_{\text{вк}} = P_{\text{вкв}} + P_{\text{нпк}} + P_{\text{впк}}$$

где $P_{\text{вкв}}$ — масса цистерн главного балласта;

$P_{\text{нпк}}$ — масса наружных толщинных цистерн;

$P_{пр}$ — масса прочих частей НК, в основном производимых (производимых оконечности, надстройка, отражение выдвинутых устройств и др.).

На дизель-электрических подводных лодках ЦГБ и НТЦ почти полностью занимают междубортное пространство, а при наличии концевых цистерн частично и оконечности. На атомных подводных лодках в связи с более разнообразным использованием междубортного пространства (цистерны биологической защиты, выгородки различного назначения) доля ЦГБ уменьшается.

Массу ЦГБ и НТЦ можно выразить через некоторые ТТХ и элементы проектируемой ПЛ. Запишем выражения для масс этих цистерн дважды с помощью измерителей первой и второй группы:

$$P_{ЦГБ} = P_{ЦГБ} D_0 \quad (3.22)$$

$$P_{ЦГБ} = \rho_{ЦГБ} V_{ЦГБ}^0 \quad (3.23)$$

$$P_{НТЦ} = P_{НТЦ} D_0^{2,1} \quad (3.24)$$

$$P_{НТЦ} = \rho_{НТЦ} V_{НТЦ}^0 \quad (3.25)$$

где $V_{ЦГБ}^0$ и $V_{НТЦ}^0$ — суммарные объемы брутто цистерн.

Для перехода к объемам нетто введем осредненные по рассматриваемым группам цистерн коэффициенты $k_{ЦГБ}$ и $k_{НТЦ}$, учитывающие набор в цистернах, обшивку ПК, остаточную воду и пр. Кроме того, введем коэффициент $k_{пр}$, показывающий, какая часть нормального запаса топлива расположена в наружных цистернах. Тогда

$$V_{ЦГБ}^0 = k_{ЦГБ} V_{ЦГБ}^1 \quad (3.26)$$

$$V_{НТЦ}^0 = k_{НТЦ} \cdot k_{пр} \cdot V_{НТЦ}^1 \quad (3.27)$$

Из (3.22) и (3.23) с учетом (3.26) получаем зависимость массы ЦГБ от водоизмещения и относительного запаса плавучести (предварительно намечается)

$$P_{ЦГБ} = P_{ЦГБ} D_0 = \rho_{ЦГБ} \left(\frac{V_{ЦГБ}^1}{V_0} \right) D_0 = \rho_{ЦГБ} \frac{k_{ЦГБ}}{\rho} \varepsilon D_0, \quad (3.28)$$

где ε — относительный запас плавучести.

Из (3.24) и (3.25) с учетом (3.27) получим массу НТЦ:

$$P_{НТЦ} = \rho_{НТЦ} \cdot k_{пр} \cdot k_{НТЦ} \frac{V_{НТЦ}^1}{D_0^{2,1}} = \rho_{НТЦ} \frac{k_{пр} \cdot k_{НТЦ}}{\rho_{г}} \frac{P_{г}}{D_0^{2,1}}, \quad (3.29)$$

где $P_{г}$ — полный запас топлива в цистернах (полезный запас + неиспользованные остатки в цистернах).

Из общего курса проектирования судов известно:

$$P_{г} = g_{г} (1 + k_{г}) N \frac{R}{\theta_1} = g_{г} (1 + k_{г}) \frac{\theta_1^2}{C_1} R_0 D_0^{2,1}, \quad (3.30)$$

где $g_{г}$ — удельный расход топлива;

θ_1 и C_1 — скорость и адмиралтейский коэффициент ходового режима, для которого задается дальность плавания под дизелями Я (обычно это экономический режим под РДП);

$k_{г} = 0,02$ — коэффициент, учитывающий неиспользуемые остатки топлива в цистернах.

Подставляя (3.29) и (3.30) в (3.24), получаем выражение для определения массы топливных цистерн.

$$P_{НТЦ} = \rho_{НТЦ} \frac{k_{пр} k_{НТЦ} (1 + k_{г})}{\rho_{г} C_1} \theta_1^2 R_0 N D_0^{2,1}. \quad (3.31)$$

Входящие в формулы (3.28) — (3.31) коэффициенты и измерители определяются по прототипам, ориентировочные значения некоторых из них приведены ниже

$$g_{ЦГБ} = 0,13-0,16 \text{ т/м}^3;$$

$$g_{НТЦ} = 0,20-0,22 \text{ т/м}^3;$$

$$k_{ЦГБ} = 1,05-1,10;$$

$$k_{НТЦ} = 1,03-1,05.$$

Масса прочих конструкций определяется по зависимости

$$P_{пр} = p_{пр} D_0 = (0,04 - 0,05) D_0, \quad (3.32)$$

Массу фундаментов можно уточнить уже на первом уровне детализации, если все фундаменты отнесены к группе "корпус", представив в виде двух слагаемых

$$P_{фк} = p_{ф} \sum_i N + p_{ф} D_0, \quad (3.33)$$

где $P_{0\sum N}$ — учитывает фундаменты под ЭУ и лево вала,

P_{0D_0} — учитывает фундаменты под механизмы и оборудование общесудового назначения и крепления.

На втором уровне детализации масс наружного корпуса рассчитываются массы, входящие в состав «прочие конструкции» (рис. 3.8).

Приближенные зависимости и измерители для определения масс конструкций, составляющих наружный корпус, приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Сводка приближенных формул для определения масс конструкций, составляющих наружный корпус

Наименование конструкции	Формулы для расчета массы	Измеритель массы
Легкие междубортные конструкции (МБ)	$P_{MB} = g_{MB} V_{MB}$ где g_{MB} — средняя величина по всем легким междубортным конструкциям	$g_{MB} = 0,13-0,15 \text{ т/м}^3$
Носовая оконечность (НОУ)	$P_{NOU} = g_{NOU} V_{NOU}^{0,75}$ или $P_{NOU} = g_{NOU} S_{NOU}$ где $V_{NOU} = \delta_{NOU} (bb)_{NOU}$ — объем бруска; S — площадь поверхности оконечности; $\delta_{NOU} = 0,55-0,60$ для алюминиевого типа; $\delta_{NOU} = 0,70$ для тела арки	$g_{NOU} = 1,15-1,40 \text{ т/м}^3$ $g_{NOU} = 0,22-0,28 \text{ т/м}^2$
Корпусная оконечность	$P_{KO} = g_{KO} V_{KO} + g_{KO} S_{KO} + P_{KO}$ или $P_{KO} = g_{KO} S_{KO} + g_{KO} S_{KO} + P_{KO}$ $\delta_{KO} = 0,5$ для стабилизирующего типа КО; $\delta_{KO} = 0,35$ для тела арки	$g_{KO} = 0,20-0,25 \text{ т/м}^3$ для стабилизирующей КО; $g_{KO} = 0,25-0,30 \text{ т/м}^3$ для тела арки
Надстройки	$P_{ND} = g_{ND} (V_{ND} + 2c_{ND})$ или $P_{ND} = g_{ND} S_{ND}$ где V_{ND}, c_{ND} — размеры надстройки	$g_{ND} = 0,06-0,08 \text{ т/м}^3$
Образованные выходящие устройства	$P_{OV} = g_{OV} V_{OV}^{0,75}$ или $P_{OV} = g_{OV} S_{OV}$ $S_{OV} = 0,60-0,70$ для выходящих ОВУ; $S_{OV} = 0,57-0,59$ для обычных ОВУ с вертикальным стеканием; $S_{OV} = 0,47-0,48$ для объемных ОВУ с наклонным стеканием	$g_{OV} = 0,90-1,10 \text{ т/м}^3$ $g_{OV} = 0,13 - 0,15 \text{ т/м}^2$

Измеритель g_j и масса кортюр P_{Kj} определяются по прототипам с аналогично выполненными конструкциями.

Если при определении массы кормовой оконечности площади стабилизаторов еще не выбраны, их можно оценить пересчетом с прототипа пропорционально $V_{NOU}^{0,75}$.

При выбранных площадях стабилизаторов и рулей массы данных конструкций можно определить с помощью измерителей, приведенных в табл. 3.3.

В формулах, содержащих объемы конструкций, последние могут быть вычислены с помощью строек по шпангоутам или определены приближенно с помощью коэффициентов полноты δ . Очевидно, что формулы, содержащие площади поверхностей S_j конструкций, требуют большого количества информации.

Размеры b и h для оконечностей определяются размерами наружного корпуса в плоскостях конечных переборок ПК, а длина l оконечностей отсчитывается от этих плоскостей.

Размеры $l_{ОВ}$ и $h_{ОВ}$ измеряются условно по середине высоты образования, считая от палубы надстройки.

Таблица 3.3

Измерители масс оперения подводной лодки

Наименование масс оперения	Измеритель	Размерность	Величина измерителя
Стабилизаторы	l_{CB}	т/м^2	0,30 - 0,45
Вертикальный руль с приводом	l_{VR}	т/м^2	0,90 - 1,05
Носовые горизонтальные рули с приводом	l_{HR}	т/м^2	1,50 - 1,60
Рубчатые горизонтальные рули с приводом	l_{HR}	т/м^2	0,68 - 0,80
Корпусные горизонтальные рули с приводом	l_{KR}	т/м^2	0,80 - 1,05

В подводном кораблестроении модификация проекта, представляющая дальнейшее развитие данного типа ПЛ, часто реализуется за счет увеличения длины ПК и ПЛ в целом при сохранении поперечных размеров корпуса, что обычно связано с ограничениями при постройке. В этом случае масса легких междубортных конструкций и надстройки изменится пропорционально длине ПК. Масса оконечностей при сохранении их внутреннего насыщения может рассматриваться приближенно как неизменная величина.

Уточнение массы межотсековых переборок на втором уровне детализации состоит в определении массы каждой переборки в соответствии с ее диаметром, расчетным давлением и конструктивным типом по формуле

$$P_{11} = g_{11} (P_r; d_n)^{\frac{\pi}{4}} d_n^2 \quad (3.34)$$

где d_n — диаметр переборки.

Измеритель g_{11} определяется на основании данных по выполненным однотипным переборкам ПЛ прототипов с пересчетом на данные проекта:

$$g_{11} = g_{11} \left(\frac{d_{11}}{d_{11}'} \right)^{\ell} \frac{P_r'}{P_r} \frac{\sigma_{11}}{\sigma_r} \quad (3.35)$$

где $\ell = 1/2 - 2/3$ — показатель степени, учитывающий влияние диаметра;

P_r' и P_r — расчетное давление для переборки.

Можно использовать результаты систематических расчетов прочности переборок с варьированием d_{11} и P_r , материала и других параметров, представленных на рис. 3.9 (для плоских переборок).

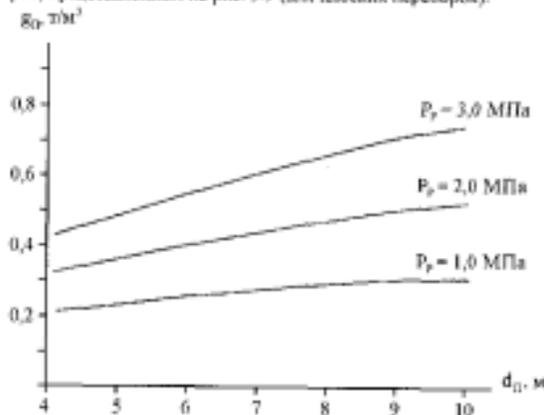


Рис. 3.9. Зависимость g_{11} от расчетной нагрузки и диаметра переборки

К расчетной массе переборок должны быть учтены надбавки на усиления и вырезы, определенные расчетом или по прототипу.

Уточнение масс легких внутренних конструкций может быть выполнено путем приближенного определения массы наиболее крупных внутренних штепселей и палуб по их известным объемам и площади. Так масса обшивки и набора легких штепселей, расположенных внутри прочного корпуса может быть определена с помощью измерителя $g_{12} = 0,18 - 0,19 \text{ т/м}^3$, а масса палуб через измеритель $g'_{12} = 0,04 - 0,09 \text{ т/м}^2$.

3.2. Нагрузка по группам "Судовые устройства, дельные вещи" и "Судовые системы"

Суммарная масса этих разделов нагрузки составляет примерно одинаковую долю нормального водоизмещения для ПЛ различного назначения:

$$P_{суд} = P_{суд} D_s = (0,08 - 0,09) D_s \quad (3.36)$$

Как видно на рис. 3.10, измеритель $P_{суд}$ слабо зависит от водоизмещения.

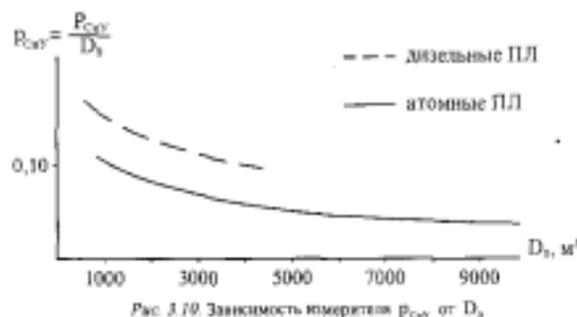


Рис. 3.10. Зависимость измерителя $P_{суд}$ от D_s

Поскольку прототипы, по материалам которых при проектировании определяют измеритель масс, не слишком отличаются по водоизмещению от описываемого в проекте, можно пренебречь влиянием водоизмещения на измеритель $P_{суд}$ и принимать его по прототипу без каких-либо пересчетов.

Детализация нагрузки по устройствам и системам состоит в раздельном определении масс наиболее крупных устройств и систем или их групп с одинаковым функциональным значением. Рассмотрим пример такой детализации.

Рулевые устройства (РУ). Для рулевых устройств целесообразно использовать модуль пересчета $D_0^{1/3} \delta_{\text{ру}}^2$ — величину, пропорциональную гидродинамическим силам, действующим на руль, где $\delta_{\text{ру}}$ — скорость водного хода.

Однако, статистика показывает, что более стабильным оказывается измеритель

$$P_{\text{ру}} = p_{\text{ру}} D_0 = (0,015 - 0,020) D_0 \quad (3.37)$$

Система сжатого воздуха и лаза (СВЛ). Представлена на подводных лодках тремя общекорабельными системами: воздуха высокого давления (ВВД), среднего давления (ВСД) и низкого давления (ВНД), а также специальными стрельбовыми воздушными системами торпедного и ракетного оружия. Массу данных систем можно считать пропорциональной водоизмещению

$$P_{\text{СВЛ}} = P_{\text{СВЛ}} D_0 = (0,022 - 0,027) D_0 \quad (3.38)$$

Главную часть нагрузки по системам СВЛ занимает система воздуха высокого давления (ВВД). Основное назначение системы ВВД — производство, хранение и раздача потребителям сжатого воздуха высокого давления. Для выполнения этих функций в систему ВВД включены воздушные баллоны, компрессоры, осушители воздуха, редукционные и предохранительные клапаны, фильтры, распределительные устройства и трубопроводы.

Если запас ВВД ($Q_{\text{ВВД}}$) известен, легко получить приближенную формулу для определения массы системы СВЛ:

$$P_{\text{ВВД}} = k_{\text{ВВД}} \cdot P_0 = k_{\text{ВВД}} \frac{Q_{\text{ВВД}}}{V_{\text{л}}} (P_{\text{л}} + P_{\text{л}}) \quad (3.39)$$

или

$$P_{\text{СВЛ}} = k_{\text{СВЛ}} k_{\text{ВВД}} \frac{Q_{\text{ВВД}}}{V_{\text{л}}} (P_{\text{л}} + P_{\text{л}}), \quad (3.39a)$$

где $k_{\text{СВЛ}}$ и $k_{\text{ВВД}}$ — коэффициенты, учитывающие массу остальных элементов систем;

$P_{\text{л}}$ и $V_{\text{л}}$ — масса одного стандартного баллона и его полезный объем;

$P_{\text{л}}$ — масса воздуха в баллоне.

Если в первом приближении положить

$$Q_{\text{ВВД}} = q_{\text{ВВД}} D_0, \quad (3.40)$$

где $q_{\text{ВВД}}$ — условная норма запаса ВВД на одну тонну водоизмещения, то, подстановка (3.40) в (3.39a), получим формулу, более точно выражающую связь $P_{\text{СВЛ}}$ с D_0 .

$$P_{\text{СВЛ}} = k_{\text{СВЛ}} k_{\text{ВВД}} \frac{q_{\text{ВВД}}}{V_{\text{л}}} (P_{\text{л}} + P_{\text{л}}) D_0. \quad (3.41)$$

Системы, обеспечивающие обитаемость — это системы вентиляции, регенерации, кондиционирования, воздухоочистки, а также санитарная и рефрижераторная, занимает примерно одинаковую долю с системами СВЛ.

$$P_{\text{СО}} = P_{\text{СО}} D_0 = (0,020 - 0,025) D_0. \quad (3.42)$$

Водные системы, к которым кроме общекорабельных относятся некоторые системы охлаждения и водные системы комплексов вооружения, занимает в нагрузке около 1% от водоизмещения.

$$P_{\text{ВС}} = (0,009 - 0,012).$$

Система вооружения и асбестная (ПВ) обеспечивает основное свойство ПЛ — способность погружаться и всплывать. К системе относятся кингстоны и клапаны вентиляции ЦГБ с приводами и трубопровод продувания ЦГБ воздухом низкого давления. Масса системы зависит от числа ЦГБ (косвенно от запаса плавучести) и количества кингстонных шестерн. Последний фактор влияет сильно, поэтому измеритель массы системы малостабилен:

$$P_{\text{ПВ}} = P_{\text{ПВ}} / D_0 = 0,005 - 0,009$$

Если общее количество ЦГБ и доля кингстонных шестерн установлены, то массу данной системы можно приближенно определять по формуле

$$P_{\text{ПВ}} = k_{\text{ПВ}} n_{\text{КШ}} (P_{\text{л}} \cdot \bar{n}_{\text{л}} + P_{\text{ПВ}}), \quad (3.43)$$

где $k_{\text{ПВ}}$ — коэффициент, учитывающий прочие элементы, входящие в систему;

$$n_{\text{КШ}} = 2n_{\text{ЦГБ}}^{\text{вспл}} + n_{\text{ЦГБ}}^{\text{погр}} — суммарное число ЦГБ на ПЛ;$$

$$\bar{n}_{\text{л}} = \frac{(n_{\text{КШ}})_{\text{л}}}{n_{\text{КШ}}} — относительное число кингстонных шестерн;$$

$P_{кв}$ и $P_{квн}$ — массы одного кингстона и одного клапана вентиляци, определяемые по прототипам или по предварительно выполненным частным проработкам.

Обычно эти конструкции стараются унифицировать, хотя бы в пределах корабля.

Системы гидравлики. В связи с увеличением степени автоматизации процессов управления большое развитие на современных ПЛ получают системы гидравлики. Гидравлические приводы применяют в схемах управления энергетической установкой, рулевым устройстве, системе погружения и всплытия, для открывания крышек торпедных аппаратов, ракетных шахт и т.д. Данные системы занимают в нагрузке примерно 0,4—0,6% от водоизмещения.

3.3. Нагрузка по группе "Механическое оборудование, трубопроводы и системы энергетических установок"

Масса энергетической установки связана с ее мощностью зависимостью

$$P_{ЭУ} = p_{ЭУ} N \quad (3.44)$$

где $p_{ЭУ}$ — измеритель массы ЭУ (удельная масса);

N — мощность установки, кВт.

На рис. 3.11 представлена тенденция изменения соотношения мощностей двигателей для надводного и подводного хода за последние 50 лет. [40], [50].

Удельная масса зависит от многих факторов, в том числе и от мощности N , при увеличении которой удельная масса однотипных ЭУ убывает, что объясняется наличием в составе установки элементов, слабо реагирующих на изменение мощности [19], [73].

Мощность ЭУ на ранней стадии определяют, как правило, по формуле адмиралтейских коэффициентов.

$$N_1 = \frac{\rho^2 D_1^{2,5}}{C_1} \quad (3.45)$$

При этом каждому режиму плавания в зависимости (3.45) должны соответствовать свои значения водоизмещения, скорости и адмиралтейского коэффициента. С целью уменьшения количества неизвестных, обычно для всех режимов плавания все мощности относятся к нормальному водоизмещению, что не совсем корректно. Следует также помнить, что эта формула приближенная и, строго говоря, справедлива для геометрически подобных тел при прочих допущениях.

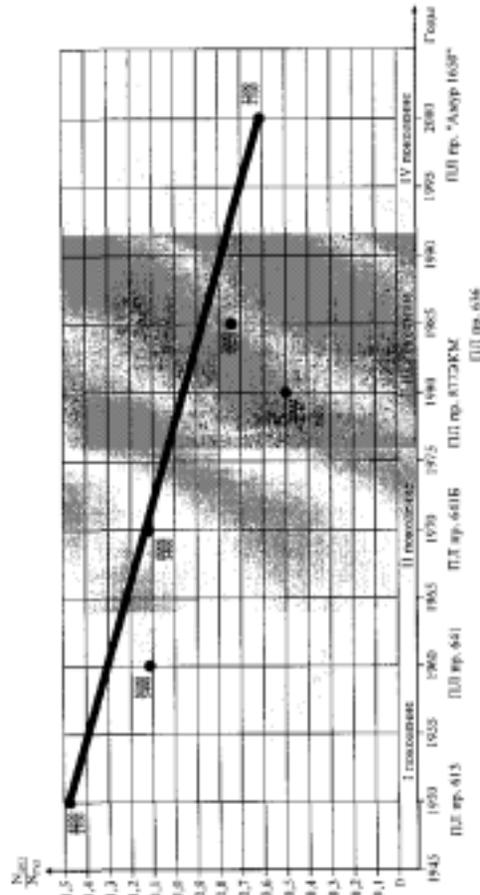


Рис. 3.11. Тенденция изменения соотношения мощностей дизеля и гребного электродвигателя (ДПД) в подводных лодках

Примечание. По графику видно, что мощность дизель-генератора на ПЛ проекта 877-ЖМ возрастает, что является в условиях крепкого корпуса АБ и стальной шлюз ПЛ при ее погружении. Такое явление было обнаружено в 43-м (887) серии дизель-генератора необходимой мощности. На ПЛ проекта 636, который является развитием проекта 877-ЖМ установка была меньшей ДГ.

При этом точность определения мощности зависит от правильного выбора адмиралтейского коэффициента C_1 , величина которого является функцией многих параметров и характеристик.

Отсюда следует, что выбор адмиралтейского коэффициента нужно проводить очень осторожно. Даже при наличии прототипа, близкого по архитектурному типу к проектируемой ПЛ, следует правильно проводить его пересчет на проект.

Для представления о порядке величины адмиралтейского коэффициента ПЛ в различных режимах плавания в табл. 3.4 приведены статистические данные по C_1 , при этом для плавания в подводном положении значение адмиралтейского коэффициента можно считать практически не зависящими от скорости, поскольку в этом случае коэффициент полного сопротивления (как будет показано далее) слабо зависит от числа Рейнольдса (Re), а, следовательно, и от скорости хода корабля [31], [50].

Таблица 3.4

Статистические значения адмиралтейского коэффициента C_1

Форма обшивки	Режим плавания	Скорость в режиме, уз	C_1
Штормовая	Полный подводный ход	12,0—16,0	85—100
		16,0—19,0	150
	Экономический подводный ход	2,0—3,0	40—60
		Режим РДП (РКП)	7,0—8,0
Тело вращения	Полный подводный ход	Максимальный подводный ход	12—16
		16—21	250—360
	Экономический подводный ход	3—4	40—60
		Режим РДП (РКП)	7—10
Максимальный подводный ход	10—12	140—150	

Адмиралтейский коэффициент определяет мощность, требуемую на ход ПЛ. Мощность на питание общекорабельных потребителей учитывается введением абсолютной (ΔN) или как будет показано ниже, относительной надбавки к мощности, затрачиваемой на ход (3.45).

Дизельная (дизель-генераторная) установка

При известной мощности можно провести детализированный расчет массы ЭУ по основным составляющим компонентам. В табл. 3.5 приведены основные компоненты и распределение масс ЭУ дизель-электрической ПЛ в соответствии с проектной разбивкой масс.

Таблица 3.5

Распределение масс ЭУ дизель-электрической ПЛ

Наименование	Обозначение	Процент от $P_{ЭУ}$
Дизельная установка	$P_{ДУ}$	14,3
Гребная электрическая установка	$P_{ГЭУ}$	8,2
Валетровод	$P_{ВЭУ}$	4,5
Итого главные двигатели и валетровод (грубо на 400)	$P_{ДУ} + P_{ГЭУ} + P_{ВЭУ}$	27,0
Аккумуляторная установка	$P_{АУ}$	37,0
Топливное и масло (нормальный запас)	$P_{ТМ}$	36,0
Итого аккумуляторы	$P_{АУ} + P_{ТМ}$	73,0
Итого ЭУ	ΣP_i	100

Удельная масса всей ЭУ в перечисленном выше составе для большой ДЭПЛ при нормальном запасе топлива, отнесенная к мощности ЭУ подводного хода (ГЭУ), составляет $p_{ЭУ} = 200$ кг/кВт. Без учета запаса топлива и масла $p_{ЭУ} = 135$ кг/кВт. В табл. 3.6 приведены основные характеристики энергетических установок российских дизель-электрических подводных лодок [3], [40], [41], [42], [44], [73].

Основные характеристики энергетических установок российских атомно-энергетических подводных лодок

Параметры установки	I поколение			II поколение		III поколение		IV поколение
	615	611	641	641Б	636	877/83М	636	636М*
Тип активной гонимой цели	37Д	37Д	37Л	2Д12	7-2Д12	4-2Д14/3М	7-2Д12	7-2Д12
Количество активных элементов частотной обшивки	2x2000 д.э. 500	2x2000 д.э. 500	2x2000 д.э. 500	2x1900 д.э. 500	2x1500 дБз 750	2x1500 дБз 750	2x1750 дБз 750	2x1250 дБз 900
Тип генераторов	-	-	-	-	ПГ-167	ПГ-142	ПГ-167	ПГ-167М
Тип дельта-генераторов	-	-	-	-	-	ДГ-4ТТ	30ДГ	28ДГ (перестраиваемого тона)
Тип ГЭД	ПГ-100	ПГ-101 (бортовые) ПГ-102 (средние)	ПГ-101 (бортовые) ПГ-102 (средние)	ПГ-101 (бортовые) ПГ-102 (средние)	ПГ-166	ПГ-141	ПГ-166	ПГ-165

Бродячий китовый须鲸, 3.6

Параметры установки	I поколение			II поколение		III поколение		IV поколение
	613	611	641	641Б	636	877/83М	636	636М*
Количество ГЭД x мачт/обшивки	2x1350 д.э. 420	2x1320 д.э. 440 (бортовые) 15x700 д.э. 540 (средние)	2x1350 д.э. 440 (бортовые) 15x700 д.э. 540 (средние)	2x1350 д.э. 440 (бортовые) 15x700 д.э. 540 (средние)	2x1000 дБз 500	2x1000 дБз 500	2x1000 дБз 250	2x1100 дБз 200
Тип ЭД донного-всплывающего модуля	ПГ-100	ПГ-104	ПГ-104	ПГ-104	ПГ-166	ПГ-140	ПГ-166	СЭД-1 восстановительный
Количество ЭД вспомогательного модуля x мачт/обшивки	2x20 д.э. 150	3x140 д.э. 185	3x140 д.э. 185	3x140 д.э. 185	3x95 дБз 70	3x95 дБз 70	3x95 дБз 70	СЭД-1 восстановительный
Количество грабительских ЭД	2	3	3	3	1	1	1	1
Тип ЭД резервного двигателя	-	-	-	-	ПГ-168	ПГ-168	ПГ-168	погружной ЭД

Продолжение табл. 3.6

Параметры установки	I поколение		II поколение	III поколение		IV поколение
	613	611		641	877/8М	
Количество АД резерв двигателя	-	-	-	2x25,4Вт 650	2x25,4Вт 650	2x15,4Вт 500
Число агрегатов, об/мин	-	-	-	-	-	-
Количество резервных агрегатов	-	-	-	2	2	2
Тип АБ	46СУ	46СУ	46СУ	446	446	476
Количество групп АБ и количество агрегатов в группе, шт.	2x112	4x112	4x112	2x120	2x120	2x120
Периоды дальности плавания, мин.	230 2	440 2	450 2	400 3	480 3	650 3
Средства ул.						

Продолжение табл. 3.6

Параметры установки	I поколение		II поколение	III поколение		IV поколение
	613	611		641	877/8М	
Дальность плавания в режиме РДП, мин.	450 8	1100 8	1800 8	600 7	290 7	600 7
Периоды дальности плавания, мин.	850 10	2100 9	3000 8	88	88	88
Средства ул.						

* Прибытие

** На ДЭИД III и IV поколениях дальность плавания в автономном режиме не регламентируется.

На современных ДЭУВ встречаются дизельные установки (ДУ) с механической передачей мощности на гребной вал (непосредственно или посредством редуктора), смешанные установки, когда наряду с дизелин, имеющими механическую связь с гребными валами, установлены вспомогательные дизель-генераторы и дизель-генераторные установки (ДГУ) с электрической передачей мощности на вал, осуществляющие схему чистого электродвижения (рис. 3.12).

Дизельная (дизель-генераторная) установка должна обеспечивать следующие режимы:

- ход в режиме РДП и заданном положении с заданными скоростями;
- зарядку АБ на ходу в режиме РДП и заданном положении;
- продувание ЦГВ выхлопными газами дизелей при всплытии из позиционного положения;
- питание общекорабельных потребителей в этих режимах.

Режимами, определяющими потребную мощность ДУ (ДГУ), являются экономический ход в режиме РДП или в заданном положении при одновременной зарядке аккумуляторной батареи (жилательного тока 1-й ступени).

В обоих случаях должно быть обеспечено питание общекорабельных потребителей.

Потребная мощность ДУ (ДГУ) в режиме хода и одновременно зарядки АБ может быть представлена в виде

$$N = N_x + N_{зар} + N_{ок} + N_{пот} \quad (3.46)$$

где N_x — мощность, потребная для осуществления хода;

$N_{зар}$ — мощность, необходимая для зарядки АБ;

$N_{ок}$ — мощность для питания общекорабельных потребителей;

$N_{пот}$ — мощность на потери в кабелях и тросах (КПД установки).

Мощность, потребную для зарядки АБ, можно выразить следующим образом:

$$N_{зар} = I_1 U_1 10^3 n_{АБ} \quad (3.47)$$

где U_1 — напряжение, подаваемое при зарядке на один аккумулятор ($U = 2,4$ В для свинцово-кислотных аккумуляторов и $U = 2,05$ В для серебряно-цинковых);

I_1 — сила зарядного тока;

$n_{АБ}$ — общее количество аккумуляторов (112 и более — для свинцово-кислотных, 152 — для серебряно-цинковых).

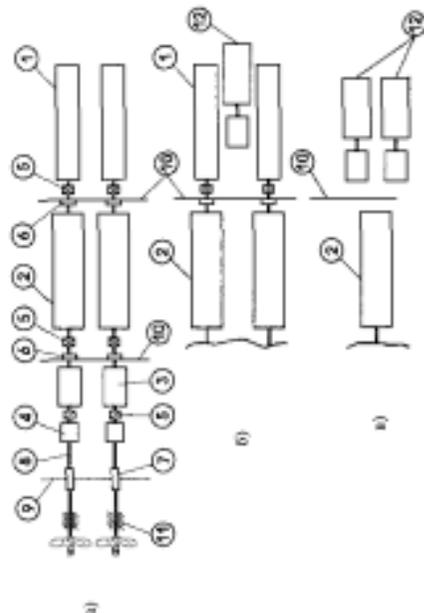


Рис. 3.12. Схема 3У дизель-электрических ПД

а) дизельная установка, б) дизель-генераторная установка.

1 — дизель, 2 — главный гребной электродвигатель, 3 — электродвигатель вспомогательного вала, 4 — зарядный полувальчик, 5 — муфта, 6 — лебедочные элементы, 7 — лебедочные элементы, 8 — вал-шестерня, 9 — проточный корпус (для колесных лебедок), 10 — многоточечные потребители, 11 — корпус шестерни, 12 — дизель-генератор.

В начальной стадии проектирования непосредственный расчет величин $N_{ок}$ и $N_{отт}$ не может быть выполнен, так как требуется детальная информация по проекту. Поэтому представим $N_{отт}$ в относительном виде:

$$\alpha_{отт} = \frac{N_{отт}}{N_{греб} + N_{ок}}, \quad (3.48)$$

где $\alpha_{отт}$ — коэффициент, учитывающий потери в кабелях и трассах;

$N_{греб}$ — мощность гребных электродвигателей;

$\eta_{греб}$ — КПД электродвигателей

и предположим, что величина $N_{ок}$ для одновитных ПЛ изменяется по зависимости

$$N_{ок} = \alpha_{ок} D_{от}^{21} = \alpha_{ок} \frac{1}{k_{от}^{35}} D_{от}^{20}, \quad (3.49)$$

где $\alpha_{ок}$ — коэффициент, учитывающий потребляемую мощность на общекорабельные нужды;

$k_{от}$ — коэффициент, связывающий нормальное и полное подводное водоизмещение.

Пологая функции хода и зарядки распределенными между отдельными двигателями таким образом, что их мощность используется полностью, получим зависимости для определения суммарной номинальной мощности ДУ (ДГУ) из условий хода и зарядки одновременно.

1. В режиме РДП, переключенное положение:

а) дизельная установка, ход под дизелем:

$$N_{дв} = \alpha_{дв} \left[\frac{\partial_{дв}^{21}}{C_{дв}} + (J_1 U_1 \cdot 10^{-3} n_{дв} + \frac{R_{дв}}{\eta_{дв} k_{дв}^{35}}) \chi + \alpha_{отт} \right] D_{дв}^{21} = \beta_1 D_{дв}^{21}, \quad (3.50)$$

б) дизель-генераторная установка, ход под ЭД экономического хода:

$$N_{дг} = \alpha_{дг} \left[\frac{\partial_{дг}^{21}}{C_{дг} \eta_{дг} \alpha_{дг}} + (J_1 U_1 \cdot 10^{-3} n_{дг} + \frac{R_{дг}}{k_{дг}^{35}}) \chi + \alpha_{отт} \right] D_{дг}^{21} = \beta_2 D_{дг}^{21}, \quad (3.51)$$

где $N_{дг}$ — выходная мощность дизель-генератора;

$\alpha_{дг}$ — численный коэффициент, принимаемый по прототипу;

β_1 — коэффициент, связывающий мощность установки с водоизмещением в формулах (3.50)—(3.52).

2. Надводное положение:

дизельная установка, ход под дизелем:

$$N_{дв} = \frac{\partial_{дв}^{21}}{C_{дв}} D_{дв}^{21} + (J_1 U_1 \cdot 10^{-3} n_{дв} D_{дв}^{21} + \frac{R_{дв}}{\eta_{дв}} D_{дв}^{21} \chi + \alpha_{отт}) = \left[\frac{\partial_{дв}^{21}}{C_{дв}} \left(\frac{k_{дв}}{k_{дв}^{35}} \right)^{1/2} + (J_1 U_1 \cdot 10^{-3} n_{дв} + \frac{R_{дв}}{\eta_{дв} k_{дв}^{35}}) \chi + \alpha_{отт} \right] D_{дв}^{21} = \beta_1 D_{дв}^{21} \quad (3.52)$$

В формулах (3.50)—(3.52) $\eta_{дв}$ — КПД гребных электродвигателей в генераторном режиме.

Следует иметь в виду, что коэффициенты $\alpha_{ок}$ и $\alpha_{отт}$ для различных режимов, определяемых зависимостями (3.50)—(3.52), могут быть различны.

Мощность, необходимая на зарядку аккумуляторных батарей, принятых для обеспечения заданных параметров подводного плавания и общекорабельные нужды, а также мощность на потери в кабелях и трассах определяет в дизельных установках мощность гребных электродвигателей в генераторном режиме.

$$(N_{дв} + N_{ок} \chi + \alpha_{отт}) = (J_1 U_1 \cdot 10^{-3} n_{дв} + \frac{R_{дв}}{\eta_{дв} k_{дв}^{35}}) \chi + \alpha_{отт} D_{дв}^{21}. \quad (3.53)$$

Она должна быть согласована с мощностью электродвигателей в двигательном режиме. Следует учитывать, что электродвигатели допускают в генераторном режиме повышение мощности примерно на 40% по сравнению с мощностью в двигательном режиме, т.е.

$$N_{дв} \leq 1,4 N_{дв}. \quad (3.54)$$

Если $N_{дв} > 1,4 N_{дв}$, то следует соответственно увеличить мощность в двигательном режиме (применить в проекте ЭД большей мощности) либо установить вспомогательный дизель-генератор.

Используя полученные выше выражения для мощности, можем получить формулу для приближенного определения массы ДУ (ДГУ):

$$P_{ДУ(ДГУ)} = P_{ДУ(ДГУ)} N_{ДУ(ДГУ)} = k_{ДУ(ДГУ)} \beta_1 R_{дв} D_{дв}^{21}, \quad (3.55)$$

где $k_{ДУ(ДГУ)}$ — коэффициент массы установки (для установок с действующими дизелями $k_{ДУ(ДГУ)} = 1,8—2,0$);

$\rho_{\text{ДГЭ}}$ — средняя по установке удельная масса собственно дизелей (дизель-генераторов) и сборе;

Гребная электрическая установка должна обеспечивать все ходовые режимы в подводном положении и зарядку АБ в надводном положении, если дизели имеют механическую связь с валопроводом. Электродвигатели в этом случае полностью или частично работают в генераторном режиме. В случае применения на подводной лодке схемы чистого электродвижения указанные выше режимы обеспечиваются дизель-генератором.

Полагая, что мощность гребных электродвигателей определяется заданной скоростью полного подводного хода, и используя общую зависимость (3.44), получим формулу для приближенного определения массы гребной электрической установки:

$$P_{\text{ГЭУ}} = P_{\text{ГЭУ}} \sum N_{\text{ГЭД}} = k_{\text{ГЭУ}} V_{\text{ГЭД}} \frac{\theta_{\text{ГЭД}}^{\text{max}} D_{\text{ГЭД}}^{\text{D}}}{C_{\text{ГЭД}}}, \quad (3.56)$$

где $V_{\text{ГЭД}}$ — средняя удельная масса собственно ГЭД, зависящая от типа, частоты вращения и агрегатной мощности электродвигателей, входящих в установку;

$k_{\text{ГЭУ}} = 1,25-1,32$ — коэффициент, учитывающий массу гребных электродвигателей экономического хода и дополнительного оборудования установки (воздухоохладители, вентиляторы ГЭД и пр.);

Масса валопровода рассчитывается по мощности, соответствующей режиму полного подводного хода:

$$P_{\text{ВВЛ}} = P_{\text{ВВЛ}} N_{\text{ГЭД}} = P_{\text{ВВЛ}} \frac{\theta_{\text{ВВЛ}}^{\text{max}} D_{\text{ВВЛ}}^{\text{D}}}{C_{\text{ВВЛ}}}, \quad (3.57)$$

где $P_{\text{ВВЛ}} = 4,0-4,5$ кг/кВт — удельная масса валопровода, отнесенная к наибольшей передаваемой мощности.

Если известна частота вращения гребного вала и длина валопровода, то его масса может быть также пересчитана по формуле

$$P_{\text{ВВЛ}} = P_{\text{ВВЛ}} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{L}{L_0} \right)^{\alpha_2} \left(\frac{L_{\text{ВВЛ}}}{L_0} \right), \quad (3.58)$$

где N_0, L_0 — частоты вращения гребного вала корабля-прототипа и проектируемой ПЛ;

$L_{\text{ВВЛ}}, L_{\text{ВВЛ}}$ — соответствующие длины гребного вала.

Аккумуляторная установка (АУ) включает аккумуляторную батарею (АБ), раскладку и соединение элементов, устройства для по-

грузки и обслуживания, системы механического перемешивания электролита, вентиляция и кондиционирования воздуха аккумуляторных ям, водного охлаждения АБ.

Для определения массы АБ и перем приближенно обычно используют удельный съем энергии $\Delta \mathcal{E}$ (кВтч/т), показывающий, сколько киловатт-часов электроэнергии можно снять с одной тонны массы аккумулятора в заданном режиме разрядки. На рис. 3.13 показан характер кривых $\Delta \mathcal{E}(t)$ для свинцово-кислотных (кривая 1) и серебряно-цинковых (кривая 2) аккумуляторов [24], [106].

Если известны разрядные характеристики аккумулятора — сила тока $i(t)$ и среднее напряжение $U_{\text{ср}}(t)$, то удельный съем энергии определяется по формуле

$$\Delta \mathcal{E}(t) = \frac{J(t) \cdot U_{\text{ср}}(t) \cdot t \cdot 10^{-3}}{P_{\text{АБ}}}, \quad (3.59)$$

где t — время разрядки, ч;

$P_{\text{АБ}}$ — масса одного аккумулятора, определяемая по ТУ, т.

Формула для определения массы аккумуляторной установки в общем виде может быть записана следующим образом:

$$P_{\text{АУ}} = k_{\text{АУ}} k_{\text{АБ}} P_{\text{АБ}} = k_{\text{АУ}} k_{\text{АБ}} \frac{\mathcal{E}}{\Delta \mathcal{E}}, \quad (3.60)$$

где $k_{\text{АУ}} = 1,15-1,20$ — коэффициент, учитывающий массу установки;

$k_{\text{АБ}} = 1,02-1,03$ — коэффициент, учитывающий массу дистиллята для доливки аккумуляторов.

Для ДЭПЛ аккумуляторная батарея является единственным источником энергии в подводном положении (в данном случае не рассматриваются анаэробные установки), обеспечивающим заданные ГТЗ скорости и дальности плавания, а также всех прочих потребностей электроэнергией.

Общее выражение для потребной энергии АБ может быть представлено как

$$\mathcal{E} = (N_{\text{А}} + N_{\text{ок}} + N_{\text{пот}}) t, \quad (3.61)$$

где $N_{\text{А}} = \frac{N_{\text{ГЭД}}}{\eta_{\text{ГЭД}}}$ — мощность АБ для обеспечения хода;

$N_{\text{ок}}$ и $N_{\text{пот}}$ — мощности на общекорабельные нужды и потери, определяемые по (3.48) и (3.49);

$t = \frac{R_i}{\theta_i}$ — время подводного хода в рассматриваемом режиме.

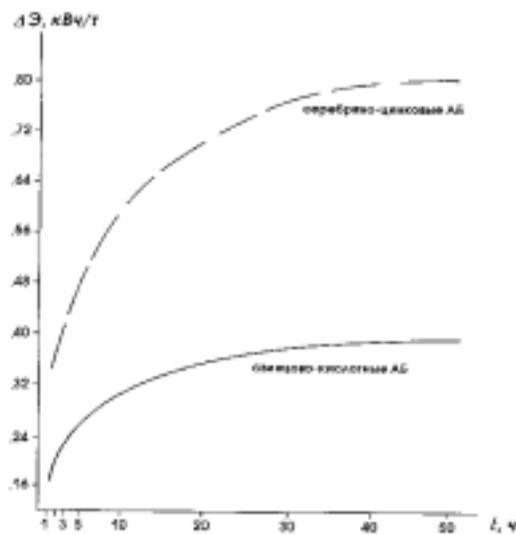


Рис. 3.13. Зависимость удельного энергозатрата от времени разряда

С учетом этих соотношений и зависимости (3.56) выражение для потребной энергии принимает вид

$$\mathcal{E} = \left(\frac{R_i}{C_i \sigma_{\text{ГЭУ}}} + \frac{g_{\text{ЭЭ}}}{k_{\text{ЭЭ}}^2} (1 + \alpha_{\text{ЭЭ}}) \right) D_{\text{ГЭУ}}^2 \quad (3.62)$$

Подставляя (2.62) в (2.60) и учитывая, что АБ должна обеспечивать дальность плавания для всех указанных в задании ходовых режимов (обычно это полный подводный в течение 1 часа и длительный экономический ход со скоростью 2—3 узла), получим формулу для определения массы АУ.

$$P_{\text{АУ}} = k_{\text{ЭЭ}} k_{\text{А}} (P_{\text{АБ}})_{\text{ГЭУ}} = k_{\text{АУ}} k_{\text{А}} \left[\frac{\theta_i'}{C_i \sigma_{\text{ГЭУ}}} + \frac{g_{\text{ЭЭ}}}{k_{\text{ЭЭ}}^2} (1 + \alpha_{\text{ЭЭ}}) \right] \frac{t_i}{\Delta \mathcal{E}_{\text{АУ}}} D_{\text{ГЭУ}}^2 \quad (3.63)$$

где i — индекс ходового режима.

Определив массу АУ для оговоренных ходовых режимов, принимаем для дальнейших расчетов максимальное ее значение. Значение $\Delta \mathcal{E}_{\text{АУ}}$ в формуле (3.63) находится по техническим условиям аккумуляторов, намеченных к установке на проектируемой ПЛ.

Масса топлива и масла рассчитывается по формуле

$$P_{\text{то}} = g_{\text{т}} k_{\text{м}} k_{\text{т}} \frac{\theta_{\text{ГЭУ}}^2}{C_{\text{ГЭУ}}} R_{\text{ГЭУ}} D_{\text{ГЭУ}}^2 \quad (3.64)$$

где $g_{\text{т}} = 0,20 - 0,22$ кг/кВтч — удельный расход топлива в режиме РДП;

$k_{\text{м}} = 1,04 - 1,07$ — коэффициент, учитывающий массу запаса

$k_{\text{т}} = 1,15 - 1,02$ — коэффициент, учитывающий остатки топлива в цистернах.

Ядерная энергетическая установка

При выбранном типе ППУ и конструктивно-технологическом принципе выполнения ГЭУ удельная масса установки $P_{\text{ГЭУ}}$ зависит от:

- мощности ГЭУ;
- принципиальной схемы ГЭУ, в частности, от формулы установки (число реакторов — число ГТЗА — число гребных валов);
- компоновки установки в корпусе ПЛ;
- частоты вращения гребного вала;
- номенклатуры вспомогательного оборудования.

В подводном кораблестроении, как правило, применяются ППУ водо-водяного типа, поэтому все дальнейшее изложение приводится применительно к этому типу установок.

На рис. 3.14 приведена принципиальная схема главной энергетической установки АПЛ [10].

Распределение массы
ядерной энергетической установки

Наименование	Удельная масса, кг/кВт	Процент от $P_{ГЭУ}$
ПГУ без блока ЖВЗ	21,0—24,0	44,0—45,0
ПГУ + ПГУ	11,0—10,0	22,0
Блок ЖВЗ и фундаменты ПГУ	6,0—7,0	13,0
Резервные ГЭД	1,0	—
Высоковольты с двигателями	2,0	8,0
ДГУ	1,0	—
Итого по группе 400	41,0—46,0	88,0
Аккумуляторная установка	4,5	9,0
Зачем по энергетическим	1,5	3,0
ЯЭУ в целом	45,0—52,0	100

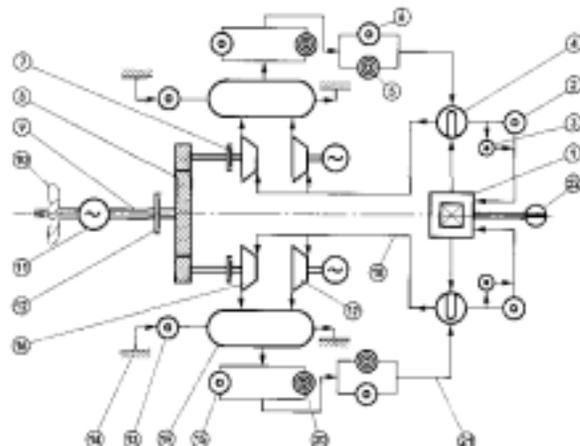


Рис. 3.14. Принципиальная схема ГЭУ АПЛ

1 — ядерный реактор, 2 — главный циркуляционный насос являющегося контура; 3 — фидер, 4 — прерыватель, 5 — вспомогательный питательный насос; 6 — главный питательный насос; 7 — разбрызгиватель нефти; 8 — реактор; 9 — линия вала; 10 — треногий вал; 11 — треногий электродвигатель; 12 — разбрызгиватель нефти; 13 — циркуляционный насос главного конденсатора; 14 — проточный корпус; 15 — главный конденсационный насос; 16 — главный турбин; 17 — автоматический турбогенератор; 18 — главный высоковольт; 19 — главный конденсатор; 20 — вспомогательный конденсационный насос; 21 — трубчатый питательный насос; 22 — конденсатор обмена.

Соотношения между массами составляющих компонентов ядерной энергетической установки приведены в табл. 3.7 [10], [18], [26], [71].

Удельные массы компонентов ГЭУ в табл. 3.6 отнесены к мощности на валу.

Зависимость полной массы ЯЭУ от водонамещения может быть представлена в виде

$$P_{ГЭУ} = P_{ГЭУ} N = P_{ГЭУ} \frac{\partial^3}{C} D_{191}^{2,7} = k_0 k_{ГЭУ} P_{ГЭУ} \frac{\partial^3}{C} D_{191}^{2,7}, \quad (3.65)$$

где величины N , ∂ , C соответствуют полному подводному ходу.

Информация по массогабаритным характеристикам часто сравнивается только ГЭУ и, как правило, не учитывает фундаменты и вспомогательные компоненты установки.

В зависимости (3.65) введены коэффициенты: $k_0 = 1,20$, учитывающий массу фундаментов, и $k_{ГЭУ} = 1,20—1,25$, учитывающий массу вспомогательных компонентов установки.

На рис. 3.15 представлена зависимость удельной массы от мощности установки [10], [26], [71].

Массы вспомогательных компонентов могут быть определены более точно, исходя из потребной величины их собственных мощностей или энергии.

Масса резервных гребных электродвигателей (РГЭД) определяется по общей формуле (3.56):

$$P_{РГЭД} = P_{ГЭУ} N_{РГЭД},$$

где $P_{РГЭД}$ — удельная масса, отнесенная к собственной мощности двигателя.

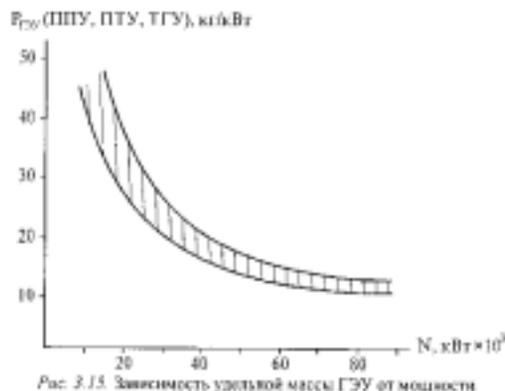


Рис. 3.15. Зависимость удельной массы ГЭУ от мощности

Необходимая энергия АБ на АПЛ определяется требованиями:

- расхолаживания ПТУ в случае ее остановки в море и последующего пуска;
- питания минимально необходимого количества обшкоробатывших потребителей в течение перерыва в работе ПТУ;
- обеспечения хода с минимально допустимой по условиям управляемости скоростью.

Если учесть потери и предположить, что энергия, обеспечивающая первое требование, зависит от N , а второе и третье — от водоизмещения, то можно записать:

$$E_{AB} = \left[(a_{AB}^1 N^2) t^1 + (a_{AB}^2 D_0^{0.75}) t^2 \right] (1 + \sigma_{ГЭУ}), \quad (3.66)$$

где a_{AB}^1 и a_{AB}^2 — коэффициенты, связывающие потребную энергию АБ с мощностью ГЭУ и водоизмещением ПЛ;

$t^{1,2}$ — замеченная продолжительность использования АБ в режимах расхолаживания, пуска и ремонтного прогрева с учетом хода и питания потребителей.

Аккумуляторная батарея АПЛ должна быть скомплектована из групп со стандартным числом элементов. Число групп определяется потребной энергией АБ. По соображениям живучести желательно, чтобы это число было не меньше двух. Масса аккумуляторной уста-

новки при известной величине потребной энергии АБ определяется по формуле (3.63), очень приблизительно $P_{AB} = (0,10 - 0,15) P_{ГЭУ}$.

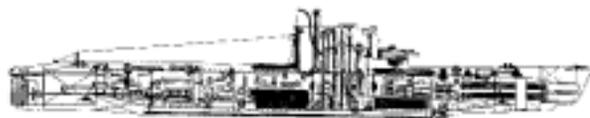
Массы запасов жидкой воды и масла для ГЭУ должны обеспечить однократную, полную заправку при одновальной установке или одной автономной группе движения двухвальной установки. При близких мощностях и однотипных установках величина запасов может быть принята по прототипу абсолютной массой.

Отметим, что полученные зависимости $P_i(D_{AB})$ могут быть использованы для определения массы ЭУ в самом первом приближении по найденной величине водоизмещения, т.е. учитывают наиболее крупные составляющие установки. Определенная таким образом масса ЭУ должна быть уточнена с учетом конкретизации принципиальной схемы установки в целом (выбора конкретных двигателей, числа гребных валов и распределения мощности между ними, а также комплектации АБ из стандартных групп).

Анаэробные энергетические установки

В заключение рассмотрим еще один тип энергетических установок, который в настоящее время разрабатывается как в России, так и во многих странах мира - анаэробных ЭУ (функционирующих без доступа атмосферного воздуха) для неавтоных подводных лодок водоизмещением от 1000 до 3000 тонн; при большем водоизмещении во всех случаях оптимальной представляется атомная энергетическая установка. Идея создания такого двигателя не нова. В России еще в 1912 году инженером Никольским была предложена схема работы двигателя внутреннего сгорания по замкнутому циклу с обеспечением кислородного питания. Возможность осуществления этой схемы была подтверждена тогда же на стенде Балтийского завода. Практические работы над ПЛ с единым для надводного и подводного хода двигателем были завершены у нас в стране в 30-х годах под руководством С.А.Вазилевского [38], а сразу после Великой Отечественной войны была построена большая серия подводных лодок проекта 615 (рис.3.16).

В 1943 году немецкие конструкторы работали над проектом подводной лодки (XXVI серия) оснащенной турбиной Вальтера в качестве форсажной установки для подводного хода, а в 1951 году в СССР была построена подводная лодка проекта 617 с аналогичной установкой (рис. 3.17).



Основные тактико-технические характеристики

Площадь стреловидного подводного гонимого корпуса, г/см	993-1280
Объемные подводных гонимого гонимого, м ³	30
Площадь водоизмещения, м ²	405
Полный размерный м:	
длина	66,8
ширина	4,5
Предельная глубина погружения, м	120
Мощность движущей установки, л.с.	3 х 800
Полная подводная скорость, узл.	18
Полная подводная скорость, узл.	15
Дальность подводного плавания полной подводной скоростью, миль	56
Дальность подводного плавания экономичной скоростью, миль	380
Автономность подводного плавания, сутки	4
Автономность, сутки	13
Медной скорости, т	8,5
Хранитель топлива, т	15

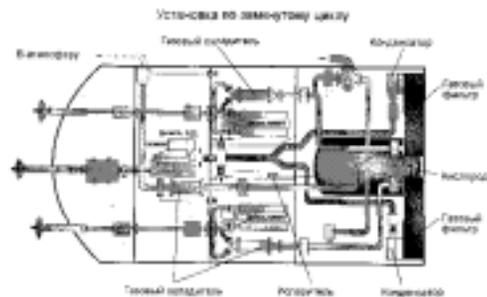


Рис. 3.16. Подводная лодка проекта А615 с одним двигателем для подводного и надводного хода



Основные тактико-технические характеристики

Площадь стреловидного подводного гонимого корпуса, г/см	1991-1912
Объемные водоизмещения, м ³	950
Полный размерный м:	
длина	67,2
ширина	5,08
Предельная глубина погружения, м	280
Мощность паровой турбины, л.с.	1200
Полная подводная скорость, узл.	11
Полная подводная скорость, узл.	20
Дальность подводного плавания полной подводной скоростью, миль	120
Дальность подводного плавания экономичной скоростью, миль	132
Автономность подводного плавания, сутки	8
Автономность, сутки	48
Паровой двигателя, т	163,4
Запас топлива, т	53,8



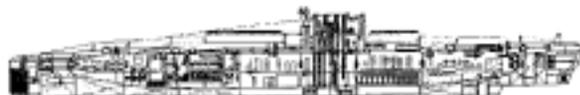
Рис. 3.17. Подводная лодка проекта Б17 с паровой установкой

В 1988 году проводятся морские испытания подводной лодки проекта 613Э электрохимическими генераторами (рис.3.18) [43], [46], [78].

Новый виток активных работ по созданию газозабросных двигателей, использующихся в качестве вспомогательной (дополнительной) установки подводных лодок происходит на качественно новом уровне науки и техники. Есть несомненные успехи в создании дизелей, работающих по замкнутому циклу (Россия, Германия, Голландия, Англия, Италия), двигателей Стирлинга (Швеция), газодинамических турбин (Франция), установок с электрохимическими генераторами (Россия, Германия). На рис. 3.19. приведена схема отсека энергетической установки с электрохимическими генераторами Российской подводной лодки.

В ряде зарубежных работ [100] и в отечественных проектных исследованиях [57] показано, что размещение такой вспомогательной установки в отдельном отсеке вызывает незначительный рост водоизмещения и некоторое снижение скорости полного подводного хода, но позволяет в несколько раз увеличить дальность подводного плавания на экономическом ходу в пансовом режиме без расхода энергии аккумуляторных батарей (рис. 3.20).

Вместе с тем каждый тип двигателя имеет свои преимущества, ставит проблемы при проектировании подводной лодки и неизбежно обнаруживает слабые места. Поэтому новые типы двигателей должны быть проанализированы по основным критериям для ЭУ подводных лодок: удельной мощности, ярмы и пожаробезопасности, теплоотделения в атмосферу ПЛ, бесшумности, стоимости эксплуатации и т. д. Только после подобного анализа можно сделать вывод о том, какое место займут газозабросные установки между классической дизель-электрической и классической ядерной ЭУ и на каких лодках целесообразно их устанавливать.



Основные тактико-технические характеристики

Период проведения морских испытаний, годы	1988 - 1989
Нормальное водоизмещение, м ³	1200
Главные размеры, м длина ширина	70,0 7,3
Мощность ДЭГ, кВт	280
Полная ходовая скорость, узл	9
Полная подводная скорость, узл	5
Дальность полного плавания экономическ. скоростью, миль	1700
Автономность, сутки	30
Автономность подводного плавания, сутки	20
Водопад, т	32
Водоход, т	4

Энергетическая установка на основе электрохимических генераторов

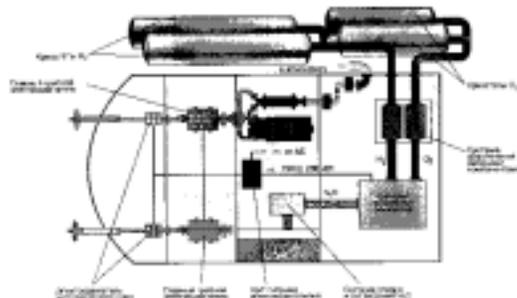


Рис.3.18. Подводная лодка проекта 613Э с электрохимическими генераторами

габаритные характеристики РЗВ прототипов, откорректированных с учетом требований к проекту и развития техники.

Масса РЗВ не зависит от элементов проектируемой ПЛ, поэтому ее следует относить к группе независимых ("заданных") масс. В то же время масса заборной аппаратуры, прежде всего антенн, зависит от глубины погружения (внешнего давления на аппаратуру), что должно учитываться при расчете. Масса кабелей всех назначений (магистральных и местных) составляет примерно 2—3% от нормального водоизмещения подводной лодки.

3.5. Нагрузка по группе "Специалдела и спецпринадлежности; устройства и оборудование, обслуживающие специалдела"

Для подводных лодок в эту группу входят массы средств, воз- действующих на противника, а также массы систем и устройств, обеспечивающих действие этих средств (системы управления стрельбой и т. п.).

Указанные массы определяются на основании задания на проектирование ПЛ. Используются также данные контрагентов и статистические данные по построенным кораблям.

Масса торпедного вооружения может быть определена по зависимости

$$P_{ТВ} = k_{ТВ} n_{ТВ} P_{ТА} + (P_{ТЗ} + P_{ТШ} + P_{Т}) n_{ТЗ} + k_{СТ} n_{П} P_{Т} + P_{СТВ}, \quad (3.67)$$

где $k_{ТВ} = 1,2—1,3$ — коэффициент, учитывающий приборы управления;

$n_{ТВ}$ — количество торпедных аппаратов (ТА);

$P_{ТА}$ — масса ТА в сборе;

$P_{Т}$ — масса единицы боезапаса;

$P_{ТЗ} = 0,5—1,2$ т — масса воды кольцевого зазора в зависимости от типа ТА на один торпедный аппарат;

$P_{ТШ} = 0,3—0,6$ т — масса волноорезного штага;

$k_{СТ} = 1,4—1,5$ — коэффициент, учитывающий массу стеллажей;

$n_{П}$ — количество боезапаса на стеллажах;

$P_{СТВ}$ — масса торпедоогрубочного устройства.

Строго говоря, категория масс данной группы может быть отнесена к постоянным массам, которые могут быть рассчитаны достаточно точно уже на самых ранних стадиях проектирования.

Масса $P_{ТВ}$ фиксированного калибра зависит от типа ТА (воздушные, гидравлические и др.), глубины стрельбы, предельной глубины погружения ПЛ и характеристик материала ТА. В начальных стадиях проектирования массу $P_{ТВ}$ следует определять по прототипу. В случае изменения предельной глубины погружения пересчитываются те части ТА, которые воспринимают полное заборное давление.

Масса волноорезного штага при фиксированном калибре ТА определяется его длиной, которая зависит от обвода наружного корпуса ПЛ в месте выхода боезапаса, а также от угла боевого конуса, который обычно принимается равным 1/18 [35].

Различные виды боезапаса, даже одного калибра, могут существенно отличаться по массе (до 1,5 раз) [32], [52], [68], что влияет на массу воды кольцевого зазора. В исследованном проектировании, когда состав боезапаса детально не конкретизирован, целесообразно принимать однородный боезапас для каждого калибра.

Для приближенного определения массы ракетного вооружения может быть использована формула, аналогичная (3.67):

$$P_{РВ} = n(P_{РК} + P_{РШ} + k_{КР} P_{КР} + P_{Р} + P_{РЗ}), \quad (3.68)$$

где $n_{РВ}$ — количество шахт БР или контейнеров КР;

$P_{РК}$ — масса одной ракеты;

$P_{РШ}$ — масса внутреннего насыщения одной шахты или контейнера;

$k_{КР} = 1,25—1,30$ — коэффициент, учитывающий массу обтекателя и привода крышки;

$P_{Р}$ — масса крышки шахты;

$P_{Р}$ — масса ракеты;

$P_{РЗ}$ — масса кольцевого зазора на одну шахту.

Масса корпуса шахты зависит от ее размеров, определяемых габаритами ракеты, предельной глубины погружения ПЛ и характеристик материала. Для приближенного учета изменения этих факторов при пересчете массы $P_{РВ}$ с прототипа можно использовать формулы для определения массы ПК, однако, следует учитывать, что $g_{ПК}$ может быть существенно больше:

$$P_{ПК} = P_{ПК} \frac{g_{ПК}^I (P_{ПК}, \sigma_{ПК})}{g_{ПК}^I (P_{ПК}, \sigma_{ПК})} \frac{V_{ПК}}{V_{ПК}}, \quad (3.69)$$

где $\bar{m}_s^T = \frac{P_{11}}{V_{11}}$ — измеритель массы шланга, интегрирующего шахту,

аналогичный измерителю $\bar{m}_{\text{вмк}}^T$, но с учетом донныка.

Для пересчета массы крышки можно использовать формулу:

$$P_{\text{кр}} = P_{\text{пр}} \left(\frac{d_{\text{пр}}}{d_{\text{кр}}} \right)^{1,5} \left(\frac{P_{\text{кр}}}{P_{\text{пр}}} \right) \chi \frac{\sigma_{\text{кр}}}{\sigma_{\text{пр}}}, \quad (3.70)$$

где $d_{\text{пр}}$ и $d_{\text{кр}}$ — диаметр шахты ПЛ прототипа и проекта.

Остальные величины, входящие в формулу (3.68), определяются по ТУ на поставку оружия, по данным контрагентов и по прототипам с аналогичным вооружением [34], [68].

3.6. Нагрузка по группам "Запасы и команда" и "Запас водоизмещения". "Твердый балласт"

Запасы и команда

После вычета запасов для энергетических установок, учтенных выше, измеритель оставшейся части составляет $P_{\text{жк}} = 0,02—0,03$, причем меньшая величина соответствует большим по водоизмещению ПЛ.

Для более точного расчета нагрузки по группе "Запасы и команда" необходимо решить очень важный вопрос — определить численность экипажа. С одной стороны, личный состав — это обслуживание боевых и технических средств, а с другой — потребление этим экипажем пищи, воды, воздуха, площадей для спальных мест, что при завышенной численности приводит к трудностям его размещения на корабле. Если для атомных ПЛ большого водоизмещения этот вопрос менее острый, то для дизельных подводных лодок, имеющих ограниченное водоизмещение, становится проблемным, а его решение — актуальной задачей.

Как правило, численность личного состава может быть приближенно намечена уже в начальной стадии проектирования. Для этой цели используются таблицы комплексов ПЛ прототипов с соответствующей корректировкой, в том числе с учетом двух- или трехместной шахты, принятой концепции борьбы за живучесть корабля и выполнения после аварии восстановительных работ, степени автоматизации систем управления кораблем, заложенной в проект.

При известной численности личного состава $n_{\text{лч}}$ массе команды и запасов для нее можно подставить по формуле

$$P_{\text{жк}} = P_{\text{жк}} n_{\text{лч}} + (P_{\text{пр}} + P_{\text{вмк}}) A n_{\text{лч}} \quad (3.71)$$

и отнести к постоянным (независимым) массам. Здесь:

$P_{\text{жк}} = 100—125$ кг — масса одного человека с багажом;

$P_{\text{пр}} = 3,5$ кг — норма провизии (с учетом тары) на одного человека в сутки;

$P_{\text{вмк}} = 6$ л — норма пресной питьевой воды, принимаемой на базе, на 1 человека в сутки;

A — автономность, сут.

Дополнительное количество пресной воды (сверх 6,0 л питьевой) обеспечивается опреснительными установками.

Кроме этого, в расчеты включается аварийный запас провизии и пресной воды.

После вычисления массы команды и запасов на долю дифференциальной воды, остаточной воды в цистернах и воздуха в объеме ПК остается $p_{\text{вз}} = P_{\text{пр}} / D_{\text{в}} = 0,005—0,010$.

Запас водоизмещения

Запас водоизмещения (ЗВ) разделяется на две части: запас на проектирование и постройку, выходящийся в распоряжении ЦКБ-проектировщика и завода-строителя, и запас на модернизацию, выходящийся в ведении заказчика — ВМФ.

Величина запаса водоизмещения на проектирование и постройку зависит от стадии проектирования, новизны проекта, наличия близкого прототипа и на стадии разработки технического предложения может составлять $p'_{\text{вз}} = P_{\text{пр}} / D_{\text{в}} = 0,030—0,050$, снижаясь в рабочем проекте до $p''_{\text{вз}} = 0,005—0,010$.

Неиспользуемая величина ЗВ погашается твердым балластом.

ЗВ на модернизацию указывается в ТТЗ на проектирование ПЛ и обычно составляет $p''_{\text{вз}} = 0,005—0,020$.

Вопрос о рациональной величине ЗВ на модернизацию достаточно сложен. С позиций военно-экономического анализа для обеспечения боевого потенциала ПЛ в условиях быстро развивающейся военной техники (особенно комплексов вооружения и радиоэлектронике) до недавнего времени целесообразным было его увеличение по сравнению с приведенным выше. Однако с середины 80-х годов бурное развитие микроэлектроники и создание единой интегрированной автоматизированной системы управления кораблем, РЭВ и оружием привели к резкому сокращению высотаритных характери-

стик этого оборудования в 1,5—2,0 раза на ПЛ IV поколения, поэтому этот вопрос требует дополнительного изучения [93].

Все виды запаса водоизмещения должны быть учтены в таблице нагрузки таким образом, чтобы обеспечить запас остойчивости. Обычно для ПЛ считается достаточным, если ордината ЦГ запаса водоизмещения будет не ниже суммарного ЦГ групп "Устройства" и "Системы", т.е. $Z_{\text{ж}} \geq Z_{\text{ст}}$. На равных стадиях проектирования величину этой ординаты можно принимать на уровне осевой линии прочного корпуса.

Абсциссу запаса водоизмещения $X_{\text{ж}}$ следует принимать в районе его вероятного использования, а в случае неопределенности — на минимуме.

Твердый балласт

Твердый балласт (ТБ) является обязательной принадлежностью любой подводной лодки. Он выполняет роль своеобразного регулятора, с помощью которого достигаются равенство основного закона $D_0 = \rho V_0$, удифферентовка в подводном положении и необходимые значения остойчивости.

Многообразие функций твердого балласта затрудняет получение зависимости для определения его массы $P_{\text{тб}}$ на основе физических соображений.

При первоначальном определении элементов проектируемой ПЛ условно принимают $P_{\text{тб}} = p_{\text{тб}} D_0$. Для большинства ПЛ традиционных типов $p_{\text{тб}} = 0,02—0,04$.

Более точно потребное количество ТБ и координаты его ЦГ определяются после составления нагрузки и сводки постоянного плавучего объема.

Окончательное количество ТБ и положение его ЦГ определяется после вывески и кренования построенной ПЛ.

4. УРАВНЕНИЕ НАГРУЗКИ В ФУНКЦИИ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОИЗМЕЩЕНИЯ

4.1. Составление и решение уравнения нагрузки в первом приближении

Как указано в главе 2, водоизмещение или масса плавящегося тела D_0 равна массе вытесненной им воды ρV . Водоизмещение D_0 представляет собой сумму масс конструкций, механизмов, оборудования, вооружения, топлива и т.п., составляющих нагрузку судна, т.е.:

$$D_0 = \sum_{i=1}^n P_i \quad (4.1)$$

Выражение (4.1) называют уравнением нагрузки или уравнением масс.

Часть масс, входящих в формулу (4.1), может быть выражена в функции водоизмещения $P(D_0)$. Остальные массы, обозначим их $P_{\text{ст}}$, задаются и принимаются независимыми от D_0 . Поэтому можно записать

$$D_0 = P(D_0) + P_{\text{ст}} \quad (4.2)$$

Решение уравнения (4.2) дает искомое водоизмещение, соответствующее заданным независимым массам $P_{\text{ст}}$, а также параметрам, входящим в функцию $P(D_0)$, в частности скорости, дальности плавания, измерителям масс и т.д. Массы $P(D_0)$ могут быть вычислены для любого заданного D_0 , но искомое водоизмещение будет соответствовать только решению уравнения (4.2).

Графическое решение этого уравнения показано на рис. 4.1. В точке пересечения кривой масс $P(D_0) + P_{\text{ст}}$ и прямой плавучести $D = D_0$ находится решение уравнения (4.2), т.е. $D_{\text{нов}}$. В этой точке удовлетворяется и закон Архимеда. Как видно из рис. 4.1, уравнение имеет единственное решение.

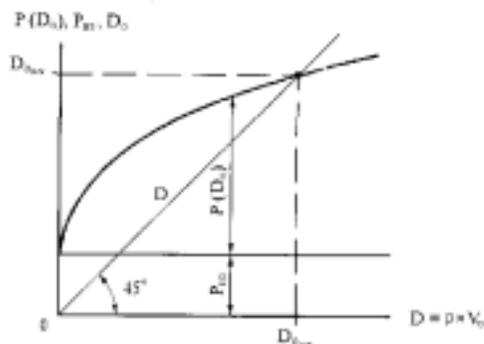


Рис. 4.1. Графическое решение уравнения нагрузки

В главе 3 указывалось, что часть масс зависит от водоизмещения лодки, а часть — зависит от величины $D_0^{2/3}$. Тогда в общем виде функция $P(D)$ может быть записана следующим образом:

$$P(D_0) = AD_0 + ED_0^{2/3}, \quad (4.3)$$

где коэффициент A представляет собой сумму измерителей масс, прямо пропорциональных D_0 , а E — зависящих от $D_0^{2/3}$.

Уравнение нагрузки, соответствующее выражению (4.2) будет иметь вид:

$$D_0 = AD_0 + ED_0^{2/3} + P_m. \quad (4.4)$$

При подстановке $x = D_0^{2/3}$ уравнение (4.4) приводится к кубическому и решается аналитически [1].

Решая уравнение (4.4) любым способом, получим нормальное водоизмещение в первом приближении.

4.2. Уравнение нагрузки во втором приближении

Уточнение водоизмещения, нагрузки проектируемой ПЛ и других проектных параметров во втором приближении производится путем выбора состава энергетической установки и уточнения других слагаемых нормального водоизмещения.

Поскольку атомные подводные лодки обычно проектируют под заданную или заранее принятую ЭУ, для которой известны мощность и массогабаритные характеристики, и выбор установки не

проводится, рассмотрим составление уравнения во втором приближении на примере ДЭПЛ. Однако следует заметить, что общий подход к составлению уравнения нагрузки будет справедливым и для АПЛ.

Выбору составляющих энергетической установки, т.е. выбору двигателей, АБ и прочих компонентов ЭУ должен предшествовать выбор количества валов на ПЛ и распределение суммарной мощности между ними. После решения этого вопроса с учетом всех факторов можно приступить к выбору конкретных двигателей из числа существующих (по данным каталогов) или находящихся в разработке.

Выбор дизелей и гребных электродвигателей

При выборе дизелей для подводных лодок следует учитывать следующие факторы:

- 1) соответствие мощности;
- 2) частоту вращения, особенно при прямой работе двигателя на линию вала;
- 3) приемлемые массогабаритные характеристики, позволяющие разместить двигатель на ПЛ;
- 4) акустические характеристики двигателя;
- 5) способность выбранных дизелей работать на повышенном противодавлении в режиме РДП;
- 6) экономичность.

Выбором двигателя по потребной мощности N_p , полученной по данным первого приближения (см. главу 3), следует иметь в виду, что практически не может быть полного совпадения потребной мощности и мощности реальных двигателей. Это вполне допустимо с учетом того, что мощность, определенная по формуле адмиралтейских коэффициентов, приближена. Итак, когда дизели выбраны и их масса известна, можно найти и массу дизельной установки.

$$P_{дв} = k_{дв} \sum_1^i P_{двi} \quad (4.5)$$

Для выбора гребных электродвигателей учитываются требования, аналогичные приведенным выше для выбора дизелей. Дополнительно необходимо учесть, что если энергетическая установка ПЛ не одновальная, то полученная по данным первого приближения мощность электродвигателей разбивается по линиям валов, причем это деление может не соответствовать разделению мощности дизелей. С другой стороны, при прямой работе дизелей на вал их частота вращения

должна быть определенным образом согласована с частотой вращения электродвигателей, иначе гребной винт в одном режиме будет перегружен, а в другом недогружен. Для согласования оборотов дизеля и электродвигателя, работающих на один винт, необходимо иметь винтовую характеристику.

Таким образом, выбор гребных электродвигателей нужно проводить как по мощности N_1 , так и по числу оборотов n . Это усложняет задачу и делает ее не всегда решаемой. При полном электродвижении такая проблема отсутствует, что является одной из основных причин перехода ПЛ IV поколения на ГЭУ с полным электродвижением.

Если электродвигатели выбраны, то аналогично расчету массы дизельной установки масса гребной электрической установки определяется по зависимости типа (4.5). $P_{ГЭУ} = k_{ГЭУ} \sum P_{ГЭД}$

После определения масс указанных установок их переводят в разряд постоянных масс.

Выбор аккумуляторной установки

По функциональным зависимостям, использованным при составлении уравнения нагрузки в первом приближении, и по полученному водоизмещению D_0^I можно подсчитать массу аккумуляторной установки и далее массу собственно аккумуляторной батареи.

Как уже отмечалось (см. 3.3), аккумуляторная батарея комплектуется из групп, количество элементов в которых не может быть произвольным, так как оно определяется потребным напряжением, которое дает группа, и типом аккумуляторной батареи.

Тип аккумуляторных батарей выбирается при составлении уравнения нагрузки в первом приближении, поскольку в значительной степени определяет величину удельного расхода энергии $\Delta \Sigma$, а следовательно, и ее массу (см. рис. 3.13).

Итак, для принятого в первом приближении типа аккумуляторов известны несколько размеров элементов с различными массами $P_{ЭА}^I$.

Требуемое количество элементов, с массой $P_{ЭА}^I$, определится следующим образом:

$$n_{ЭА}^I = \frac{P_{ЭА}^I}{P_{ЭА}^I} \quad (4.6)$$

Зная $n_{ЭА}^I$, решаем вопрос о возможности комплектовки групп с заданным количеством элементов в группе, после чего определяем количество групп и число $n_{ЭА}^{I, \text{групп}}$. В общем случае $n_{ЭА}^I$ и $n_{ЭА}^{I, \text{групп}}$ отличаются в ту или иную сторону. Если это отклонение небольшое, допустим не более 5%, то аккумуляторная батарея комплектуется из элементов массой $P_{ЭА}^I$. Если отклонение велико, то аналогично определяется количество аккумуляторов другого типа массой $P_{ЭА}^{II}$ и т.д.

После компоновки аккумуляторной батареи можно подсчитать массу установки и перевести ее в разряд постоянных масс:

$$P_{АВ} = k_{АВ} \cdot k_2 \cdot P_{ЭА}^{I, \text{групп}} \cdot n_{ЭА}^I \quad (4.7)$$

где $k_{АВ}$ — коэффициент, учитывающий массу установки;

k_2 — коэффициент, учитывающий массу дистиллята для долики аккумуляторов.

Помимо составляющих энергетической установки могут быть уточнены и другие массы, входящие в нормальное водоизмещение ПЛ.

По результатам проведенных уточнений составляется уравнение нагрузки во втором приближении.

$$A \cdot D_0 + E \cdot D_0^{II} + P_{ЭА}^I = D_0 \quad (4.8)$$

Уравнение (4.8) будет значительно отличаться от уравнения нагрузки в первом приближении (4.4).

Постоянные массы будут значительно больше, так как $P_{ЭА}^I = P_{ЭА}^I + P_{ГЭУ} + P_{ГЭД} + P_{АВ} + P_1$, а коэффициент E — меньше. Может отличаться и коэффициент A .

Получив значение водоизмещения из уравнения нагрузки во втором приближении, можно составить таблицу нагрузки проектируемой ПЛ по тем основным разделам, которые учитывались при составлении этого уравнения. В таблицу полезно ввести данные по ПЛ прототипам, которые послужили основанием для определения соответствующих измерителей масс и других параметров проектируемой ПЛ.

Составление такой таблицы дает возможность проверить правильность решения уравнения нагрузки и сравнить нагрузку проекта с нагрузкой других ПЛ. Отклонения в значениях масс по группам, особенно относительные (в процентах от D_0), должны быть объяснены с точки зрения требований задания.

4.3. Влияние изменения параметров корабля и независимых масс на нагрузку. Дифференциальная форма уравнения нагрузки в функции водоизмещения. Коэффициент Нормана

В различного рода проектных оценках часто приходится решать вопрос, на сколько изменится водоизмещение ПЛ при вариации различных параметров (измерителей и тактико-технических или технико-экономических элементов) [6], [27]. В данном случае бывает удобно пользоваться дифференциальной формой уравнения нагрузки, которая определяет закон изменения водоизмещения при малых переменах параметров:

$$\Delta D = \eta_n [\Delta P(D_n) + \Delta P_{st}]. \quad (4.9)$$

Коэффициент η_n называется коэффициентом изменения (вариации) водоизмещения или коэффициентом Нормана. Из (4.9) следует, что

$$\eta_n = \frac{\Delta D}{\Delta P(D_n) + \Delta P_{st}}, \quad (4.10)$$

т.е. коэффициент Нормана есть отношение изменения водоизмещения к изменению нагрузки в результате изменения параметров корабля и независимых масс. Пределы применимости формулы (4.9) в достаточной мере не исследовались. Практически, в случае изменения масс до 20% D_n , можно ожидать достаточно точных результатов.

Для возможности вычисления изменения водоизмещения ΔD по формуле (4.9) необходимо найти как η_n , так и изменение $\Delta P(D_n)$ масс от изменения параметров корабля в предположении неизменности водоизмещения.

Изменение независимых масс вычисляется весьма просто:

$$\Delta P_{st} = P_{st} - P_{st_0}. \quad (4.11)$$

Изменяя масс, зависящих от водоизмещения и ряда параметров корабля, могут быть найдены путем вычисления конечных разностей. Например, нагрузка по ПК при изменении $P_{pc} = P_{pc}$ меняется так:

$$\Delta P_{pc} = P_{pc} - P_{pc_0} = (p_{pc} - p_{pc_0}) D_n = \Delta p_{pc} D_n. \quad (4.12)$$

Аналогично можно завязать изменение нагрузки по остальным группам. В результате

$$\Delta P(D_n) = \sum_i \Delta P_i. \quad (4.13)$$

Наиболее просто выражение для коэффициента Нормана записывается в том случае, когда изменение $P(D_n) + P_{st}$ происходит только за счет изменения P_{st} , т.е. $\Delta P(D_n) = 0$, а $\Delta P_{st} \neq 0$.

$$\eta_n = \frac{1}{1 - \frac{dP_n(D_n)}{dD}} = \frac{1}{1 - A^{(D)} E \frac{D_n^{(D)}}{D}}. \quad (4.14)$$

$$\text{где } \frac{dP_n(D_n)}{dD} = \frac{P_{ткн}}{D_n} + \frac{P_{стн}}{D_n} + \frac{P_{свн}}{D_n} + \dots + \frac{2}{3} \left(\frac{P_{свн}}{D_n} + P_n + P_{стн} \right).$$

По этим формулам η_n может быть вычислен, например, при изменении массы вооружения или боезапаса ПЛ. Весьма часто формулу (4.13) применяют даже для $\Delta P(D_n) \neq 0$ (при таком условии ее вывел и сам Жак-Оттогон Норман). Тогда несколько снижается точность расчета, но одновременно упрощаются вычисления и, кроме того, появляется возможность пользоваться одним постоянным η_n для нескольких вариантов изменения параметров и независимых масс.

Используя зависимость (4.13), можно записать изменение водоизмещения по А (при изменении, например, глубины погружения и соответственно массы прочных конструкций):

$$\Delta D = \Delta A \Delta \eta_n; \quad (4.15)$$

изменение водоизмещения по Е (при изменении мощности ГЭУ, скорости хода и соответственно массы ГЭУ):

$$\Delta D = \Delta E \Delta \eta_n; \quad (4.16)$$

изменение водоизмещения по Р, т.е. при изменении постоянных масс (оружия, радиоэлектроники):

$$\Delta D = \Delta R \eta_n. \quad (4.17)$$

Величина коэффициента Нормана для подводных лодок находится в пределах $\eta_n = 3-4$ и показывает, насколько сильно может возрасти водоизмещение при увеличении нагрузки. Так, например, при увеличении нагрузки на 100 тонн водоизмещение возрастает на 300—400 тонн. Условием такого возрастания является большая доля масс, зависящих от водоизмещения.

Как следует из сказанного, при использовании дифференциальной формы уравнения нагрузки, большое значение имеет принцип ее разбивки на группы, который обусловлен поставленной задачей и в зависимости от цели исследования состав группы может изменяться.

Необходимо отметить, что чем больше масс оборудования ПЛ будет относиться к постоянным, тем более достоверный результат

можно получать при использовании уравнения нагрузки и коэффициента Формана и тем меньше будет значение этого коэффициента.

Таким образом, процесс расчета нагрузки ПЛ на различных стадиях проектирования можно представить как непрерывное увеличение доли постоянных масс. На этапе рабочего проектирования, когда все массы определены достаточно точно, и изменение нагрузки может производиться только за счет корректировки запаса водозмещения, приращение водозмещения будет равно нулю.

4.4. Контроль нагрузки при проектировании и постройке ПЛ

Под контролем нагрузки понимается комплекс организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение возможности удифферентовки ПЛ на всех стадиях ее проектирования, постройки, испытаний и эксплуатации.

Основное содержание работ по контролю нагрузки ПЛ сводится к следующим процессам:

- прогнозирование изменения нагрузки ПЛ на всех стадиях проектирования, постройки, испытаний и ее полного жизненного цикла;
- контроль нагрузки оборудования, устанавливаемого на ПЛ по выпускаемой в ходе проектирования конструкторской документации;
- управление расходом запасов водозмещения;
- формирование лимитов нагрузки и контроль их выполнения;
- ведение весового контроля при постройке (контроль взвешиванием);
- проведение взвешки и кренования ПЛ по завершении ее постройки;
- контроль нагрузки оборудования ПЛ, устанавливаемого на период ходовых испытаний;
- контроль нагрузки оборудования ПЛ, устанавливаемого при ее модернизации.

Прогнозирование изменения нагрузки ПЛ. Прогнозирование изменения нагрузки ПЛ начинается на самых ранних стадиях ее проектирования. При этом выполненный на основе проектных зависимостей и статистических измерителей расчет нагрузки ПЛ представляет собой исходную информацию для работы на следующих стадиях проектирования.

Располагая таким расчетом, проектировщик методом экспертных оценок определяет наиболее вероятные направления изменения нагрузки ПЛ, исходя из информации о принятых в проекте ПЛ

новшествах. Выполняемые совместно специалистами конструкторского бюро и фирмами-разработчиками оборудования прогнозы возможного изменения нагрузки отдельных видов материальной части ПЛ служат основой для принятия решения о назначении величины запаса водозмещения на последующие стадии проектирования ПЛ. Кроме прогнозирования изменения величины массы оборудования ПЛ, выполняется прогноз координат центра тяжести этой дополнительной массы.

Одновременно с выполнением прогноза изменения нагрузки ПЛ при проектировании, аналогичный прогноз делается в отношении изменения нагрузки ПЛ при постройке, результаты которого служат для выбора величины запаса водозмещения на постройку. Как правило, эта величина зависит от опыта и оснащенности верфи, выбранной для постройки ПЛ, а также от принятых для данной ПЛ нетрадиционных технологий (при переходе верфи на постройку ПЛ блочно-модульным методом или применении других построечных материалов, например — при выборе в качестве основного конструкционного материала высокопрочной, но более трудоемкой по сварочным характеристикам стали).

Параллельно с предыдущими работами выполняется анализ перспектив модернизации ПЛ в течение ее жизненного цикла, а также анализ влияния модернизационных работ на нагрузку ПЛ.

Все составляющие запаса водозмещения (на проектирование, постройку и модернизацию ПЛ) тесно связаны между собой. Так при неполном израсходовании запаса водозмещения на проектировании по завершении разработки рабочей конструкторской документации (стадия рабочего проектирования) остаток запаса водозмещения обычно включается в величину запаса водозмещения на модернизацию. Аналогичным образом увеличивается запас водозмещения на модернизацию при неполном израсходовании запаса водозмещения на постройку. Однако, в случае непредвиденного увеличения нагрузки ПЛ на любой стадии проектирования образовавшийся "перевес" может быть, погашен за счет сокращения запаса водозмещения на постройку. При этом, рассматриваются мероприятия по более "жесткому" контролю нагрузки ПЛ при постройке и подвергаются пересмотру некоторые конструктивные решения.

Контроль нагрузки по рабочей конструкторской документации (чертежам, схемам, ведомостям, в соответствии с которыми осуществляется постройка ПЛ) имеет своей целью получение пол-

ной и достоверной информации по нагрузке ПЛ. При этом контроль нагрузки является составной частью общетехнического контроля качества выпускаемых конструкторским бюро документов, что гарантируется прохождением всех разрабатываемых документов через сектор нагрузки. Такая форма контроля позволяет своевременно выявлять конструкторские документы с неполной и недостоверной информацией по нагрузке материальной части.

В ходе контроля нагрузки по рабочей конструкторской документации проверяется наличие в документах следующей информации:

- 1) номер рабочего конструкторского документа;
- 2) наименования оборудования, устанавливаемого на ПЛ по данному документу;
- 3) района расположения данного оборудования (номера шпангоутов, между которыми оно полностью размещается);
- 4) масса в тоннах (с точностью до 0,001 т);
- 5) координаты центра масс в системе координат ПЛ (от плоскости мидель-шпангоута — X , от основной плоскости — Z , от диаметральной плоскости — Y) — с точностью до 0,01 м;
- 6) моменты массы (с точностью до 0,01 тм).

При этом, если конструкторский документ разработан на установку оборудования, содержащего различные грузы, которые в ходе эксплуатации данного оборудования могут быть из него удалены, то в этом случае в документе должна содержаться информация по п. 3..6. для каждого типа таких грузов. Например, трубы, арматура, якорсы и т.д. составляют нагрузку так называемой "основной конструкции", а вода (или другая жидкость), находящаяся в этой системе, составляет так называемый "заполнитель". В нагрузке, прикладываемой к конструкторскому документу, соответственно указывается тип такого наполнителя (вода, смазочное масло, дизельное топливо и т.д.), которому для простоты последующей обработки присваивается соответствующий код.

После завершения этого этапа проверки конструкторского документа (проверки на полноту информации по нагрузке) проводится его проверка на достоверность, содержащейся в нем информации. Так, например, масса, указанная в документе, может быть проверена упрощенным расчетом как функция какого-либо конструктивного параметра (так для дюралевой массы листов глубина может быть использована ее зависимость от площади). Координаты центра масс всей конструкции (или устанавливаемого оборудования) могут быть приблизительно определены, как координаты ЦМ, равномерно за-

полненного геометрического тела с постоянной плотностью. Выборочно выполняется проверка массы и координат ЦМ отдельных деталей (или групп деталей). При "ручном" выполнении расчета нагрузки оборудования, устанавливаемого по данному конструкторскому документу, может также проводиться проверка правильности выполненных арифметических операций (например - проверка правильности суммирования масс отдельных деталей или их моментов массы).

После завершения таких (тривиальных) проверок нагрузка по данному конструкторскому документу может быть включена в базу данных по нагрузке ПЛ этого проекта. При этом осуществляется ее суммирование с нагрузками уже прошедшего контроль оборудования по данной конструктивной группе и производится сравнение полученной величины с назначенным лимитом. При завершении выпуска конструкторских документов по данной конструктивной группе производится окончательное сравнение с назначенным лимитом и определяется величина отклонения массы и моментов массы. Если отклонение превышает допустимую величину производится решение нагрузки по данной конструктивной группе, имеющей своей целью установить причины этого отклонения (является ли это отклонение нагрузкой результатом конструктивной ошибки или следствием принятых решений, направленных на совершенствование оборудования по данной конструктивной группе). Та же процедура производится при неэквиварантном выпуске документов при превышении лимита нагрузки. При углубленной ревизии нагрузки конструкторских документов, разработанных по данной конструктивной группе, производится сравнение нагрузок каждого документа (или групп документов) с аналогичными нагрузками, полученными на предыдущих стадиях проектирования (например, сравнение нагрузок по конструкциям легкого корпуса ПЛ в носовой блоке с аналогичными им нагрузками, полученными на стадии технического проекта).

Ведение весового контроля при постройке (контроль взвешиваемых). В ходе постройки ПЛ на верфи осуществляется контроль нагрузки оборудования, предназначенного для установки на ПЛ в соответствии с рабочими конструкторскими документами. При этом практически все оборудование проходит процедуру взвешивания. Этот процесс имеет своей целью гарантировать возможность удифференковки ПЛ после завершения ее постройки, возможность выполнения требований к ПЛ в части величины начальной поперечной

метacentрической высоты, а также расчета количества и места расположения дифферентовочного балласта перед спуском ПЛ.

При ведении весового контроля при постройке различают несколько видов взвешивания ПЛ:

- подетальное (взвешивание отдельных корпусных деталей, элементов оборудования, приборов и т.д.);
- узловое (взвешивание отдельных конструктивных узлов);
- посекционное (взвешивание секций).

На каждом этапе взвешивания принимается решение о допустимости технологических отклонений массы деталей, узлов, секций, и в случае обнаружения существенных расхождений масс, полученных в результате взвешивания, и масс, полученных расчетным путем, производится ревизия последних с целью обнаружения возможных ошибок. При обнаружении ошибок в работе конструкторской документации производится корректировка лимитов нагрузки, аналогичная описанной выше.

В случае невозможности компенсации увеличения нагрузки при постройке за счет корректировки конструкторских документов, главным конструктором проекта может быть принято решение о снижении запаса водоизмещения на постройку ПЛ.

В том случае, когда превышение массы детали, узла, секции вызвано их неизвестным изготовлением принимается решение о браке этого объекта и его повторном изготовлении.

Завершающей стадией контроля нагрузки корабля при постройке является производимая во время ходовых испытаний операция выски и кренования ПЛ, имеющая своей целью проверку соответствия нагрузки и плавучести, определения значений начальной поперечной метacentрической высоты в основных положениях плавания (обычно — в подводном, крейсерском, и реже — в позиционном положениях).

В ходе выски и кренования определяется необходимость укладки (снятия) дополнительного твердого балласта для приведения в соответствие плавучести и нагрузки ПЛ, а также необходимость в переносе некоторого количества твердого балласта из носа в корму (для их кормы в нос) и с борта на борт, с целью исключения дифферентов и кренов.

По результатам расчета нагрузки выполняется зенора распределения нагрузки по длине корабля, выполняемая исходным материалом для выполнения расчетов удиффертовки (рис. 4.2.).

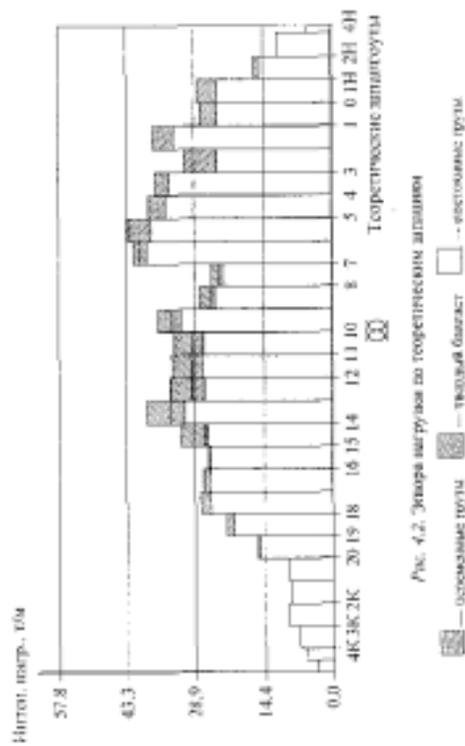


Рис. 4.2. Зенора нагрузки по теоретическим данным

5. ПОСТОЯННЫЙ ПЛАВУЧИЙ ОБЪЕМ (ППО) ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ

Таблица 5.1

5.1. Постоянный плавучий объем и его связь с нормальной нагрузкой подводной лодки

Нормальной нагрузке ПЛ в подводном положении, как теперь известно, соответствует постоянный плавучий объем ППО, включающий все водонепроницаемые в подводном положении объемы (рис. 5.1).

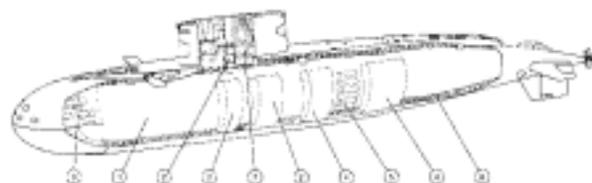


Рис. 5.1. Основные составные ППО дизель-электрической подводной лодки.

1 – прочный корпус; 2 – наружные прочные люки, рубки и цистерны; 3 – торцевые аппараты; 4 – наружные топливные цистерны; 5 – системы, устройства; 6 – обшивка, набор, покрытие прочного и наружного корпусов; 7 – проче.

К ним относятся, прежде всего, объемы прочного корпуса и равнопрочных ему конструкций, расположенных вне ПК; объем металла наружного корпуса и конструкций, расположенных в междубортном пространстве; объем дизельного топлива в наружных топливных цистернах и т.д. (см. главу 3).

Результаты расчета ППО представляются в виде сводной таблицы (сводки ППО), состоящей обычно из 30—50 наименований объемов с указанием их плеч и моментов аналогично таблице нормальной нагрузки (табл. 5.1.).

Сводная таблица постоянного плавучего объема

№ п/п	Наименование статьи	Объем	Плечо	Момент	Плечо	Момент
		V	по высоте, Z	по высоте, M _z	по длине, X	по длине, M _x
		м ³	м	м ³	м	м ³
1	Объем прочного корпуса					
2	Углубленная цистерна					
3	Цистерна быстрого погружения					
4	Дифференциальные цистерны*					
5	Наружные топливные цистерны					
6	Обшивка и набор прочного корпуса					
7	Обшивка и набор прочной цистерны					
8	Обшивка и набор внешнего корпуса					
9	Обшивка и набор внешней обшивки					
10	Обшивка и набор внешней обшивки					
11	Обшивка и набор надстроек и артиллерийских вышек устройств					
12	Выступающие части торцевых аппаратов					
13	Прочные рубки и люки					
14	Баллоны ВВД с трубопроводами					
15	Рулевые устройства					
16	Выдвижные устройства					
17	Консоли и клипсы анкерования					
18	Разное имущество на борту					
	ИТОГО постоянный плавучий объем					

* В случае расположения вне прочного корпуса.

Номограмма сводки ППО примерно одинакова на разных стадиях проектирования, однако подробность и точность расчетов возрастает по мере углубления проработки проекта.

При наличии чертежей или схем общего расположения, а также нормальной нагрузки составление и расчет сводки ППО не представляют принципиальных трудностей. Основные плавучие объемы и координаты их центров определяются по формулам для элементарных геометрических тел (цилиндры, конусы, части сфер и т.п.).

Подводная лодка должна быть спроектирована так, чтобы выполнялись условия статического равновесия при отсутствии крена и дифферента:

$$D_z = \rho V_z \text{ при } X_z = X_C, Y_z = Y_C. \quad (5.1)$$

Необходимо также выполнить условия устойчивости в подводном положении:

$$Z_C - Z_z = h_z, \quad (5.2)$$

где h_z — начальная метацентрическая высота в подводном положении.

Условия (5.1) и (5.2) выражают общую связь между ППО и нормальной нагрузкой ПЛ.

Кроме указанных условий, между некоторыми массами наружного насыщения ПЛ и соответствующими им плавучими объемами также имеется определенная связь. Величина объемов таких конструкций полностью определяется их массой и плотностью материала, а координаты центров масс и объемов совпадают [36]:

$$V_i = \frac{P_i}{\rho_M}; \quad (5.3)$$

$$X_{P_i} = X_C; Y_{P_i} = Y_C; Z_{P_i} = Z_C. \quad (5.4)$$

где V_i и P_i — плавучие объемы и соответствующие им массы;

ρ_M — плотность материала.

К конструкциям, для которых справедливы условия (5.3), можно отнести:

— обшивку и набор прочного корпуса (за исключением части ПК, входящей в наружные прочные цистерны), так как при расчете обычно учитывается теоретический объем;

— корпусные конструкции, находящиеся вне теоретических поверхностей ПК и не имеющие полых объемов (фундаменты в наружном корпусе, обшивка легкого корпуса);

— наружные специальные покрытия.

Равенство (5.3) можно считать справедливым для любого наружного оборудования, если под плотностью ρ_M понимать ее осредненную величину для данного вида оборудования.

Равенства (5.4) распространяются полностью или частично на любое оборудование и конструкции, имеющие плоскости или оси симметрии по форме и распределению масс. Для оборудования и конструкций с незначительным отклонением от симметрии его можно использовать, как приближенное к начальной стадии проектирования.

Таким образом, при составлении таблиц нагрузки и сводки ППО любого проекта необходимо:

— сравнить общие итоги по этим таблицам, т.е. проверить выполнение условий (5.1) и (5.2);

— проверить соответствие по отдельным слагаемым, для которых должны выполняться условия (5.3) и (5.4).

Такая проверка позволяет оценить степень устойчивости и удифференцированности подводной лодки.

5.2. Соотношения слагаемых ППО,

используемые на разных стадиях проектирования

Входящие в сводку ППО объемы можно объединить в следующие укрупненные слагаемые:

— прочный корпус;

— крупные объемы вне ПК (наружные прочные цистерны различного назначения $V_{ПКП}$, наружные части шахт и контейнеры ракетного оружия, прочная рубка, выгородка ГАС $V_{ГАС}$, наружные топливные цистерны $V_{ТЦ}$);

— мелкие объемы вне ПК (баллоны ВВД, наружные части ТА, прочные заборные трубопроводы);

— различные мелкие неучтенные объемы.

В табл. 5.2 приведены относительные значения наиболее крупных составляющих ППО для двухкорпусных и однокорпусных ПЛ, имеющих различное назначение, вид основного оружия и энергетическую установку. Для получения более стабильных зна-

чений объема V_i отнесены к постоянному плавающему объему ПЛ без учета объема наружных покрытий ($V_p = V_n - V_{\text{обол}}$) [36].

Таблица 5.2

Соотношения основных слагаемых сводки ППО (в % от V_n)

№ п/п	Назначение объектов	Слагаемые ППО				$\sum V_i$
		$V_{\text{об}}$	$V_{\text{ПК}}$	$V_{\text{КП}}$	$V_{\text{ПТ}}$	
1	ДПЛ (большая)	76-77	3-4	-	14-15	93-96
2	ДПЛ (средняя)	76-80	3	-	13-14	94-97
3	АПЛТ	92-94	2-3	-	-	94-97
4	АДПКР	87-89	1,5-4	4	-	92,5-97
5	АДПР	86-87	7-8	2-3	-	95-98
6	ДМЛ (однокорпусная)	96	0,5	-	-	96,5

Анализируя данные табл. 5.2, можно сделать следующие выводы.

1. Относительный объем прочного корпуса $\chi_{\text{ПК}}$, вообще говоря, малостабилен и составляет для рассматриваемых в таблице ПЛ величину

$$\chi_{\text{ПК}} = \frac{V_{\text{ПК}}}{V_n} \approx 0,76 - 0,96 \quad (5.5)$$

Объем ПК зависит от наличия в ППО других объемов, главным образом, наружных топливных и прочих цистерн, контейнера и шахт ракетного оружия, и расположения их относительно ПК (внутри или вне ПК). На величину $\chi_{\text{ПК}}$ влияет также архитектурный тип ПЛ.

Вместе с тем для ПЛ с однотипным вооружением и энергетикой, а также установившимся архитектурным типом величина $\chi_{\text{ПК}}$ достаточно стабильна, и ее можно использовать при проектировании, например, для приближенного определения ППО по найденному объему ПК.

2. Отношение суммы наиболее крупных объемов к V_n отличается высокой стабильностью:

$$\chi = \frac{V_{\text{об}} + V_{\text{ПК}} + V_{\text{КП}} + V_{\text{ПТ}}}{V_n} \approx 0,93 - 0,98. \quad (5.6)$$

Входящие в числитель выражения (5.6) объемы, кроме $V_{\text{об}}$, могут быть приближенно определены по статистическим данным. Выражены через водозащещение или соответствующие массы, входящие в нагрузку, а также приняты по данным задания на проектирование с учетом схемы общего расположения.

Особое внимание должно быть уделено расчету главной составляющей ППО — объему прочного корпуса $V_{\text{ПК}}$ и определению координат центра величины этого объема.

5.3. Определение объема прочного корпуса.

Измержители объемов

На ранних стадиях проектирования корабля проектант может располагать различной полной информацией относительно размещения оборудования и технических средств в прочном корпусе.

а) Известны размеры и условия обслуживания основного, наиболее крупного оборудования в отсеках. В этом случае объемы отсеков определяются путем графической проработки расположения данного оборудования. Так может быть, если двигатели выбраны по ТУ на основании первого приближения (решения уравнения нагрузки).

б) Известны лишь мощности главных двигателей, вес оборудования и технических средств. Тогда потребные объемы отсеков и помещений определяются при помощи измержителей объемов.

в) Ряд объемов помещений принимается абсолютными значениями по подводной лодке прототипу.

Таким образом, на ранних стадиях проектирования могут быть использованы два основных метода определения объема ПК: графический и аналитический.

К достоинствам графического метода определения потребного объема ПК можно отнести: во-первых, достаточную точность при определении искомой величины; во-вторых, возможность получения не только величины объема корпуса, но и его главных размеров, а также габаритов отдельных отсеков.

Для проверки принятого проектантом решения наиболее сложное с точки зрения размещения оборудования отсеки макетируются в достаточно крупном масштабе.

Основным недостатком графического метода, как уже говорилось, является высокая трудоемкость, не позволяющая рассматривать большое число вариантов проекта.

Для приближенного расчетного определения потребных объемов отсеков ПК в начальных стадиях проектирования при минимальном объеме графических работ (схема общего расположения), используют измерители объемов, которые, будучи объединены в логические группы, показывают:

1) Объемы, необходимые для размещения единицы вооружения, крупных технических средств, экипажа ($m^3/шт$, $m^3/чел$ и др.). Измерители объемов первой группы относятся к помещениям, которые не зависят от размера корабля, а определяются данными задания. Их объемы, по аналогии с разделением нагрузки ПЛ на равных стадиях проектирования, можно отнести к заданным или независимым объемам.

2) Объемы, необходимые для размещения единицы массы конкретного оборудования (m^3/t). Такие измерители, как правило, используются для однородного оборудования, например аккумуляторных батарей.

3) Объемы, приходится на единицу мощности паро- или хладопроизводительности ($m^3/kВт$, m^3/kg пара) для энергетических установок.

Перечисленные выше группы измерителей используются для определения объемов специализированных помещений и отсеков, в которых можно выделить основное оборудование. Следует также подчеркнуть, что во всех случаях под объемами необходимо понимать не только габаритные объемы основного оборудования, но и объемы, необходимые для его обслуживания и ремонта, а также неиспользуемые объемы. К последним относятся, например, части пространства между внутренними шпангоутами, которые не всегда удается использовать полностью.

Остановимся еще на двух весьма важных величинах, необходимых для определения $V_{ок}$.

Коэффициент затеснения (или плотности монтажа) представляет собой отношение собственного объема оборудования к объему помещений, в котором оно размещается:

$$\chi_{м} = \frac{V_{об}}{V_{пом}} < 1,0 \quad (5.7)$$

Данный коэффициент учитывает тот дополнительный объем, который необходим для обслуживания и ремонта оборудования. При этом необходимо учесть, что величина $\chi_{м}$ в значительной степени определяется видом оборудования и принятой схемой монтажа.

Второй величиной, используемой при определении $V_{ок}$, является условная удельная масса $v_{ок}$, которая вычисляется для конкретного оборудования или принимается средней для группы оборудования, одноименного по назначению:

$$v_{ок} = \frac{P}{V_1} \quad (5.8)$$

С помощью рассмотренных величин можно по заданной массе оборудования приблизительно определить объем помещения для его размещения с учетом объемов для обслуживания и ремонта:

$$V_{пом} = \frac{P}{\chi_{м} v_{ок}} \quad (5.9)$$

Указанные выше величины $\chi_{м}$ и $v_{ок}$ особенно удобно использовать при определении потребных объемов помещений для мелкооборудования, которого на ПЛ весьма много.

Как следует из сказанного выше, аналитический метод определения потребного объема ПК базируется на использовании большого количества статистической информации по построенным ранее кораблям.

В главе 2 уже говорилось об использовании измерителей и статистической информации. Однако в данном случае уместно напомнить, что при определении объемов ПК неграмотное использование статистических данных приводит к наибольшим погрешностям.

В качестве примера рассмотрим размещение торпедного оружия на ПЛ.

На рис.5.2 приведены схемы расположения торпедного вооружения, применяемые на подводных лодках [16], [65].

Очевидно, что для указанных схем размещения ТА и запасных торпед различными оказываются объемные характеристики. Ясно, что проектант, имеющий в распоряжении протоотипы только с одной схемой расположения ТА и решивший применить другую, не может

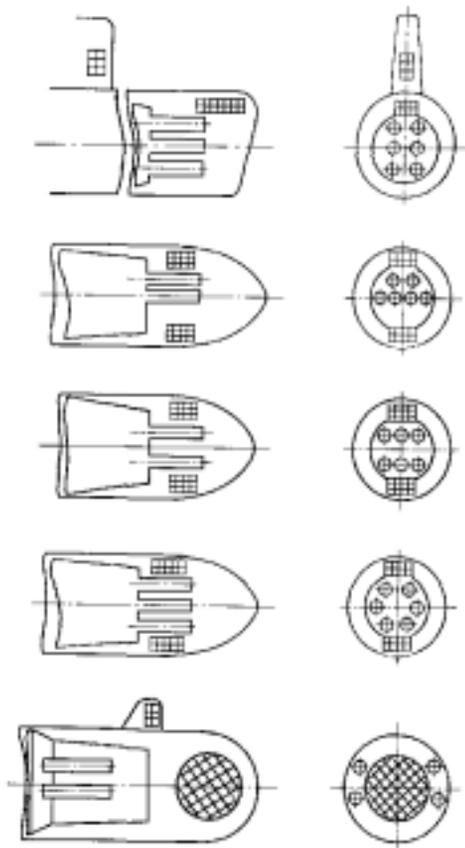


Рис. 5.2. Схемы расположения торпедного оружия на подводных лодках

получить достоверные величины объема помещения, что повлечет за собой ошибку в определении ППО.

Таким образом, используя приведенные в различных работах численные значения измерителей объема и коэффициентов, необходимо четко представлять, для каких схем расположения оборудования они получены.

Прочные корпуса современных подводных лодок России выполняются в виде цилиндрических и конических оболочек, разделенных плоскими поперечными переборками на ряд отсеков в которых размещаются корабельные помещения. Разбивка на отсеки производится исходя из минимально необходимой длины, определяемой устанавливаемым оборудованием, требований обитаемости и обеспечения заданного стандарта непотопляемости. При принятых в настоящее время диаметрах корпуса каждый отсек имеет одну-две палубы.

Отсеки нумеруются с носа в корму и именуются по назначению расположенного в нем основного оборудования (иначе говоря, по основному функциональному назначению). Как число отсеков так и их функциональное назначение на разных проектах ПЛ может отличаться т.к. зависит от класса и назначения корабля, поэтому задача компоновки отсеков при проектировании решается каждый раз anew. Вместе с тем существуют общие закономерности (требования), которые необходимо соблюдать при расположении оборудования в отсеках.

Так, расположение боевых и технических средств, устанавливаемых в отсеках ПЛ, должно обеспечивать:

- равномерное распределение нагрузки по длине корабля для возможности его удифферентовки;
- удобство и оперативность управления, контроля и обслуживания в корабельных условиях;
- свободный доступ ко всему оборудованию, для его осмотра, наладки и регулировки, а также для устранения отказов.

При принятых в настоящее время диаметрах корпуса каждый отсек имеет несколько палуб. Тяжелое оборудование необходимо располагать в нижних палубах и в трюме для обеспечения необходимой остойчивости в подводном положении.

Каждая единица оборудования или отдельное помещение (выгородка), независимо от их значимости, преимущественно должны размещаться в наиболее подходящих для них местах. При невозможности размещения всего состава оборудования в определенном отсеке

или районе, предпочтение следует отдавать более важному для обеспечения эффективности корабля в целом, а для менее важного оборудования находить компромиссные решения и другие районы установки.

Хотя каждый отсек имеет свое основное функциональное назначение (отраженное в названии), это не значит, что в нем размещается только то оборудование, которое относится к основной функции отсека. Так, например, носовой отсек - торпедный, однако в нем размещается и другое оборудование, не относящееся к торпедному комплексу.

Каждый отсек ПЛ является автономным. Экипаж должен иметь возможность выполнять свои функции по управлению кораблем и его системами в полностью герметизированном отсеке. Это означает, что в каждом отсеке должны быть предусмотрены автономные средства жизнеобеспечения и средства борьбы за живучесть.

Приведенные выше соображения частично отражают только основные, наиболее общие принципы компоновки оборудования в отсеках. Полностью все многочисленные факторы, влияющие на компоновку, в том числе сложные взаимосвязи между различным оборудованием, могут быть учтены, а возникающие противоречия удовлетворительно разрешены только в процессе разработки общего расположения конкретного проекта подводной лодки.

Рассмотрим в качестве примера разбивку на отсеки и расположение основного оборудования в них на современной дизель-электрической подводной лодке (рис.5.3).

Первый отсек - торпедно-аккумуляторный, разделен двумя палубами.

На верхней палубе размещаются торпедные аппараты и стеллажи для запасных торпед. Здесь же находится местный пост управления торпедной стрельбой и размещены приборы автоматического управления ТА, а также гидроприводы судовых устройств, расположенных в носовой части надстройки.

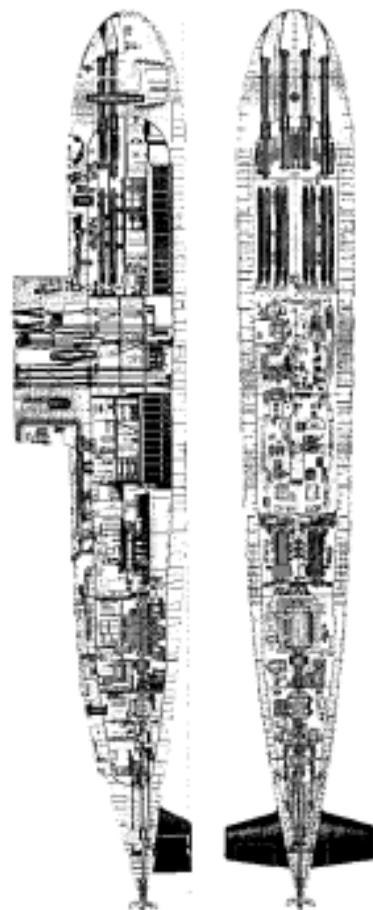


Рис. 5.3. Длинно-тоннельная подводная лодка проекта 636.

На средней палубе расположены жилые помещения (каюты экипажа, кают-компания, каюты командира и врача), санитарно-бытовые помещения, пост резервного управления средними горизонтальными рулями, пост управления и контроля АБ, а в выгородке - станция ВПЛ.

В трюме находятся: аккумуляторная батарея и носовая дифференциальная цистерна, торпедоместительная цистерна, а также цистерна грязной воды.

Второй отсек - центральный (отсек управления).

В нем на первой палубе располагается главный командный пост (ГКП).

На второй палубе расположена рубка гидролокации, гидропост, оборудование системы кондиционирования и агрегатная, в которой располагаются преобразователи и распределительные щиты электрических сетей.

В трюме - провизионные кладовые и различные трюмное оборудование (главный осушительный насос, насосы системы гидравлики, трюмная помпа).

Третий отсек - жилой-аккумуляторный разделен двумя палубами; на верхней и средней палубах находится каюта, санитарно-бытовые помещения и каюты личного состава, в выгородках - оборудование кондиционирования; в трюме - аккумуляторная батарея.

Четвертый отсек - дизель-генераторный. В нем размещены дизель-генераторы, электрокомпрессор, распределительный щит, пост управления дизель-генераторами. В трюме - оборудование, обслуживающее дизель-генераторы цистермы грязной воды, топлива и циркуляционного масла.

Пятый отсек - электромоторный. В нем установлен главный гребной электродвигатель, пост управления электрооборудованием энергетической установки, ШПМ, опорный подшипник.

Шестой отсек - кормовой. В нем размещены электродвигатель экономического хода и два резервных электродвигателя побортно, резервный пост управления РДК, приводы рулей и резервный пост управления рулями, станция ЛОХ и ВПЛ. В трюме - насос системы гидравлики, топливная цистерна и кормовая дифференциальная.

Таким образом объем прочного корпуса подводной лодки, как видно из выше изложенного, может быть представлен суммой объемов отсеков и помещений, необходимых для размещения оборудования, технических средств и экипажа:

$$V_{об} = \sum_{i=1}^n V_i = V_{13} + V_{14} + V_{15} + V_{16} + V_{17} + V_C + V_{УСТ} + V_{ЭО} + V_{ЖП} + V_{ГКП} + V_{МДТ} + V_{МСС} + V_{МБ} \dots + V_{107} \quad (5.10)$$

- где V_{13} — объем отсека торпедного вооружения;
 V_{14} — объем отсека ракетного вооружения;
 V_{15} — объем помещений радиоэлектронного вооружения;
 V_{16} — объем отсеков энергетической установки;
 V_C — объем помещений судовых систем;
 $V_{УСТ}$ — объем помещений судовых устройств;
 $V_{ЭО}$ — объем помещений электрооборудования;
 $V_{ЖП}$ — объем жилых помещений, занятых экипажем и пассажирами;
 $V_{ГКП}$ — объем главного командного поста;
 $V_{МДТ}$ — объем акустических покрытий внутри ПК;
 $V_{МСС}$ — объем помещений выдвижных устройств;
 $V_{МБ}$ — объем внутренних цистерн вспомогательного баллиста;
 V_{107} — объем цистерн, обеспечивающих работу энергетической установки подводной лодки.

Рассмотрим определение перечисленных выше слагаемых объема ПК.

Объем отсека торпедного вооружения V_{13}

Габариты торпедного отсека, а следовательно, и его объем определяются суммарной длиной казенной части торпедного аппарата, запасными торпедами и зазорами для открывания задней крышки ТА и размещения устройства быстрого зарядания (УБЗ).

Диаметр отсека может определяться количеством запасных торпед, а также сменной расположенной, типом, калибром и количеством ТА. При этом необходимо учитывать потребные объемы ПК на размещение цистерн, обслуживающих торпедное оружие.

Таким образом, объем, необходимый для размещения торпедного вооружения, складывается из следующих составляющих:

$$V_{13} = V_{КА} + V_{П} + V_{УСТ} \quad (5.11)$$

где $V_{КА}$ — объем помещения, занимаемый казенными частями торпедных аппаратов;

$V_{ст}$ — объем помещения, занимаемый запасными торпедами;

$V_{шт}$ — объем цистерн, обслуживающих торпедный комплекс.

Объем ПК, необходимый для размещения казенных частей ТА может быть определен по зависимости:

$$V_{ПК} = v_1 n_{ТА} \quad (5.12)$$

где v_1 — объем, занимаемый одной ТА;

$n_{ТА}$ — число ТА.

На большинстве ПЛ торпедное вооружение располагает только в носовой оконечности по традиционной схеме, при которой ТА ориентированы параллельно диаметральной плоскости ПЛ (рис. 5.4). В этом случае для основного принятого калибра — (533 мм) $v_1 = 10,0 \text{ м}^3/\text{та}$. [32], [54], [68].

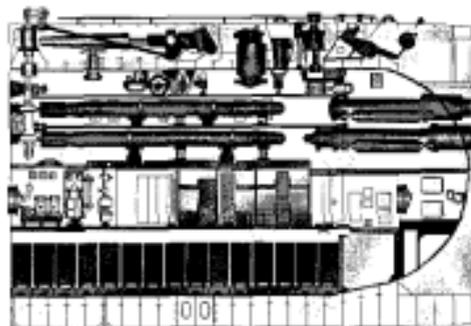
Рост габаритов гидроакустических приборов и повышение требований к снижению уровня помех в местах их установки в некоторых случаях требует смещения торпедных аппаратов из первого отсека в корму и расположение их под углом $10\text{--}14^\circ$ к ДП. При данной схеме расположения величина v_1 для основных калибров торпед достигает $v_1 = 12,5\text{--}14,5 \text{ м}^3/\text{та}$.

На ПЛ могут применяться наружные торпедные аппараты, что позволяет повысить мощность торпедного залпа, не увеличивая объема ПК. При размещении ТА в междубортном пространстве их вклад в ППО можно оценить по зависимости (5.12), однако численные значения знаменателя v_1 будут соответствовать объему всего торпедного аппарата.

Объем, необходимый для размещения и обслуживания запасных торпед, зависит от типа стеллажа. Так, в случае запасных торпед, размещенных на амортизированных стеллажах с УБЗ параллельно ДП, объем помещения, приходящийся на одну запасную торпеду, составляет соответственно $v_2 = 12,5\text{--}25 \text{ м}^3$, а для торпед, размещенных под углом к ДП, $v_2 = 15\text{--}30 \text{ м}^3$. Тогда занимаемый запасными торпедами объем равен:

$$V_{ст} = v_2 n_{ст} \quad (5.13)$$

а)



б)

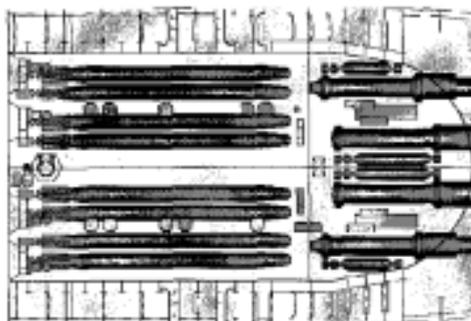


Рис. 5.4. Торпедный отсек ПЛ
а) продольный разрез, б) план по палубе.

К цистернам, обслуживающим торпедные аппараты, относятся торпедозаместительные (ТЗЦ), кольцевого зазора (ЦЗЗ) и беспузырной торпедной стрельбы (БТС). Указанные цистерны могут располагаться как в ПК, так и вне его. Торпедозаместительные цистерны предназначены для замещения отсутствующих на ПЛ или неработающих торпед. Объем торпедозаместительных цистерн определяется следующей зависимостью:

$$V_{\text{ТЗЦ}} = \frac{1}{\rho} n P_T + V_{\text{из}} \quad (5.14)$$

где P_T — масса единицы боезапаса;

n — количество запасного боезапаса;

$V_{\text{из}}$ — непроизводительный объем, состоящий из объема остаточной воды («мертвой записи») в ТЗЦ и объема, учитывающего проходившие в цистерме трюмные трубопроводы. Торпедозаместительные цистерны должны размещаться в трюме поборто с центром тяжести по длине близким к центру тяжести запасных торпед. По высоте ТЗЦ располагаются на одном уровне с цистернами кольцевого зазора или ниже их, чтобы при осушении торпедных аппаратов обеспечивался естественный перепад воды из ЦЗЗ в ТЗЦ.

Цистерны кольцевого зазора служат для хранения воды, предназначенной для заполнения кольцевого зазора торпедных аппаратов. Объем цистерны кольцевого зазора определяется по формуле

$$V_{\text{ЦЗЗ}} = (V_{\text{та}} - V_{\text{з}}) n + V_{\text{из}} \quad (5.15)$$

где $V_{\text{та}}$ — внутренний объем торпедного аппарата;

$V_{\text{з}}$ — минимальный объем боезапаса каждого калибра;

n — количество торпедных аппаратов;

$V_{\text{из}} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5$ — непроизводительный объем состоящий из следующих объемов:

V_1 — объема воды в трубопроводах от цистерны кольцевого зазора до торпедных аппаратов;

V_2 — объема воды, который выливается из ЦЗЗ в ТЗЦ при взрывах и дифферентах;

V_3 — объема остаточной воды в цистерне;

V_4 — объема, учитывающего установку перекусных клапанов из ЦЗЗ в ТЗЦ;

V_5 — объема воды, перетекающего из ЦЗЗ в ТЗЦ.

На ранних стадиях проектирования непроизводительными объемами можно пренебречь. Цистерны кольцевого зазора должны размещаться под торпедными аппаратами, чтобы в случае необходимости обеспечивался естественный слив воды из торпедных аппаратов.

Цистерна беспузырной торпедной стрельбы предназначена для стративания воздушного пузыря и приема воды частично компенсирующей отрицательную плавучесть торпед. Цистерна БТС при малых глубинах стрельбы выполняется легкой и располагается в ПК. Ее объем в этом случае равен:

$$V_{\text{БТС}} = (3,0 + 4,0) \left(\frac{V_T}{\rho} - P_T \right) n_{\text{та}}, \quad (5.16)$$

где $\left(\frac{V_T}{\rho} - P_T \right)$ — отрицательная плавучесть торпеды.

В случае стрельбы с больших глубин цистерна БТС выполняется прочной и может располагаться как внутри прочного корпуса, так и в междубортном пространстве. В этом случае объем цистерны равен:

$$V_{\text{БТС}} = (3,0 - 4,0) n_{\text{та}}. \quad (5.17)$$

Если все цистерны торпедного комплекса расположены в ПК, то объем $V_{\text{ПК}} = V_{\text{та}} + V_{\text{из}} + V_{\text{БТС}}$ необходимо учесть при проектировании корпуса.

Объем отсека ракетного оружия $V_{\text{ро}}$ можно определить по зависимостям, аналогичным (5.12)–(5.17), или по зависимости

$$V_{\text{ро}} = 0,785 d_{\text{та}}^2 d_{\text{аи}} (kn_{\text{аи}} + b), \quad (5.18)$$

где $n_{\text{аи}}$ — количество шахт по длине в ряду;

k и b — численные коэффициенты, принимаемые по прототипу.

Статистическая обработка данных по зарубежным АПЛ с баллистическими ракетами позволяет заключить, что для ракет класса "Посейдон" одна стартовая шахта с учетом потребного объема на приборы управления стрельбой занимает 120–150 м³ [16].

На ранних стадиях проектирования ПЛ указанные выше объемы $V_{\text{из}}$ и $V_{\text{ро}}$ по аналогии с нагрузкой можно считать заданными, так как состав вооружения уже известен.

Объем отсека дизельной (дизель-электрической) установки $V_{\text{дэу}}$

В зависимости от располагаемой информации объем дизельного отсека можно определить различными путями.

Первый заключается в определении минимально допустимых размеров отсека по методу предельных габаритов. В данном случае считается, что минимально допустимый диаметр ПК в районе дизелей определяется следующими условиями:

- высота отсека должна допускать снятие крышек, а также выемку поршней и штулки рабочих цилиндров двигателя с учетом расположения подъемных устройств;

- между двигателями должен быть обеспечен нормальный проход, а между бортом и двигателем — пролаз для человека;

- необходимость обеспечения конструктивно приемлемых размеров фундаментов и естественного стока масла из картера в шлангеру.

Длина дизельного отсека определяется длиной выбранного двигателя и минимально допустимыми расстояниями от него до переборок отсека (рис. 5.5).

Расстояние a от кормовой переборки до фланца коленчатого вала двигателя, необходимое для размещения разобщительной муфты (ШПМ) и переборочного сальника, определяется пропорционально мощности двигателя. Длина участка e , — от навесных частей двигателя до носовой переборки отсека, связана с принятой компоновкой в отсеке. При прямой работе двигателя на линию вала указание выше расстояния от дизеля до переборки отсека лежат в пределах: $a = 1,2—1,5$ м; $e = 1,5—2$ м. При применении схемы чистого электродвигателя данные величины меньше, $a = e = 1,0—1,2$ м.

Следует иметь в виду, что приведенные величины a и e являются минимально необходимыми. Зная габаритные размеры отсека, можно определить и его объем. Обычно отношение длины отсека к длине дизеля $L_{20}/L_{22} = 1,8—2,0$ [36].

Второй путь используется в том случае, если двигатель, предполагаемый к установке, неизвестен. Тогда, используя объемные измерители, можно в первом приближении определить объем данного отсека:

$$V_{20} = v_{20} \sum_i N_{2i} = v_{20} \frac{\vartheta_{220}^2 (k_{221} V_{22})^{2/3}}{C_{L_{20ax}}}, \quad (5.19)$$

где $v_{20} = 50—55$ л/кВт.

k_{221} — коэффициент перехода от нормального водонизмещения к полному подводному.

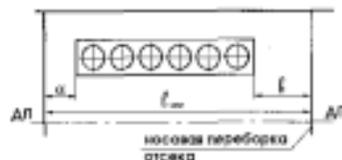
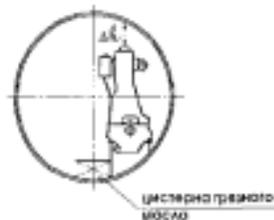


Рис. 5.5. Схема расположения дизеля в дизельном отсеке

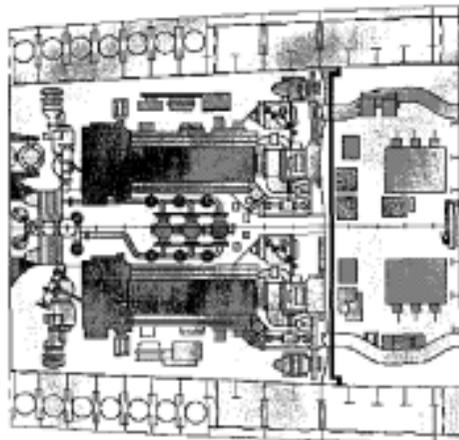


Рис. 5.6. Дизель-генераторный отсек подводной лодки

При использовании принципа полного электродвижения (рис.5.6) длина динель-генераторного отсека (при размещении побортно) может быть определена по зависимости:

$$L_{дг} = 0,10 N_{дг}^k + b, \quad (5.20)$$

где b — численный коэффициент, принимаемый по протоколу.

Электромоторный отсек

Для электромоторного отсека диаметр определяется диаметром привагонного электродвигателя и расположением щитов управления (рис.5.7).

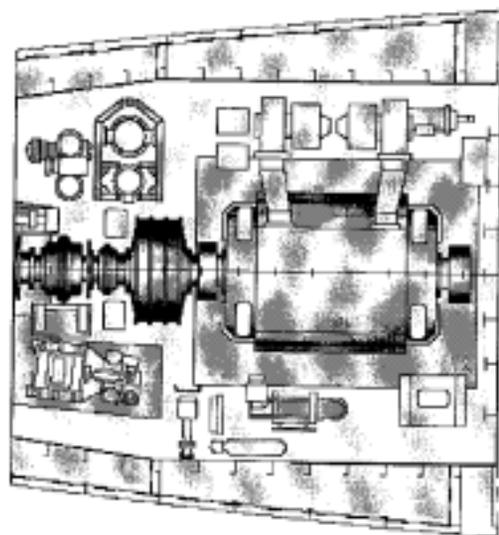


Рис.5.7. Электромоторный отсек подводной лодки

Длину электромоторного отсека $L_{эм}$ в первом приближении можно найти из следующих соотношений

$$L_{эм} / L_{дг} = 1,7—1,9, \quad (5.21)$$

$$L_{эм} = 0,35 N_{дг}^k + b \quad (5.21a)$$

Если двигатель неизвестен, то

$$v_{эм} = v_{эл} \sum N_{дг} = v_{эм} \frac{9^k \frac{1}{4} \pi m (k_{т1} V_0)^{0,1}}{C_{дтэм}}, \quad (5.22)$$

где $v_{эм} = 40,5—44,5$ л/кВт

Объем аккумуляторных ям (АЯ) должен выбираться исходя из возможности размещения привагонной АБ. При этом необходимо предусмотреть дополнительные объемы для обслуживания элементов АБ. Таким образом, габариты ямы в первую очередь зависят от типа аккумуляторов и их размеров, а также способа обслуживания элементов АБ, которое может производиться либо из проходов между элементами, либо с тележек, передвигающихся над ними.

Существует два метода определения потребного объема АЯ. Первый основывается на знании типа АБ и ее состава. В этом случае определяются габариты, а затем и объем АЯ (рис. 5.8).

Ее ширина определяется количеством элементов n в ряду и зазорами между ними, а также количеством и шириной проходов, при их наличии, необходимых для обслуживания элементов. Как правило, делается один-два прохода. Ширина прохода принимается равной наименьшему размеру элемента плюс зазор, необходимый для свободного перемещения элементов по проходу при их погрузке и выгрузке.

Следует также учесть зазоры между стенками аккумуляторных ям и крайними элементами.

Ширина аккумуляторной ямы определяется по формуле:

$$b_{АЯ} = mb_{пр} + n\beta_{эл} + \Delta b_1 + (n-1) + 2\Delta b_2, \quad (5.23)$$

где m — число проходов;

$b_{пр}$ — ширина прохода;

n — число элементов в ряду;

β — ширина элемента;

Δb_1 — зазор между элементами по ширине АЯ;

Δb_2 — зазор между стенками АЯ и крайними элементами.

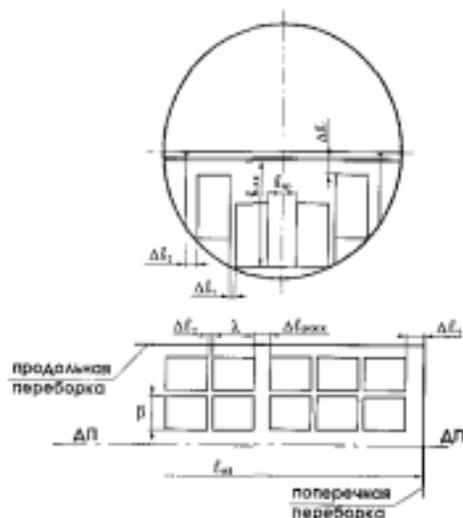


Рис. 5.8 Условная схема расположения элементов АБ в аккумуляторной яме при их обслуживании из проходов

Длина аккумуляторной ямы определяется количеством элементов, зазорами между элементами, а также зазорами между крайними элементами и поперечными переборками. Величина этих зазоров принимается такой же, как и при определении ширины АЯ. Во избежание смещения элементов производится их расклинка через каждые 2-3 поперечных ряда, что приводит к увеличению зазоров между элементами в этих местах. Выражение для определения длины АЯ запишется следующим образом:

$$l_{\text{АЯ}} = n l_{\text{эл}} + m b_{\text{пр}} + \Delta l_1 + \frac{n}{3} \Delta l_{\text{раск}} \quad (5.24)$$

где Δl_1 — зазор между элементами по длине АЯ;

$\Delta l_{\text{раск}}$ — зазор на расклинку элементов.

Высота аккумуляторной ямы зависит от типа и способа обслуживания аккумуляторной батареи (рис. 5.9).

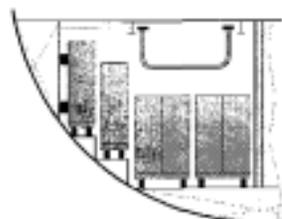
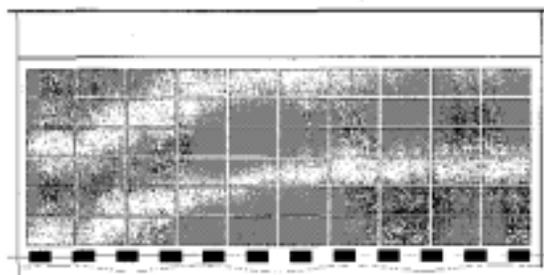
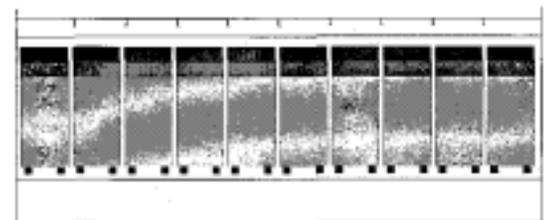


Рис. 5.9 Расположение элементов АБ в аккумуляторной яме при их обслуживании с телескопов

Если обслуживание ведется из проходов, то расстояние от верхней плоскости зажимных болтов до бимсов встала должно обеспечивать возможность обслуживания аккумуляторов. При этом высота в проходе должна обеспечивать проход личного состава. При обслуживании с тележек указанное расстояние, как правило, несколько больше, но объем АЯ в целом меньше за счет отсутствия проходов.

Учитывая высоту деревянного обрешетника или резиновых амортизаторов под каждым элементом, высота каждого яруса аккумуляторной ямы определяется как:

$$h_{\text{я}} = h_{\text{ст}} + h_{\text{ам}} + \Delta h, \quad (5.25)$$

где $h_{\text{я}}$ — высота элемента;

$h_{\text{ам}}$ — высота амортизатора;

Δh — высота над элементом АБ для их обслуживания.

Второй путь расчета объема АЯ предполагает использование объемного измерителя:

$$v_{\text{я}} = \frac{V_{\text{АБ}}}{P_{\text{АБ}}} \approx 0,95 \cdot 12,0 \text{ м}^3/\text{Вт}, \quad (5.26)$$

В этом случае можно определить только объем АЯ, потому что использование для этого зависимости $V_{\text{АБ}} = v_{\text{АБ}} P_{\text{АБ}}$ (5.26) можно рекомендовать лишь на самых ранних стадиях проектирования ПЛ.

Атомная энергетическая установка комплектуется в нескольких специализированных отсеках прочного корпуса:

- реакторном (в т.ч. оборудование паропроводящей установки);
- турбинном (главный турбозубчатый агрегат, турбогенераторы и обслуживающие его механизмы);
- вспомогательных механизмов (аварийные дизель-генераторы и т.д.).

При реальном проектировании энергетическая установка выбирается из стандартного ряда, соответственно габариты и объемы отсеков определяются данными установки. На ранних стадиях проектирования так бывает не всегда. В этих случаях пользуются объемными измерителями, которые показывают потребный объем на единицу мощности. На рис. 5.10 показан характер изменения объемных измерителей ПТУ и ПТУ в зависимости от мощности установки [10], [26].

Таким образом, зная мощность установки, можно приблизительно определить объем отсеков ПТУ и ПТУ.

$$V_{\text{ПТУ}} = v_{\text{ПТУ}} N = v_{\text{ПТУ}} \frac{\Phi_{\text{дmax}}^2 (k_{\text{дт}} V_{\text{д}})^{2,7}}{C_{\text{дmax}}}; \quad (5.27)$$

$$V_{\text{ПТУ}} = v_{\text{ПТУ}} N = v_{\text{ПТУ}} \frac{\Phi_{\text{дmax}}^3 (k_{\text{дт}} V_{\text{д}})^{2,5}}{C_{\text{дmax}}}. \quad (5.27a)$$

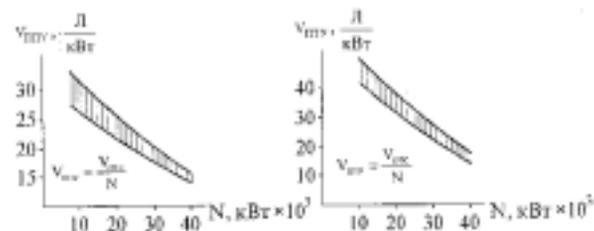


Рис. 5.10. Зависимость измерителей $V_{\text{ПТУ}}$ и $V_{\text{ПТУ}}$ от мощности атомной установки

Иногда используют обобщенный измеритель объема атомной энергетической установки, который по статистическим данным составляет $V_{\text{АЭУ}} = 43\text{—}48$ лкВт. Тогда объем ПК, необходимый для размещения всей энергетической установки определится по формуле

$$V_{\text{ПК}} = v_{\text{АЭУ}} N = v_{\text{АЭУ}} \frac{\Phi_{\text{дmax}}^2 (k_{\text{дт}} V_{\text{д}})^{2,7}}{C_{\text{дmax}}}. \quad (5.28)$$

Объем помещений, занимаемых экипажем в зависимости

На современных ПЛ объем помещений, приходящийся на одного члена экипажа устанавливается санитарными нормами. При увеличении диаметра ПК увеличивается число палуб и объем его используется более рационально. Нормы свободного объема, приходящегося на одного члена экипажа, в зависимости от числа палуб приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Количество шлюз	Объем на 1 члена экипажа (м ³)
2	6—7
3	10—15

На рис. 5.11—5.15 в качестве примера приведены возможные компоновки жилых помещений на ПЛ [40], [41].

Непосредственно с численностью экипажа и проектной автономностью ПЛ связаны объемы провизионных кладовых, а также цистерн пресной (питьевой и мыльевой) и грязной воды.

Провизионные кладовые на подводных лодках подразделяются на высокотемпературные (t от -12°), охлаждаемые с $t = -5^{\circ}$ и низкотемпературные с $t = t$ отсека. Расчет объемов кладовых (брутто) необходимо производить для каждого типа кладовых по зависимости

$$V_{\text{клад}}^{\text{бр}} = k_{\text{исл}} \cdot k_{\text{н}} \cdot V_{\text{н}} \cdot n \cdot A, \quad (5.29)$$

где $k_{\text{исл}}$ — 1,8—6,5 — коэффициент, учитывающий оборудование и изоляцию кладовых;

$k_{\text{н}}$ — 1,0—1,2 — коэффициент, учитывающий аварийный (неприкосновенный) запас провизии;

$V_{\text{н}}$ — численные значения объема провизии за одного человека в сутки (с учетом тары) для каждого типа кладовых;

n — численность экипажного состава;

A — автономность.

Объем цистерн пресной воды (нетто) вычисляется

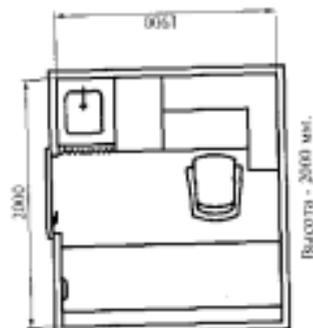
$$V_{\text{цпр}}^{\text{н}} = V_{\text{цпр}}^{\text{п}} + V_{\text{цпр}}^{\text{м}} = (v_{\text{пр}} + v_{\text{м}}) \cdot n \cdot A = \sum_{i=1}^k v_i \cdot n \cdot A, \quad (5.30)$$

где $V_{\text{цпр}}^{\text{п}}$ — объем цистерн питьевой воды;

$V_{\text{цпр}}^{\text{м}}$ — объем цистерн мыльевой воды;

$v_{\text{пр}}$ и $v_{\text{м}}$ — суточные расходы питьевой и мыльевой воды на одного человека.

На дизельных ПЛ с опреснительной установкой должен быть обеспечен суммарный расход пресной и опресненной воды не менее 15 литров на одного человека в сутки, из них не менее 6 литров — на питьевые нужды.



Высота — 2000 мм.

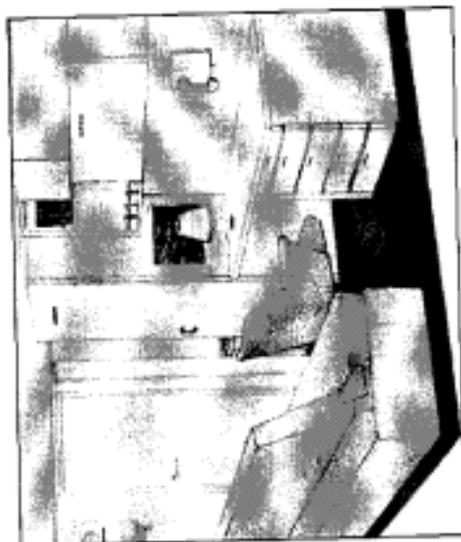
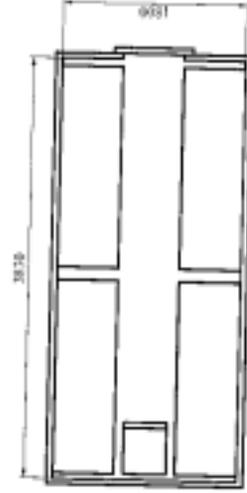
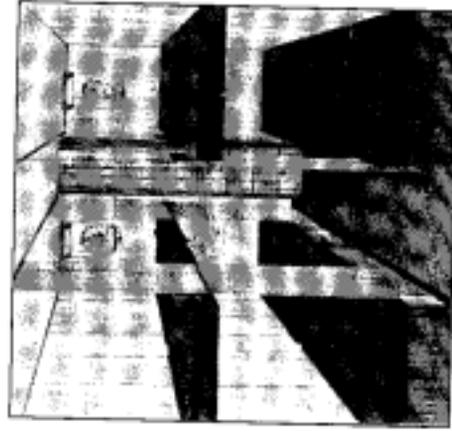
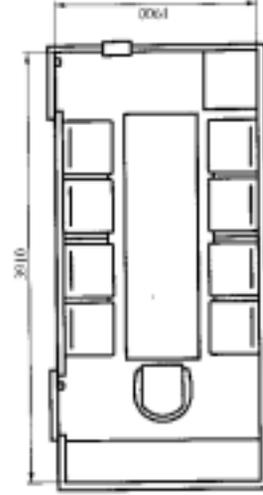
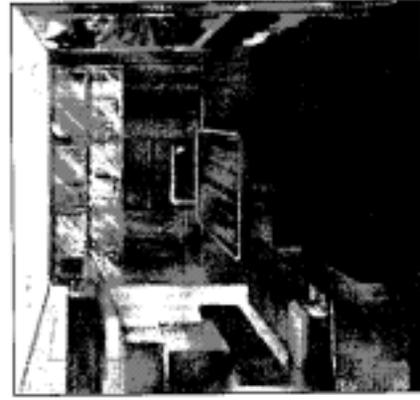


Рис. 5.11. Каюта командира



Высота - 2000 мм.

Рис. 3.12. Восемнадцатая каюта



Высота - 2000 мм.

Рис. 3.13. Каюта-комната

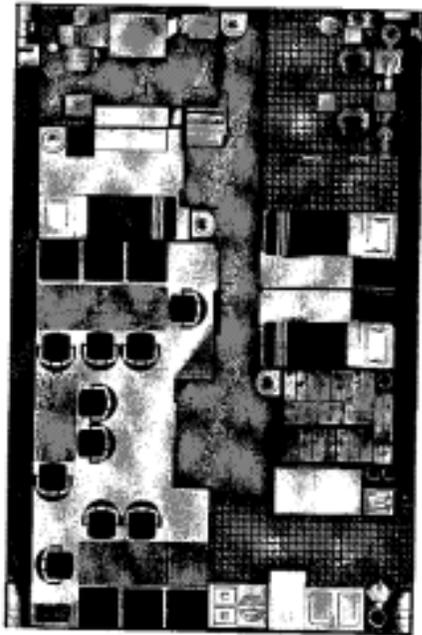


Рис. 5.14. Жилые комплексы подземной лодки проекта "Амур 1650". 1-4 этажи

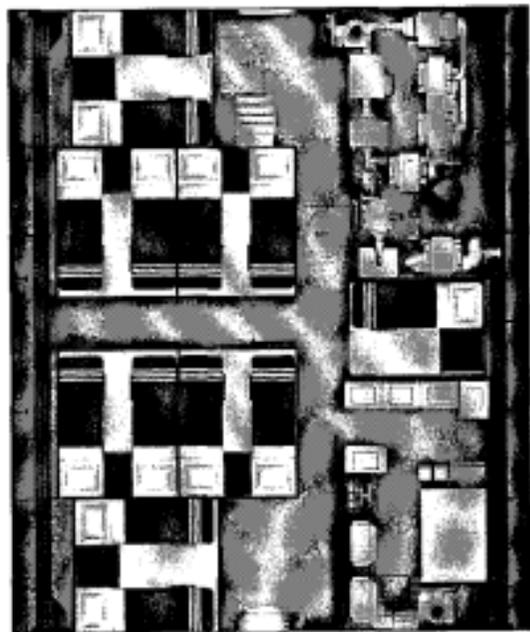


Рис. 5.15. Жилые комплексы подземной лодки проекта "Амур 1650". 2-4 этажи

Объем резерви грязной воды определяется по формуле:

$$V_{грз} = v_{грз} \cdot t, \quad (5.31)$$

где $v_{грз} = 60-65$ л/чел. в сутки — расчетная норма сточных вод;

t — время, в течение которого подводяная лодка может находиться в зоне с запрещенным сбросом грязных вод.

Таким образом, объем помещений прочного корпуса, занятый командой и запасами, будет равен

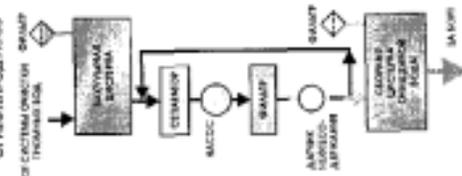
$$V_{кор} = V_{ст} + V_{пос} + V_{инв} + V_{грз}. \quad (5.32)$$

Одной из задач проектирования подводных лодок в настоящее время является радикальное решение вопросов охраны окружающей среды при эксплуатации корабля. Для предотвращения загрязнения окружающей среды современные российские дизель-электрические подводные лодки оснащаются комплексом систем экологической обработки и очистки продуктов жизнедеятельности экипажа (рис. 5.16) [107]. В первом приближении потребный объем, необходимый для размещения указанного комплекса систем, можно принять абсолютной величиной, $V_{эко} \cong 3,0-5,0 \text{ м}^3$.

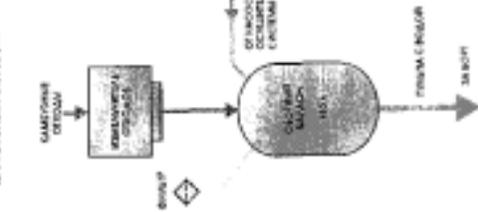
Прочие объемы прочного корпуса

Объемы иных помещений прочного корпуса, занимаемые различным оборудованием, могут быть рассчитаны по простейшим зависимостям, связывающим объемы указанных помещений либо с объемом прочного корпуса, либо с постоянным плавучим объемом. К таким помещениям относятся помещения главного командного поста — $V_{кп}$ (рис. 5.17—5.20), помещений систем — V_c , устройств — $V_{уд}$, электрооборудования — $V_{эо}$, радио-электронного вооружения — $V_{эв}$. На начальных стадиях проектирования выделить определяющее оборудование по указанным помещениям обычно трудно. Как правило, полные объемы либо определяются графической проработкой, либо принимаются по протипу. Обработка статистических материалов позволила получить приближенные зависимости для расчета объемов данных помещений, приведенные в табл. 5.4.

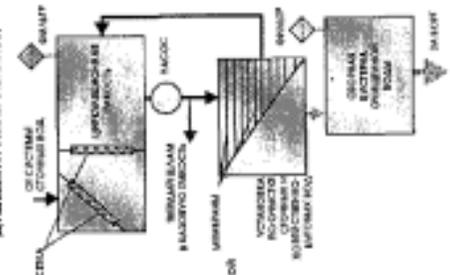
1. СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ТРОЧНЫХ ВОД ОТ НЕОТРАЩЕННЫХ



2. СИСТЕМА ВЫДЕЛЕНИЯ ГАССОВЫХ СЕРВИСОВ



3. СИСТЕМА ОБРАБОТКИ КАЧЕСТВЕННО-ВЫСОКИХ И СТОЧНЫХ ВОД (ИЗ ДАЛЬНИХ ДУШЕВЫХ И УМЫВАЛЬНИКОВ)



4. УСТАНОВКА ДЛЯ ПРИСВОЕНИЯ ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА И ПРОДУКТИВНОЙ ТАМ (КОРМОК, БАКОВ)



СВЕРХСВЯЖАЮЩАЯ ПЛОЩАДЬ
УМЫВАЛЬНИКОВ
СЕРВИСОВ
СЕРВИСОВ
СЕРВИСОВ
СЕРВИСОВ
СЕРВИСОВ

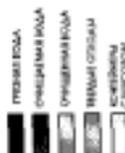


Рис. 5.16 Система, обеспечивающая экологическую чистоту подводной лодки



Рис. 3.77. Главный командный пункт ПЛ проекта 877 ЗРКМ

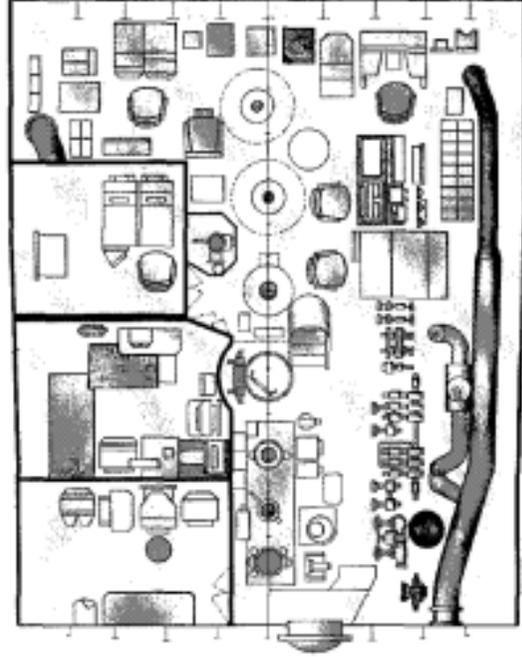


Рис. 3.78. Главный командный пункт ПЛ проекта 877 ЗРКМ. План



Рис. 3.19. Главный командный пункт ПЦ проекта "Амур 1630".

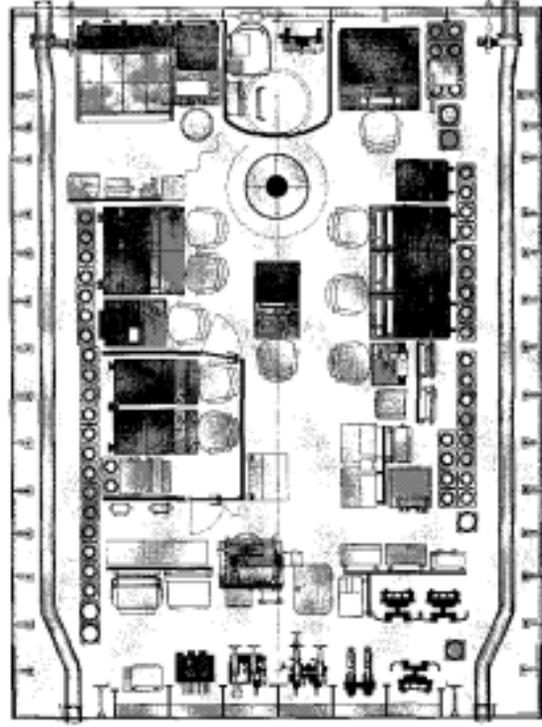


Рис. 3.20. Главный командный пункт ПЦ проекта "Амур 1630". План

Таблица 5.4

Прочие объемы прочного корпуса подводной лодки

№ п/п	Назначение помещений	Расчетная формула	Место расположения
1	Объем командных ТКП	$V_{ТКП}=0,03V_{\text{вн}} \cdot 17,6$	III
2	Объем, необходимый для жидкостных устройств	$V_{\text{жидк}}=0,008V_{\text{вн}} \cdot 6,0$	III
3	Объем, необходимый для судовых устройств	$V_{\text{судов}}=0,007V_{\text{вн}} \cdot 14$	По всему кораблю
4	Объем, необходимый для судовых систем	$V_{\text{сис}}=0,1-0,15V_{\text{вн}}$	По всему кораблю
5	Объем, необходимый для электрооборудования	$V_{\text{эл}}=0,08-0,1V_{\text{вн}}$	По всему кораблю
6	Объем аккумуляторов батарей вентр ПК	$V_{\text{акб}}=0,0015-0,0025V_{\text{вн}}$	По всему кораблю
7	Объем командной РЭВ	$V_{\text{РЭВ}}=0,03V_{\text{вн}} \cdot 1,08$	1-й и 2-й отсеки, III

В настоящее время проникающие через прочный корпус выдвинутые устройства заменяются на непроходящие (телескопического типа) (рис. 5.21.) Это позволило на ДЭПЛ IV поколения разработать расположение пульта управления в помещении главного командного поста более рационально и полнее учесть требования эргономики (см. рис. 5.19. и 5.20.).

Объем цистерн вспомогательного балласта

К цистернам вспомогательного балласта относятся уравнительные, дифференциальные и быстрого погружения. Перечисленные цистерны могут располагаться как в ПК, так и в междубортном пространстве (рис. 5.22).

Потому при расчете объема ПК уже на начальных стадиях проектирования необходимо определиться с их местоположением. Объем цистерны быстрого погружения составляет обычно 0,5%—1,0% от нормального водоизмещения и определяется временем быстрого погружения, дифференциальных цистерн — до 1,0%, уравнительных цистерн — от 2,0% до 4,0%. Таким образом, суммарный объем цистерн вспомогательного балласта на ранних стадиях проектирования можно подсчитать как:

$$V_{\text{цис}} = k_{\text{ПК}} V_{\text{вн}}, \quad (5.33)$$

где $k_{\text{ПК}} = 0,055-0,060$.

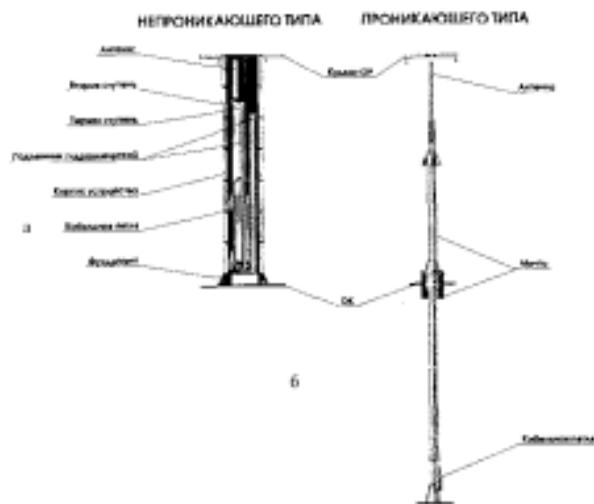


Рис. 5.21. ПМУ антенны радиосвязи.

а — непроходящего типа, б — проникающего типа

При дальнейшей разработке проекта объем этих цистерн определяется на основании расчета замещения переменных грузов.

Объем цистерн, обеспечивающих работу энергетической установки подводной лодки

К цистернам, обеспечивающим работу дизельных, дизель-генераторных установок, компрессорных станций и аккумуляторных батарей относятся:

- топливные цистерны;
- цистерны сточного топлива;
- цистерны чистого масла;
- цистерны грязного масла;
- цистерны продувки компрессоров;
- цистерны компрессорного масла;
- цистерны дистиллированной воды.

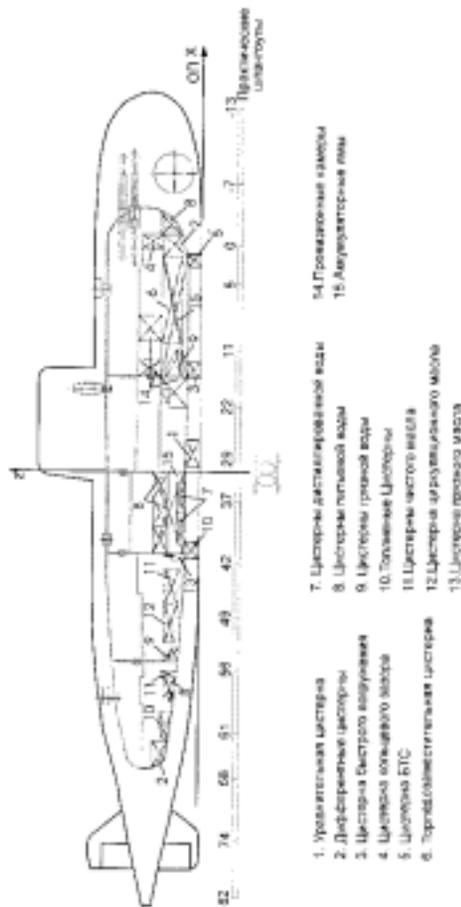


Рис. 3.22. Цистерны внутри прочного корпуса

Топливные цистерны разделяются по расположению на внутренние и наружные (междобортные) цистерны. Объем наружных топливных цистерн "брутто" можно определить, используя зависимость (3.64), исключив из нее коэффициент $k_{вн}$

$$(V_{тн})_{вн} = k_{вн} \frac{P_1}{\rho_1} = k_{вн} \frac{z}{\rho_1} g_T k_T \frac{R_{кш} \theta_{кш}^2}{C_{кш}} (k_{ш} V_0)^{1,5} \quad (3.34)$$

Остальное топливо размещается в прочном корпусе и должно учитываться при определении объема ПК.

Цистерны сточного топлива предназначены для слива воды и топлива, выходящих из всех цистерн через пробные и вентиляционные трубопроводы, а также для слива отстоя из расходных баков. На ранних стадиях проектирования объем цистерн сточного топлива принимается равным около 1,0 – 2,0 м³. На этапах технического и рабочего проектов объем цистерны рассчитывается таким образом, чтобы обеспечить сбор и хранение всех возможных протечек топлива за период похода, так как цистерна осушается только в базе. Цистерну сточного топлива необходимо располагать в трюме дизельного отсека ниже источников слива.

Цистерна чистого масла служит для хранения чистого масла и размещается в отсеках где находятся основные его потребители. Запас чистого масла для подводных лодок принимается, как правило, от 4,0 до 7,0% от полного запаса топлива.

Цистерны грязного масла предназначены для сбора и хранения в них грязного масла. На начальных стадиях проектирования объем цистерн грязного масла принимается равным 10–20% от объема цистерн чистого масла. На стадии технического проекта объем цистерн рассчитывается исходя из обеспечения сбора и хранения всех возможных протечек масла за полную автономность ПЛ, а также полную замену масла в одном из двигателей в случае аварии. Цистерны должны размещаться в трюме энергетических отсеков ниже источников слива.

Цистерны продувки компрессоров необходимы для сбора и хранения протечек масла и воды при использовании компрессора, который используется для пополнения запасов воздуха высокого давления и для снятия избыточного давления воздуха в отсеках в течение автономного плавания. Ориентировочно объем цистерн на одну компрессорную станцию составляет около 2,5 – 3,5 м³.

Цистерны компрессорного масла необходимы для хранения смазочного масла компрессорной станции. Запас компрессорного масла рассчитывается для конкретного типа компрессоров, устанавливаемых на ПЛ, исходя из суммарного количества часов работы компрессора (t) за период автономного плавания, часового расхода масла для смазки компрессора ($Q_{\text{см}}$) и обеспечения одноразовой аварийной замены масла на части установленных компрессоров ($V_{\text{см}}$). Тогда объем цистерны компрессорного масла определяется по зависимости:

$$V_{\text{ком}} = Q \cdot t + V_{\text{см}} \quad (5.35)$$

Цистерны дистиллированной воды предназначены для хранения воды и подачи ее на доливку аккумуляторных батарей и пополнение системы охлаждения аккумуляторных батарей. Объем цистерны дистиллированной воды определяется по формуле:

$$V_{\text{вдв}} = V_{\text{двк}} \cdot n + V_{\text{ост}} \quad (5.36)$$

где $V_{\text{двк}}$ — объем воды необходимый для доливки одной банки;

n — количество банок аккумуляторов;

$V_{\text{ост}}$ — объем воды, необходимый для пополнения системы охлаждения аккумуляторных батарей. Количество цистерны дистиллированной воды на подводной лодке не регламентировано, но желательно иметь не менее двух, которые необходимо располагать по возможности ближе к аккумуляторным ямам.

Объем контейнеров и шхты может быть определен по данным задания на проектирование ПЛ, типом и количеством единиц оружия. Контейнеры крылатых ракет размещаются как в ПК, так и вне ПК, а шхты баллистических ракет, как правило, врезают в прочный корпус, поэтому в ППО учитываются лишь наружные части их объема. В варианте двухкорпусных ПЛ с двумя прочными корпусами шхты находятся в проницаемой части между ямами. В этом случае в ППО учитываются их полный объем.

5.4. Уравнение объемов.

Соотношение объемов подводной лодки

Как уже неоднократно упоминалось, необходимость обеспечения плавания ПЛ в подводном положении с нулевой остаточной плавучестью выдвигает требование уже в самом начале разработки проекта

обеспечивать соответствие нагрузке и постоянного плавучего объема.

Определить величину постоянного плавучего объема можно различными способами.

Можно воспользоваться уравнением:

$$V_0 = \sum_1^k V_i \quad (5.37)$$

где $\sum_1^k V_i$ — сумма всех водоизмещающих в подводном положении объемов. Как мы помним, этим уравнением пользуются при определении объема прочного корпуса.

Уравнение объемов можно записать и в трехчленном виде аналогично уравнению масс, где все составляющие объемы подразделяются на 3 группы:

— объемы, зависящие от V_0 (службных и жилых помещений, систем и устройств, цистерны вспомогательного балласта, материала корпусных конструкций и т.п.);

— объемы, зависящие от $V_0^{0.7}$ (энергетическая установка);

— независимые объемы (вооружение, РЭВ и т.п.).

Тогда:

$$V_0 = \alpha V_0 + \beta V_0^{0.7} + V_{\text{нз}} \quad (5.38)$$

где коэффициент α представляет собой сумму измещателей объемов, пропорциональных V_0 , а β — зависящих от $V_0^{0.7}$.

Как известно, основными слагаемыми ППО являются объемы прочного корпуса $V_{\text{ПК}}$, наружных прочных цистерн $V_{\text{вдв}}$, наружных топливных цистерн $V_{\text{твк}}$, контейнеров и шхты $V_{\text{шх}}$ (для ракетных ПЛ). Используя статистические коэффициенты, можно определить искомую величину ППО подводной лодки по зависимости:

$$V_0 = \frac{V_{\text{ПК}} + V_{\text{вдв}} + V_{\text{твк}} + V_{\text{шх}}}{X} \quad (5.39)$$

В любом случае, уравнение объемов является значительно более приближенным по сравнению с уравнением нагрузок.

Во-первых, оно не учитывает конкретной геометрической конфигурации размещения оборудования и многочисленных требований к его взаимному расположению, а оперирует лишь их объемами.

Во-вторых, наложение коэффициентов уравнения путем обработки характеристик прототипов затруднено в большей степени, чем для уравнения нагрузки из-за сложности выделения объемов, связанных не только условиями размещения, но и требованиями шахеч-

сти, остойчивости, удифферентовки и т.д.

Решение любого уравнения объемов позволяет определить минимально необходимую величину ППО, при которой обеспечивается размещение всего оборудования.

Найденная таким образом величина ППО, как правило, не соответствует нормальному водоизмещению, определяемому по уравнению нагрузки. При этом возможны следующие расчетные случаи:

- $D_0 = \rho V_0$,
 - $D_0 > \rho V_0$,
 - $D_0 < \rho V_0$.
- (5.40)

Случай (а), когда расхождение между D_0 и V_0 невелико, бывает достаточно редко. Расхождение величин D_0 и V_0 при этом можно компенсировать за счет твердого балласта и запаса водоизмещения на последующих стадиях разработки проекта.

Случай (б), когда нормальное водоизмещение определяется массами, требуется принятие новых принципиальных решений.

Здесь необходимо рассмотреть вопросы о применении других материалов, возможном облегчении энергетической установки, некотором уменьшении глубины погружения (по согласованию с заказчиком), применении материалов плавучести.

Если перечисленные выше меры не приводят к желаемому результату, то необходимо увеличить V_0 . Это можно сделать за счет увеличения объема отсеков ПК, что, вообще говоря, нежелательно, так как увеличение объема ПЛ как подводного движущего тела неизбежно увеличивает все поля корабля и соответственно ухудшает его скрытность, а также снижает скорость и увеличивает стоимость. Здесь уместно отметить, что создание подводной лодки с минимально возможным водоизмещением при достижении высоких тактико-технических элементов и минимальной стоимостью — основное искусство проектировщика-подводника. Дав размещения оборудования и решения задач удифферентовки за счет увеличения длины или диаметра ПК не требует обучения "специалиста" в высшем учебном заведении. Поэтому необходимо найти такие слагаемые ППО, увеличение которых обеспечивало бы минимальное увеличение массы ПЛ. Так, например, увеличение объема ПК ведет и к повышению его массы в соответствии с зависимостью:

$$\Delta P = \rho_{ПК} \Delta V_{ПК} \quad (5.41)$$

Компенсация избыточной массы должна удовлетворять равенству:

$$\rho \sum_i V_i + \rho \Delta V_{ПК} = \sum_i P_i + P_{ПК} + \rho \Delta V_{ПК} \quad (5.42)$$

Тогда требуемый дополнительной объем будет равен:

$$\Delta V_{ПК} = \frac{\sum_i P_i - \rho \sum_i V_i}{\rho - \rho_{ПК}} \quad (5.43)$$

Из выражения (5.41) видно, что чем больше значение измерителя массы прочного корпуса $P_{ПК}$, тем труднее компенсировать превышение D_0 над V_0 .

В случае (в), когда водоизмещение ПЛ определяется объемами, необходимо найти возможность их уменьшения без снижения основных ТТД или же обоснованного увеличения массы ПЛ.

При решении этой задачи можно часть наружных прочных отсеков расположить внутри ПК, что позволит уменьшить величину ППО, а также, учитывая, что большая часть массы корпуса приходится на обшивку, можно принять решение о ее утяжелении, т.к. это будет сопровождаться незначительным увеличением объема. Повышение массы ПК, в свою очередь, позволяет снизить предел текучести материала корпуса, а следовательно уменьшить стоимость.

При этом следует заметить, что достижение равенства (5.40) за счет чрезмерного увеличения массы твердого балласта ПЛ вряд ли можно считать рациональным решением задачи.

Возможны и другие решения этой задачи, которые полностью зависят от вклада проектировщиком искусством компромисса, особенно актуальным при проектировании подводных лодок.

Определив согласованное по массам и объемам нормальное водоизмещение, можно приблизительно определить и остальные водоизмещения ПЛ.

Так, соотношение между полным подводным и нормальным водоизмещением можно записать следующим образом:

$$K_{ПВ} = \frac{V_{ПВ}}{V_0} = 1 + \sum_i V_{12i} + \sum_i V_{13i} = 1 + \epsilon_1 + \epsilon_2, \quad (5.44)$$

где $\epsilon = \frac{\sum_i V_{12i}}{V_0}$ — относительный запас плавучести;

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{\sum V_{\text{пр}}}{V_0} \text{ — относительный объем провищаемых частей ПЛ,}$$

Анализ соотношения (5.44) по ряду проектов ПЛ показывает, что величина $k_{\text{пр}}$ зависит от следующих факторов:

- архитектурного типа ПЛ;
- относительного запаса плавучести;
- развития провищаемых объемов корпуса, т.е. наличия больших выгородок антенны ГАС, развитой надстройки или больших провищаемых объемов в междубортном пространстве.

При одинаковом архитектурном типе ПЛ и степени развития провищаемых объемов корпуса $k_{\text{пр}}$ возрастает с увеличением запаса плавучести, но не прямо пропорционально (рис. 5.23)

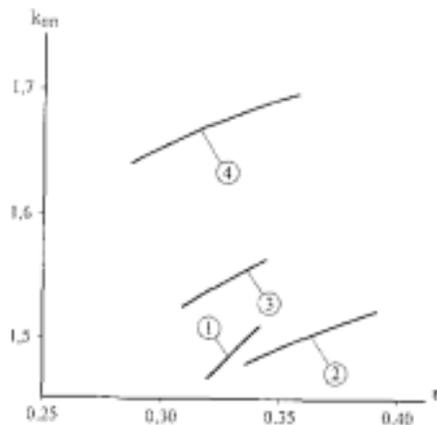


Рис. 5.23. Зависимость коэффициента $k_{\text{пр}}$ от относительного запаса плавучести ПЛ.
1 — ДЭПЛ, 2 — ПЛАТ, 3 — ПЛАК, 4 — ПЛАК

Из рис. 5.23 видно, что для всей совокупности ПЛ традиционного двухкорпусного типа величина $k_{\text{пр}}$ колеблется в значительных пре-

делах, обычно от 1,4 до 1,8. Однако для отдельных типов ПЛ разброс значений $k_{\text{пр}}$ существенно уменьшается, в результате чего эти значения можно использовать для установления в первом приближении связи между V_0 и $V_{\text{пр}}$.

Объем голого корпуса $V_{\text{гк}}$ имеет важное значение, поскольку непосредственно определяет главные размерения и расчетную смоченную поверхность:

$$V_{\text{гк}} = V_{\text{пр}} - V_{\text{обв}}^{\text{пр}} - V_{\text{ст}}^{\text{пр}}, \quad (5.45)$$

где $V_{\text{обв}}^{\text{пр}}$ и $V_{\text{ст}}^{\text{пр}}$ — объемы брутто ограждения подвижных устройств и выступающих за обводы корпуса частей.

Коэффициент $k_{\text{гк}} = \frac{V_{\text{гк}}}{V_{\text{пр}}} = 0,96-0,98$ показывает долю голого корпуса в полном подводном объеме ПЛ. Близость этого коэффициента к единице позволяет на ранних стадиях проектирования принимать $V_{\text{гк}} = V_{\text{пр}}$.

Коэффициент, определяющий отношение подводного водоизмещения к нормальному:

$$k_{\text{нм}} = \frac{V_{\text{пр}}}{V_0} = 1 + \frac{\sum V_{\text{пр}}^{\text{пр}}}{V_0} = 1 + \epsilon_{\text{пр}}, \quad (5.46)$$

зависит от развития провищаемых частей ниже крейсерской ватерлинии и колеблется в пределах 1,2—1,25.

Здесь необходимо отметить, что для подводных лодок IV и V поколений, которые будут плавать в XXI веке, характерными будут одно- или полторакорпусные типы кораблей [70], [86], [88], [94]. Таким образом, указанные выше зависимости должны быть выведены для этих конструкций ПЛ отдельно.

Исключением будут составлять подводные транспортные суда, которые по соображениям экологии останутся многокорпусными [105].

6. УДИФФЕРЕНТОВКА ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ

После определения нормального водоизмещения и приближенного определения координат центра тяжести и центра величины необходимо проверить остойчивость и удифферентовку ПЛ в крейсерском и подводном положениях. Это очень важный вопрос, и продолжать разработку проекта дальше, без проверки остойчивости и удифферентовки в различных положениях нельзя, так как может потребоваться кардинальная переработка общего расположения. Удифферентовка должна быть произведена как по силам, так и по моментам, поскольку должны быть выполнены условия (5.1) и (5.2).

Большинство имеющихся работ и исследований по анализу нагрузки ПЛ посвящено анализу масс, меньшее число — анализу объемов и совсем мало — анализу плеч и моментов.

Поэтому прежде необходимо рассмотреть вопрос о приближенном определении плеч масс и объемов.

6.1. Приближенное определение плеч масс

Надежность удифферентовки корабля определяется не только точностью определения сил, но и точностью определения величин моментов этих сил, а следовательно, необходимо определять их плечи уже на ранних стадиях проектирования.

Первой работой, посвященной анализу плеч, была работа профессора Б.М.Малинина (50-е годы). В ней рассматривался вопрос о соотношении координат ЦВ и ЦТ прочного корпуса ПЛ. Однако, и в настоящее время нет широко разработанного аппарата для приближенного определения величин плеч масс и объемов применительно к ПЛ.

Для разных стадий разработки проекта до разработки конструкций можно рекомендовать пересчитывать плечи с прототипов. На стадиях, когда нагрузка учитывается по группам и подгруппам, все массы можно условно разделить на две категории: рассредоточенные и сосредоточенные.

К первым можно отнести массы, которые хотя и неравномерно, но размещены по всей длине и высоте ПЛ. Примером таких масс могут служить массы корпуса, систем, кабеля, окраски, напылений и т.д. Плечи таких масс по длине и высоте можно условно отнести к плечу центра величины прочного корпуса однотипной ПЛ-прототипа.

Так, например, координаты ЦТ группы 500 X_{500} и Z_{500} по близкому прототипу можно представить в виде:

$$\frac{X_{500}}{X_{ска}} = \frac{X_{500}^*}{X_{ска}^*} = \bar{X}_{500} = \text{const.} \quad (6.1)$$

откуда

$$X_{500} = \bar{X}_{500} X_{ска}. \quad (6.1a)$$

где \bar{X}_{500} — относительное плечо группы 500;

$X_{ска}$ — абсцисса ЦВ ПК проекта.

Аналогично, ордината Z_{500} для проекта:

$$Z_{500} = \bar{Z}_{500} Z_{ска}. \quad (6.1б)$$

Ко второй категории — категории сосредоточенных масс, можно отнести также, которые по условиям общего расположения сконцентрированы в определенном месте ПЛ.

К ним относятся массы различных видов вооружения, массы составляющих ГЭУ и т.п. Ординаты ЦТ таких масс целесообразно связывать с отдельно выбранными плоскостями отсчета, характерными для каждого конкретного случая.

Так, положение ЦТ дизельной установки по длине $X_{ДУ}$ можно определять по близкому прототипу в долях длины дизельного отсека от носовой или кормовой переборки, принимая $X_{ДУ} / l_{ДУ} = \text{const.}$ а по высоте — в долях диаметра ПК в районе отсека $Z_{ДУ} / d_{ПК} = \text{const.}$

Аналогично можно определить координаты установки гребных электродвигателей.

На атомных ПЛ координаты центров тяжести ППУ и ПТУ можно также пересчитать по прототипу в долях длины отсеков от одной из переборок, ограничивающих данные отсеки. Координаты ЦТ ракетного оружия, $X_{РО}$ и $Z_{РО}$, расположенного в шахтах,

можно отсчитывать от вертикальных и горизонтальных плоскостей, проведенных через центр величины шахты.

На начальных стадиях проектирования для отдельных корпусных конструкций координаты ЦТ масс можно пересчитывать с прототипа, измеряя их от плоскостей, характерных для каждой конструкции.

Например, ЦТ массы ограждения выдвинутых устройств можно приблизительно пересчитать исходя из допущения, что

относительные ординаты $X_{\text{отв}} = \frac{X_{\text{отв}}}{l_{\text{отв}}}$ и $Z_{\text{отв}} = \frac{Z_{\text{отв}}}{h_{\text{отв}}}$ для проекта

и прототипа, близкого по форме и конструкции ограждения, будут одинаковы. Аналогично можно определять и координаты ЦТ надстройки.

6.2. Приближенное определение плеч слагаемых ППО

Обработка статистического материала показала, что для однотипных ПЛ (как по энергетике, так и по вооружению) существует устойчивое соотношение, которое можно использовать для этой цели. Будем считать, что координаты ЦВ прочного корпуса $X_{\text{св}}$ и $Z_{\text{св}}$ известны по данным проработки расположения оборудования в прочном корпусе. Тогда координаты ЦВ ППО можно приближенно определить, ориентируясь на положение, что у однотипных подводных лодок отношения моментов основных слагаемых плавучих объемов по длине и по высоте к полному моменту ППО примерно постоянны. Так, для ДЭПЛ с торпедным вооружением в качестве таких основных слагаемых достаточно взять прочный корпус, наружные прочные и наружные топливные цистерны. Тогда в соответствии со сказанным, как показывает статистика, у проекта и близкого прототипа ДЭПЛ:

$$\frac{Z_{\text{св}}(\text{прототип})}{Z_{\text{св}}} = \text{const}; \quad (6.2)$$

$$\frac{X_{\text{св}}(\text{прототип})}{X_{\text{св}}} = \text{const}, \quad (6.2a)$$

что дает возможность приближенно определить $Z_{\text{св}}$ и $X_{\text{св}}$ ППО проекта.

У ракетных атомных ПЛ в качестве таких слагаемых можно выделить прочный корпус, наружные прочные цистерны, контейнеры или наружные части ракетных шахт.

Ордината $Y_{\text{св}}$ при определении центра тяжести и центра величины ПЛ на ранних стадиях не рассчитывается ввиду близкой симметричности расположения нагрузки и ПНО. Ее значение проверяют на более поздней стадии и, если $Y_{\text{св}} \neq 0$, то необходимо оценить и $Y_{\text{св}}$. Как правило, $Y_{\text{св}}$ приводят к нулю установкой балласта.

Наличие проработки размещения оборудования в ПК и, следовательно, его габаритов и формы, а также схемы общего расположения вне ПК позволяют уточнить не только величину ППО, но и координаты центра величины (ЦВ).

6.3. Удифферентовка подводной лодки

Уже на самой ранней стадии разработки проекта нужно уделять серьезное внимание удифферентовке ПЛ. Необходимо обеспечить посадку корабля на ровный киль в надводном и подводном положениях, а также необходимый уровень остойчивости ПЛ. Не будем здесь рассматривать вопросы удифферентовки в надводном положении, поскольку в этом случае справедливы все зависимости, используемые в проектировании надводных кораблей [6]. Рассмотрим лишь вопросы, связанные с удифферентовкой ПЛ в подводном положении.

Для обеспечения ее необходимо соблюдение условий:

$$X_{\text{в}} = X_{\text{с}} \quad (6.3)$$

$$Z_{\text{с}} - Z_{\text{в}} = h_{\text{св}} \quad (6.3a)$$

Равенство абсцисс $X_{\text{с}}$ и $X_{\text{в}}$ на начальных стадиях разработки проекта, как правило, не обеспечивается, т.е. ПЛ не удифферентована. В этом случае необходимо рассмотреть два варианта.

1. Расхождение между $X_{\text{в}}$ и $X_{\text{с}}$ невелико, и задачу можно решить перемещением твердого балласта по длине корабля.

2. Если расхождение между центром тяжести и центром величины по длине велико, то необходимо выполнить переконфигуровку оборудования внутри ПК, а иногда и переконфигуровку отсеков по длине ПЛ.

В случае, если величина начальной метанцентрической высоты в подводном положении h_{Σ} не удовлетворяет требованиям, то ее величину можно изменить двумя путями: за счет изменения величины Z_c или величины Z_p . Изменение координаты Z_p производится за счет перемещения наиболее тяжелого оборудования или твердого балласта по высоте. Изменение Z_c возможно за счет изменения конфигурации концевых отсеков ПК, расположения прочных цистерн и других составляющих ПЮ по высоте.

6.4. Уточнение массы твердого балласта и его расположения по длине ПЛ

На начальных стадиях проектирования масса твердого балласта (ТБ) определяется, как правило, в процентах от нормального водоизмещения D_0 (см. 3.6). В дальнейшем, по мере разработки проекта, имеется возможность уточнить количество твердого балласта и определить положение его центра тяжести по длине ПЛ для обеспечения ее удифферентовки. Поскольку по мере продвижения проекта нагрузка ПЛ корректируется, то изменяется и количество твердого балласта, а также его расположение по длине ПЛ. Этот процесс имеет место на всех этапах проектирования. Следует подчеркнуть, что твердый балласт должен быть всегда на подводной лодке, даже в том случае, когда первый проектный расчет дает $D_0 = \rho V_0$.

Это диктуется результатами вывески ПЛ после постройки для:

- удифферентовки ПЛ в подводном положении;
- обеспечения остойчивости ПЛ;
- компенсации запаса водоизмещения на модернизацию и неэксплуатированный запас на проектирование и постройку.

Твердый балласт может располагаться на ПЛ в различных местах, и в зависимости от его местоположения применяются различные способы его учета:

- если ТБ располагается в ПК, то в нагрузке учитывается в строке "Твердый балласт массой в воздухе";
- если ТБ располагается в цистернах главного балласта, то в нагрузке учитывается "Твердый балласт массой в воздухе", но при этом в сводке ПЮ вводится слагаемое "Плавучесть твердого балласта";

— если ТБ располагается в провищаемых частях корпуса, то в таблице нагрузки учитывается "Твердый балласт массой в воде".

Рассмотрим в качестве примера последний случай — ТБ необходимо расположить в провищаемых частях по длине корабля (влечо по высоте определяется условиями обеспечения остойчивости).

Количество твердого балласта определится из уравнения плавучести:

$$\sum_i P_i + P_{TB} = \rho \sum_i V_i + \rho \frac{P_{TB}}{\rho_{TB}}, \quad (6.4)$$

где $\sum_i P_i$ — водоизмещение ПЛ без балласта;

P_{TB} — масса твердого балласта;

$\sum_i V_i$ — объемное водоизмещение ПЛ без балласта;

$\rho \frac{P_{TB}}{\rho_{TB}}$ — плавучесть твердого балласта.

После преобразования (6.4) получим выражение для определения массы твердого балласта:

$$P_{TB} = \frac{\rho_{TB}}{\rho_{TB} - \rho} \left(\rho \sum_i V_i - \sum_i P_i \right). \quad (6.5)$$

В случае расположения балласта в ПК, очевидно, что множитель

$$\frac{\rho_{TB}}{\rho_{TB} - \rho} = 1,$$

Плечо твердого балласта по длине определяется уравнением моментов, которое в данном случае можно записать следующим образом:

$$\sum_i P_i x_i + P_{TB} x_B = \rho \sum_i V_i x_i - \rho \frac{P_{TB}}{\rho_{TB}} x_B. \quad (6.6)$$

После преобразования плечо ТБ по длине выразится как:

$$x_B = \frac{\rho_{TB}}{\rho_{TB} - \rho} \frac{\rho \sum_i V_i x_i - \sum_i P_i x_i}{P_{TB}}. \quad (6.7)$$

При определении плеча X_0 необходимо обращать внимание на следующие обстоятельства.

Во-первых, плечо X_0 — это место расположения не самого ТБ, а только его геометрического центра тяжести.

Во-вторых, необходимо стремиться к тому, чтобы плечо балласта X_0 на ранних стадиях проектирования было, по возможности, минимальным, так как при дальнейшем проектировании может потребоваться смещение балласта в оконечности корабля.

Окончательно масса твердого балласта и его местоположение уточняются путем проведения вывески ПЛ после постройки при пробном погружении.

7. ЗАМЕЩЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ГРУЗОВ НА ПОДВОДНОЙ ЛОДКЕ

7.1 Общие положения замещения переменных грузов

Как уже отмечалось в главе 5, любое судно или корабль должны быть спроектированы таким образом, чтобы выполнялись условия статического равновесия при отсутствии крена и дифферента, т.е. в любой момент плавания он должен быть удифферентован (см. 5.1.):

$$D_0 = \rho V_0$$

$$\text{при } X_0 = X_c, Y_0 = Y_c$$

Рассмотрим более подробно отличия в поведении надводного корабля и подводной лодки при нарушении статического равновесия.

Для надводных кораблей и судов равновесие по силам, описываемое основным уравнением плавучести, поддерживается автоматически. Расходование или прием грузов в нормальных эксплуатационных условиях сопровождается соответствующим изменением осадки, а следовательно и мерзеходных качеств надводного судна. Это связано с тем, что в уравнении изменяются только два параметра — нагрузка и плотность воды; третий параметр — объем, является свободным (во всяком случае, в пределах запаса плавучести) и компенсирует изменение первых двух [21], [59].

Для подводных лодок в надводном положении все вышесказанное также справедливо. Однако, необходимость обеспечения возможности перехода ПЛ в подводное положение в любой момент времени требует иного подхода к данному вопросу.

У подводных лодок в погруженном состоянии запас плавучести равен нулю, следовательно, не может самопроизвольно возникнуть сила, компенсирующая изменение нагрузки ПЛ. Любое, даже незначительное, ее изменение заставит подводную лодку погружаться или всплывать.

Из вышесказанного следует, что подводное плавание без ходя может быть обеспечено только при соблюдении равенства $D_0 = \rho V_0$, т.е. при нулевой остаточной плавучести.

Следует также учесть, что равновесие по моментам, и прежде всего по дифференцирующим моментам, для ПЛ в подводном положении должно выполняться более точно.

Из курса статик подводных лодок известно, что в подводном положении у ПЛ продольная метacentрическая высота равна разности плавучей и весовых ($H_{\text{в}} = h_{\text{в}} > 0,3—0,5 \text{ м}$) [30]. Следовательно, остойчивость погруженной ПЛ высока, и возникающие при эксплуатации моменты будут приводить к большим дифференциалам и кренам.

Таким образом, поскольку самопроизвольная компенсация остаточной плавучести и дифференцирующего момента для ПЛ в подводном положении невозможна, для поддержания условий статического равновесия корабля необходимы соответствующие технические средства и действия личного состава.

К упомянутым выше средствам относятся и цистерны вспомогательного балласта, расположение и объем которых зависят от вида расходоуемых грузов и способа их замещения [47].

Все грузы, составляющие нормальную нагрузку ПЛ, можно разделить на постоянные и переменные. Постоянные грузы в процессе эксплуатации корабля не меняются. К данной группе грузов относятся корпусные конструкции, энергетическая установка, системы, устройства и т.д.

Под переменными грузами понимают также грузы, входящие в нормальное водоизмещение, которые либо меняются по величине (принимаются или расходуются), либо меняют свое местоположение на корабле. К таким грузам относятся: вооружение, топливо и масло, дистиллированная вода, пресная и морская вода и некоторые другие.

К нарушению статического равновесия приводит также перекачка воды козырькового запора из цистерны в пусковые установки оружия, изменение плотности забортной воды, обжатие корпуса и наружных покрытий. Следовательно, и перечисленные факторы также должны быть учтены при рассмотрении вопросов удифференцовки подводной лодки.

Все переменные грузы по способу их компенсации можно разделить на три группы:

- переменным грузы, для компенсации которых существуют специальные заместительные цистерны. В основном к этой группе относятся различные вооружения ПЛ;
- переменные грузы, которые замещаются в те же цистерны, где они сами находятся, например, топливо;

— переменные грузы, замещающиеся в специальные цистерны вспомогательного балласта. С помощью этих же цистерн погашаются все некомпенсированные силы и моменты, которые получаются при замещении первых двух групп переменных грузов, например, разность сил и моментов при замещении топлива.

Предусмотреть заранее, в какое время, какие грузы и в каком количестве будут расходоваться невозможно, т.к. это зависит от текущих задач, выполняемых ПЛ. Однако, для некоторых из них можно установить порядок их расходования по хранилищам. К таким грузам относятся пресная и морская вода, топливо и некоторые другие.

График предполагаемого расходования подобных грузов позволяет уменьшить количество балласта, необходимого для удифферентовки, а следовательно, и объем цистерн вспомогательного балласта.

На рис. 7.1. приведена условная схема расположения цистерн главного и вспомогательного балласта подводной лодки.

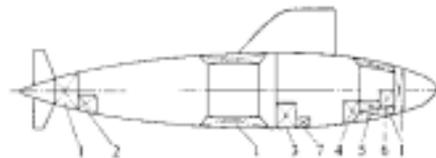


Рис. 7.1. Условная схема расположения цистерн главного и вспомогательного балласта подводной лодки.

- 1 — газовый балласт; 2 — корпус дифференциала; 3 — утилитарный; 4 — торпедоустановочный; 5 — цистерна козырькового запора; 6 — носовая дифференциальная; 7 — цистерна быстрого погружения.

При проектировании ПЛ дифференциальные цистерны целесообразно располагать как можно ближе к оконечностям ПЛ, чтобы увеличить плечо перегонки воды из одной дифференциальной цистерны в другую. Это позволяет создавать необходимые дифференцирующие моменты меньшим количеством воды, приводит к уменьшению объема этих цистерн. Как правило, на подводных лодках 2—4 дифференциальные цистерны. Согласно статистике суммарный объем дифференциальных цистерн ПЛ обычно составляет около одного процента нормального водоизмещения.

Уравнительных цистерн на средних и больших ДЭПЛ обычно две, а на АПЛ и более. На всех подводных лодках одну из уравнительных цистерн стараются размещать по длине в центре величины корабля и предпочитают ее в основном для компенсации изменения плотности (солености) воды. Эту цистерну так иногда и называют — цистерна солености. При таком размещении цистерны солености прием и удаление воды, при компенсации изменения ее плотности, не вызывают дифференцирующих моментов и участия дифференциальных цистерн не требуется [62].

Вторую уравнительную цистерну предназначают для замещения переменных грузов.

Наиболее рационально поместить ее вблизи от центра тяжести всех переменных грузов, замещаемых в данную цистерну. Однако, на практике вторую цистерну располагают, как правило, рядом с первой в нос или корму. Суммарный объем уравнительных цистерн по статистическим данным составляет примерно 3—4% от нормального водоизмещения ПЛ.

На подводных лодках с атомной энергетикой центр тяжести корабля находится в районе отсека ППУ, где располагаются цистерны биологической защиты, поэтому нет возможности разместить уравнительные цистерны, так как было сказано выше.

На АПЛ уравнительные цистерны приходится располагать в нос от центра тяжести, а для компенсации моментов в данном случае вынуждены размещать в кормовой оконечности дополнительную уравнительную цистерну, т.е. в противном случае дифференциальные цистерны получатся чрезмерно больших объемов.

Изложенная выше схема, в принципе, не является обязательной. Можно обойтись двумя цистернами типа дифференциальных, при помощи которых будет производиться всякая удифферентовка подводной лодки. Данный принцип реализован на ряде ПЛ.

Объемы уравнительных и дифференциальных цистерн определяется из условия удовлетворения следующему принципу. Любая из перечисленных выше цистерн в самых тяжелых случаях замещения переменных грузов не должна быть полностью осушена или заполнена шлюнком, с тем, чтобы в них всегда был бы небольшой запас как по воде, так и по объему, имея в виду условность расчета и непредвиденные случаи. Таким образом, объем цистерн вспомогательного балласта складывается из трех составляющих:

$$V_{\text{цис}} = V_{\text{исл}} + V_{\text{из}} + \Delta V, \quad (7.1)$$

где $V_{\text{исл}}$ — начальная дифференциальная вода;

$V_{\text{из}}$ — объем, необходимый для компенсации переменных грузов;

ΔV — некоторый свободный объем цистерн.

Основанием для определения начального количества дифференциальной воды служит тот ее объем, который согласно расчету замещения переменных грузов, подлежит удалению из цистерн для приведения ПЛ в состояние равновесия. Получения из указанного расчета величина $V_{\text{из}}$ включается в нормальную нагрузку ПЛ.

Из изложенного следует, что в выражении (7.1) первые два слагаемых определяются на основании специального расчета, который называется расчетом замещения переменных грузов, а третья принимается проектировщиком [84]. Как правило, ΔV составляет (0,25—0,50)% от D_0 .

Способ расчета объема цистерн зависит от схемы дифферентовки, принятой на проектируемой подводной лодке. Схема дифферентовки может быть:

1. Рядовая (автономная), когда весь объем замещающей истраскопаный груз воды принимается в уравнительную цистерну, а дифферент ликвидируется за счет перетонки воды из одной дифференциальной цистерны в другую (рис. 7.2).

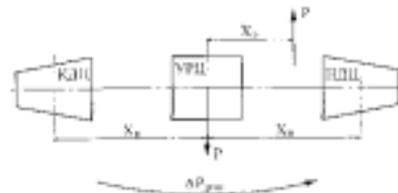


Рис. 7.2. Рядовая (автономная) схема удифферентовки подводной лодки

Данная схема удифферентовки имеет преимущество четкого разграничения функций между уравнительными и дифференциальными цистернами, что позволяет быстро и четко провести замещения переменных грузов, однако, требует большего объема уравнительных цистерн. Дифференциальные цистерны в этом случае можно принять меньшего объема.

2. Смешанная или комбинированная, когда замещающая вода принимается одновременно в уравнительную и одну из дифференциальных цистерн (рис. 7.3).

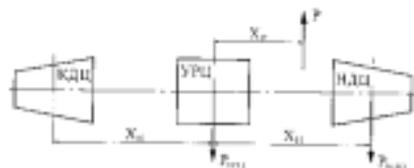


Рис. 7.3 Смешанная (комбинированная) схема ундифферентации подводной лодки

Уравнительная цистерна в этом случае будет несколько меньшего объема, чем в первом, но усложняется процесс ундифферентации из-за необходимости определять количество воды, принимаемое в каждую из указанных цистерн. При современном уровне автоматизации ПЛ эта задача вполне разрешима.

Основные положения замещения переменных грузов на ПЛ сводятся к следующим [51], [84].

1. Грузы, расходуемые сразу в больших количествах (оружие), замещаются в аппарате, трубах, шахтах, контейнеры или в специальные заместительные цистерны, центр тяжести которых при проектировании стремятся совместить (по длине) с центром тяжести этих грузов. Если при этом возникают дифференцирующие моменты, они погашаются перекачкой воды в дифференциальные цистерны. Компенсация подобных грузов должна производиться сразу же по мере их расходования.

2. При длительных режимах хода под РДП для ДЭПЛ изменение нагрузки происходит за счет расходования топлива, компенсация которого производится в зависимости от его расхода.

3. Все остальные грузы расходуются постепенно, и замещение их производится с помощью дифференциальных и уравнительных цистерн по мере надобности, например, перед постановкой на режим стабилизации глубины без хода или при замеченной радиодифферентации ПЛ.

Необходимо помнить, что неправильное замещение переменных грузов приводит к аварийным ситуациям. Так, например, неправиль-

ное замещение переменных грузов в надводном положении, вызывающее лишь незначительное изменение посадки ПЛ, при погружении может привести к нежелательным дифферентам, к провалу за предельную глубину погружения и гибели ПЛ [30].

7.2 Замещение оружия

Торпедное оружие. На современные подводные лодки могут быть приняты торпеды различных типов, отличающиеся друг от друга по весу, габаритам и отрицательной плавучести, из которых составляются различные варианты боекомплектов вооружения. Поэтому при расчете замещения принимают, что подводная лодка ундифферентована твердым балластом при наличии на ее борту самого тяжелого боекомплекта. Этот вес и момент, с учетом воды кольцевого зазора, включены в нормальную нагрузку ПЛ. При приеме на подводную лодку других боекомплектов необходимо расчетом определить разность по весу и моменту ундифферентовать ПЛ, т.е. принять воду в торпедозаместительную и другие цистерны вспомогательного балласта таким образом, чтобы сумма весов и моментов принятой воды и нового боекомплекта вооружения были бы равны итоговому суммам по вооружению в таблице нормального состояния переменных грузов.

Рассмотрим работу торпедного комплекса при стрельбе (рис. 7.4).

Перед выстрелом вода из цистерны кольцевого зазора перетекает в торпедные аппараты.

Таким образом, в торпедном аппарате имеем сумму весов торпеды и воды кольцевого зазора ($P_T + P_{сз}$). Возникающий при этом дифференцирующий момент гасится перекачкой воды в дифференциальные цистерны. Количество воды, которое необходимо перекачать из одной дифференциальной цистерны в другую, для данного типа торпеды определяется расчетным путем.

После выхода торпеды из торпедного аппарата последний заполняется водой и нагрузка изменяется на величину отрицательной плавучести торпеды, т.е. $\Delta P_T = P_T - \rho V_T$.

Для соблюдения равенства сил должно быть справедливым следующее выражение:

$$P_T + P_{сз} = \rho V_T + P_{с1} + \Delta P_T. \quad (7.2)$$

Отрицательная плавучесть торпеды ΔP_T в момент выстрела принимается в цистерну БТС через клапан БТС, который регулируется

таким образом, чтобы вместе с воздухом поступало вполне определенное количество воды.

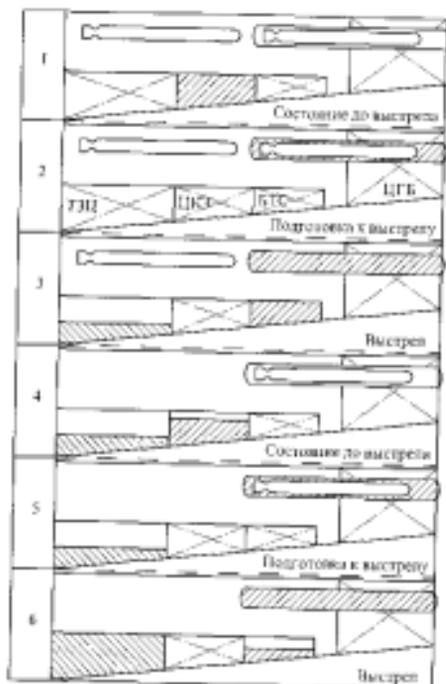


Рис. 7.4. Замещение торпедного оружия

ТЛ — торпедозаместительная цистерна, КЗ — цистерна кольцевого зазора;
БТС — цистерна безударной зарядной стрельбы.

При зарядке аппаратов запасными торпедами в подводном положении необходимо провести две операции, во время которых выполняется дифференцировка ПЛ:

— вода из торпедного аппарата после выстрела, кроме последнего, перепускается в цистерну кольцевого зазора, а после ее заполнения в торпедозаместительную цистерну. При этом возникает дифференцирующий момент на корму, для уравновешивания которого необходимо задействовать дифференциальную систему;

— при подаче запасной торпеды со стеллажа в аппарат необходимо перекачать воду из носовой дифференциальной цистерны в кормовую. При зарядке торпедных аппаратов запасными торпедами в надводном положении уравновешивание по моментам надо производить после всех операций.

Необходимо также отметить, что количество перекачиваемой между дифференциальными цистернами воды зависит не только от типа торпеды, но и от того, насколько близко к центру тяжести запасных торпед размещена торпедозаместительная цистерна, а также торпедные аппараты и цистерна кольцевого зазора.

Торпеды последнего залпа замещаются прямо в аппараты (вода в них остается), а вода замещения отрицательной плавучести торпеды через цистерну БТС принимается в цистерну кольцевого зазора. На некоторых подводных лодках после последнего выстрела вода, принимаемая в торпедные аппараты, может быть слущена в цистерну БТС.

Минное оружие

Подводные лодки вместо торпед могут принимать мины, которые ставятся через торпедные аппараты и операции по их замещению аналогичны замещению торпед.

На специальных ПЛ — подводных минных заградителях — мины хранятся в трубах или шахтах сухим или мокрым способом.

При сухом способе хранения необходимо иметь цистерну кольцевого зазора, а при наличии запасных мин и минно-заместительную цистерну.

Баланс сил в этом случае может быть записан так:

$$\sum_i P_{M_i} + P_{KZ} = P_{BTS} + \rho \sum_i V_{M_i} + \sum_i \Delta P_{M_i}, \quad (7.3)$$

где $\sum_i P_{M_i}$ и $\sum_i V_{M_i}$ — суммарный вес и объем мин;

$\sum_i \Delta P_{M_i}$ — суммарная отрицательная плавучесть мин.

Вода, замещающая суммарную отрицательную плавучесть мин, перепускается в цистерну кольцевого зазора или минно-

заместительную цистерну. В случае наличия запасных мин минные трубы или шахты осушаются в эти же цистерны.

При мокром способе хранения мин возникает необходимость замещения только их отрицательной плавучести. В этом случае необходимость в цистерне кольцевого зазора и минно-заместительной цистерне отпадает. Замещение производится в уравнивательные и дифференциальные цистерны.

Ракетное оружие

Количество цистерн, с помощью которых производится замещение ракет при стрельбе, зависит от места старта (надводный или подводный) и способа стрельбы (сухой или мокрый).

При надводном старте ракет крышка шахты (контейнера) закрывается после старта, и в нормальных условиях они остаются сухими. В этом случае вес выпущенных ракет замещается приемом воды в специальные ракетозаместительные цистерны или, если таковые не предусмотрены, в уравнивательную цистерну.

При сухом подводном старте, когда перед стартом шахта или контейнер не заполняются, а заполнение их происходит после выхода ракеты, нагрузка корабля изменится на величину

$$\Delta P = \gamma V_{\text{ш}} - P_r \quad (7.4)$$

Поскольку вес воды в объеме шахты обычно больше веса ракеты, должны быть предусмотрены специальные цистерны, заполненные водой, продуваемые после выстрела и заполнения шахты водой.

Вода в указанных цистернах должна быть включена в нормальную нагрузку подводной лодки.

При мокром способе старта шахта перед выстрелом заполняется водой. В этом случае необходима цистерна кольцевого зазора из расчета заполнения кольцевого зазора всех шахт. Разница между весом ракеты и весом воды в объеме ракеты замещается в цистерну кольцевого зазора.

7.3. Замещение топлива и масла

Дизельное топливо замещается забортной водой в топливные цистерны, при этом считается, что замещение поддежат 98% полного запаса топлива. Происходящее утконошение ПЛ можно выразить следующей зависимостью:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = (\rho - \rho_1) V_1 = \frac{\rho - \rho_1}{\rho_1} P_1, \quad (7.5)$$

где P_1 и V_1 — вес и объем замещаемого топлива;

$\rho = 1,02 - 1,03 \text{ т/м}^3$ плотность воды;

$\rho_1 = 0,85 - 0,88 \text{ т/м}^3$ плотность топлива.

При расчете замещения необходимо брать максимальную плотность воды по предполагаемому району плавания и минимальную плотность топлива, т.е. в противном случае объем цистерн вспомогательного балласта может оказаться недостаточным.

Например, для воды с плотностью $\rho = 1,03$ утконошение подводной лодки составит

$$\Delta P = \frac{\rho - \rho_1}{\rho_1} P_1 = \frac{1,03 - 0,85}{0,85} P_1 = 0,212 P_1. \quad (7.6)$$

Следовательно, при расходовании дизельного топлива из цистерн вспомогательного балласта необходимо отмечать значительное количество воды. Дизельное масло расходуется одновременно с топливом, поэтому при положении отрицательной плавучести, получаемой при расходовании топлива, необходимо учитывать вес израсходованного дизельного масла. На ПЛ количество дизельного масла составляет, как правило, $P_{\text{м}} = 0,05 - 0,07 P_1$, причем почти все оно расходуется вследствие утара в цилиндрах двигателя. Масло водой в цистерны масла не замещается, поэтому суммарное количество воды, откачиваемой при расходовании топлива и масла, составит

$$\Delta P = \left(\frac{\rho - \rho_1}{\rho_1} \right) P_1 - k_{\text{дм}} P_1 \approx (0,142 - 0,162) P_1. \quad (7.7)$$

Отметим особенности при приеме топлива в перегрузку в топливно-балластные цистерны. В этом случае создается положительная плавучесть, величину которой можно оценить по зависимости:

$$\Delta P = \rho \sum_i V_{\text{топ}i} - \rho_1 \sum_i V_{\text{топ}i} = V_{\text{топ}} (\rho - \rho_1). \quad (7.8)$$

Таким образом, для равновесия ПЛ и возможности погружения необходимо принять дополнительное количество воды ΔP в уравнивательную цистерну.

На атомных подводных лодках количество топлива и масла для работы дизель-генераторов невелико. Принципы его замещения одинаковы с дизель-электрическими ПЛ. Основной запас масла на АПЛ идет на смазку главного турбодвигательного агрегата (ГТЗА). Как правило, в расчетах замещения переменных грузов принимается: расходуемый и замещаемый вес масла ГТЗА составляет 75% от объема цистерн, остальное идет на вспенивание.

7.4. Компенсация изменения плавучести ПЛ от влияния гидрологических факторов

При постоянной нагрузке подводной лодки изменение плавучести происходит при изменении плотности воды ρ . В свою очередь плотность морской воды зависит от температуры, давления и от количества растворенных в ней солей, т.е. от ее солености. Подводная лодка проектируется на заданную в ТТЗ величину плотности воды, а увеличение или уменьшение ее по сравнению с расчетным значением пошатывает прием или откачку воды в цистерны вспомогательного балласта.

В то же время изменение давления и температуры приводит к изменению погруженного объема ПЛ в результате обжатия прочных конструкций и наружных покрытий. С учетом всех перечисленных факторов изменения плавучести ПЛ можно записать следующим образом:

$$\Delta P = \rho V \left[\frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0} + \alpha_p (\alpha_p + \alpha_t) (H_1 - H_0) + \alpha_t (t_1^* - t^*) \right], \quad (7.9)$$

где α_p — относительное уменьшение объема водопроницаемого корпуса при увеличении давления на единицу;

α_t — относительное изменение плотности воды при увеличении давления на единицу;

α_t — коэффициент объемного расширения ПЛ, т.е. относительное изменение ее объема при изменении температуры t на 1°C .

Численные значения перечисленных выше величин по В.Г.Власову [22]

$$\begin{aligned} \alpha_p &= -\frac{13}{H_p} \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{т} \\ \alpha_p &= 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{т} \quad ; \\ \alpha_t &= 37 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}} \end{aligned} \quad (7.10)$$

Следует отметить, что водоизмещение V , при определении остаточной плавучести ΔP , должно быть принято в зависимости от условий плавания подводной лодки, в которых произошло изменение указанных факторов. Дифференцирующий момент, который может возникнуть вместе с изменением плавучести, должен быть вычислен из условия, что остаточная плавучесть ΔP приложена в центре величины подводной лодки X_C при водоизмещении V :

$$M = \Delta P X_C \quad (7.11)$$

7.5. Расчет замещения переменных грузов

Расчет замещения переменных грузов выполняется с целью определения необходимого объема цистерн вспомогательного балласта. Он носит характер либо проверочного расчета, когда, например, объем цистерн и их плечи по длине корабля приняты из возможностей общего расположения оборудования и данных прототипов, либо служит основанием для выбора объема цистерн вспомогательного балласта при заданных по конструктивным соображениям плечах по длине.

Расчет замещения обычно производится для различных случаев нагрузки подводной лодки. Основным исходным является случай нормального водоизмещения ПЛ при оговоренной в ТТЗ плотности воды.

Для дизель-электрических ПЛ обязательно рассматривается случай водоизмещения с топливом в перегрузку для заданной плотности воды, рассматриваются также случаи замены вооружения (например, торпед на мины) и другие.

В зависимости от назначения и типа ПЛ при расчете замещения могут быть рассмотрены следующие случаи расходовании и замещения переменных грузов:

- использование оружия (торпеды, ракеты, мины);
- расход топлива и масла при различных значениях плотности воды;
- расход пресной и морской воды;
- переток воды кольцевого зазора из цистерн в пусковые установки;
- обжатие корпуса и покрытий и т.д.

Расчет замещения переменных грузов начинается с описания принятых основных положений и допущений, заложенных в расчет.

Например, указывается, какие цистерны участвуют в замещении того или иного переменного груза:

- вес запасных торпед замещается в торпедозаместительную цистерну;
- вес торпед последнего залпа замещается в торпедные аппараты и цистерну БТС;
- топливо и масло замещается в топливные цистерны и т.д. [47].

В качестве допущений расчета можно привести следующее:

- расходный и замещаемый вес топлива принимается равным 98% от полного;

— дизельное масло расходуется и замещается в объеме 5—7% от полезного запаса топлива и т. д.

В этом же разделе указывается принятая схема замещения переносных грузов (раздельная или смешанная).

Приводятся основные данные по кораблю, необходимые для расчета:

— объемное водоизмещение по сводной таблице ППО $V_{\text{в}}, \text{м}^3$;

— отстояние центра величины от миделя $X_{\text{с}}, \text{м}$;

— плотность масла $\rho_{\text{м}} = 0,9 \text{ т/м}^3$;

— плотность топлива $\rho_{\text{т}} = 0,85-0,88 \text{ т/м}^3$;

— плотность воды $\rho = 1,015-1,030 \text{ т/м}^3$.

В табличной форме приводятся весовые и объемные данные по оружию и пусковым установкам, а также их плечи по длине от миделя.

Приводятся данные о цистернах вспомогательного балласта с указанием их объемов (если они выбраны) и плеч по длине, которые принимаются, как это было отмечено, с учетом конструктивных особенностей и общего расположения оборудования (табл. 7.1). Кроме уравнивательных, все остальные цистерны вспомогательного балласта разделены побортно.

Таблица 7.1.

Объемы и положения цистерн

Наименование цистерны	Объем нетто, м^3	Отстояние ЦТ цистерны от миделя, м
Уравнивательная цистерна № 1		
Уравнивательная цистерна № 2		
Уравнивательная цистерна № 3		
Носовая дифференциальная цистерна № 1		
Носовая дифференциальная цистерна № 2		
Корпусная дифференциальная цистерна № 3		
Корпусная дифференциальная цистерна № 4		
Торсионноустойчивые цистерны № 1		
Торсионноустойчивые цистерны № 2		
Цистерны взвешивающего зазора № 1		
Цистерны взвешивающего зазора № 2		
Цистерна БТС № 1		
Цистерна БТС № 2		

Затем также в табличной форме приводятся данные по переменным грузам, принятым на подводную лодку (табл. 7.2).

Переменные грузы, принятые на подводную лодку

№ оп	Наименование груза	Вес груза	Плечи от миделя	
		т	м	тм
1	Поддерживающие торресколы и аппараты	$R_{\text{ПТТ}}$	$X_{\text{ПТ}}$	$R_{\text{ПТ}} X_{\text{ПТ}}$
	Торресколы на стальных валах	$R_{\text{ПТст}}$	$X_{\text{ПТ}}$	$R_{\text{ПТст}} X_{\text{ПТ}}$
	Валы вальмового зазора торресколы и аппараты	$R_{\text{ПТВЗ}}$	$X_{\text{ПТ}}$	$R_{\text{ПТВЗ}} X_{\text{ПТ}}$
	Остаточная вода в цистернах и т. д.	$\Delta R_{\text{В}}$	$X_{\text{В}}$	$\Delta R_{\text{В}} X_{\text{В}}$
	Итого	$\Sigma R_{\text{П}}$		$\Sigma M_{\text{П}}$
2	Топливо в топливной цистерне № 1 и топливной цистерне № n	$R_{\text{Т}}$	$X_{\text{Т}}$	$R_{\text{Т}} X_{\text{Т}}$
	Итого	$\Sigma R_{\text{Т}}$		$\Sigma M_{\text{Т}}$
3	Масло в цистерне судового запаса масла и цистерне чистого масла отстой	$R_{\text{М}}$	$X_{\text{М}}$	$R_{\text{М}} X_{\text{М}}$
	Итого	$\Sigma R_{\text{М}}$		$\Sigma M_{\text{М}}$
4	Промывка и вода а) промывка б) пресная вода в цистерне № 1 в цистерне № 2 в цистерне № n	$R_{\text{ПР}}$	$X_{\text{ПР}}$	$R_{\text{ПР}} X_{\text{ПР}}$
		$R_{\text{В}}$	$X_{\text{В}}$	$R_{\text{В}} X_{\text{В}}$
		$R_{\text{П}}$	$X_{\text{П}}$	$R_{\text{П}} X_{\text{П}}$
		$R_{\text{В}}$	$X_{\text{В}}$	$R_{\text{В}} X_{\text{В}}$
	Итого промывки и пресной воды	$\Sigma R_{\text{ПРВ}}$	$X_{\text{ПРВ}}$	$\Sigma M_{\text{ПРВ}}$
5	Питательная вода в цистерне № 1 в цистерне № 2 дистиллят в цистерне	$R_{\text{ПВ}}$	$X_{\text{ПВ}}$	$R_{\text{ПВ}} X_{\text{ПВ}}$
		$R_{\text{Д}}$	$X_{\text{Д}}$	$R_{\text{Д}} X_{\text{Д}}$
		$R_{\text{В}}$	$X_{\text{В}}$	$R_{\text{В}} X_{\text{В}}$
	Итого	$\Sigma R_{\text{ПВД}}$		$\Sigma M_{\text{ПВД}}$
6	Патроны резервации	$R_{\text{ПР}}$	$X_{\text{ПР}}$	$R_{\text{ПР}} X_{\text{ПР}}$
	Итого:	$\Sigma R_{\text{ПР}}$	$X_{\text{ПР}}$	$\Sigma M_{\text{ПР}}$

7.6. Определение потребного объема цистерн вспомогательного балласта

Рассмотрим в качестве примера расчет по смешанной схеме удифференцировки подводной лодки, когда вода замещения принимается не только в уравнительные, но и в носовую или кормовую дифференциальные цистерны. Расчет выполняется в табличной форме (табл. 7.3).

Таблица 7.3.

Изменение нагрузки при расхождении переменных грузов

№ п/п	Наименование грузов	Вес груза	Плечо от миделя	Момент
		γ	m	
1	Водоуказание Израсходована вода большого запаса в торсионных генераторах Вода из торсионноампельного цистерну Вода в цистерну кольцевого запора	$-P_{10T}$	x_{1A}	$-P_{10T} x_{1A}$
		$(P_2 - \Delta P_1) x_{1TA}$	x_{1A}	$(P_2 - \Delta P_1) x_{1TA} x_{1A}$
		$P_1 x_{1T}$	x_{1T}	$P_1 x_{1T} x_{1T}$
	Итого	$x_{1A} \Delta P_1$	x_{1T}	$x_{1A} \Delta P_1 x_{1A}$
2	Перелуск воды кольцевого запора из торсионных аппаратов в цистерну кольцевого запора	$-P_{10}$	x_{1A}	$-P_{10} x_{1A}$
		$+P_{10}$	x_{1B}	$P_{10} x_{1B}$
		\emptyset		$-\Delta M_{10}$
	Итого	\emptyset		$-\Delta M_{10}$
3	Топливо и масло. Израсходовано топливо. Разность между весом воды замещения и весом топлива при $\rho_0 = 0,83 \text{ т/м}^3$ и $\rho = 1,03 \text{ т/м}^3$ $\Delta P = 0,212 P_0$ Израсходовано масло	ΔP	x_{10A}	$\Delta P x_{10A}$
		$-k_{\text{мас}} P_2$	x_{10B}	$-k_{\text{мас}} P_2 x_{10B}$
		$\Delta P_1 m$	x_{10T}	ΔM_{10}
	Итого	$\Delta P - k_{\text{мас}} P_2$	x_{10T}	ΔM_{10}
4	Промывка и вода	$-P_{10T}$	x_{10T}	$-\Delta M_{10T}$
5	Питательная вода	$-P_{10B}$	x_{10B}	$-\Delta M_{10B}$
n	Нагрев реактивов	$-P_{10P}$	x_{10P}	$-\Delta M_{10P}$
	Итого	ΣP_{10}	x_{10}	ΣM_{10}

где ΣP_{10} и ΣM_{10} — вес и создаваемый дифференцирующий момент принятым вспомогательным балластом.

Очевидно, что для того, чтобы подводная лодка при замещении переменных грузов находилась в равновесии, необходимо так подобрать количество и распределение вспомогательного балласта по цистернам, чтобы существовало следующее равенство:

$$\begin{aligned} \Sigma P_{10T} &= \Sigma P_{10B} \\ \Sigma P_{10T} \cdot x_{10T} &= \Sigma P_{10B} \cdot x_{10B} \end{aligned} \quad (7.12)$$

Для обеспечения равенства и распределения объема цистерн вспомогательного балласта проведем замещение переменных грузов в табл. 7.4.

Таблица 7.4.

Замещение переменных грузов

№ п/п	Наименование грузов и цистерн	Вес груза γ	Плечо от миделя m	Момент γm
1	Водоуказание Вода в носовую дифференциальную цистерну Вода из кормовой дифференциальной цистерны	\emptyset	x_{10A}	$-\Delta M_{10}$
		$+P_{10A}$	x_{10A}	M_{10A}
		$-P_{10B}$	x_{10B}	$-M_{10B}$
	Итого	\emptyset		$\Delta M_{10} = 0$
2	Перелуск воды кольцевого запора Вода в носовую дифференциальную цистерну Вода из кормовой дифференциальной цистерны	\emptyset		$-\Delta M_{10}$
		$+P_{10A}$	x_{10A}	M_{10A}
		$-P_{10B}$	x_{10B}	$-M_{10B}$
	Итого	\emptyset		0
3	Топливо и масло Вода из уравнительной цистерны № 2 Вода из кормовой дифференциальной цистерны Вода в носовую дифференциальную цистерну	ΔP	x_{10A}	ΔM_{10}
		$-P_{10B}$	x_{10B}	$-M_{10B}$
		$-P_{10A}$	x_{10A}	$-M_{10A}$
	Итого	\emptyset		0
4	Промывка и вода Вода в уравнительную цистерну № 2 Вода в носовую дифференциальную цистерну Вода из кормовой дифференциальной цистерны	$-P_{10T}$	x_{10T}	$-M_{10T}$
		P_{10B}	x_{10B}	M_{10B}
		$-P_{10A}$	x_{10A}	$-M_{10A}$
	Итого	\emptyset		0
5	Питательная вода Вода в уравнительную цистерну № 2	$-P_{10T}$	x_{10T}	$-M_{10T}$
		P_{10B}	x_{10B}	M_{10B}
n	Нагрев реактивов Вода в уравнительную цистерну № 2	$-P_{10P}$	x_{10P}	$-M_{10P}$
		P_{10B}	x_{10B}	M_{10B}
	Итого	\emptyset		\emptyset

Из табл. 7.4 видно, что при расходовании и замещении каждого отдельного переменного груза сохраняется равенство по силам и моментам. Следовательно, ПЛ будет в любом случае удифферентована.

На основании таблицы замещения переменных грузов может быть составлена итоговая таблица, позволяющая определить объемы цистерн вспомогательного балласта и количество начальной дифферентовочной воды в шкв (табл. 7.5).

Таблица 7.5

Сводная таблица количества воды в цистернах после замещения израсходованных переменных грузов

№ шкв	Наименование цистерны	Случаи замещения					
		1	2	3	4	5	и
		Возвратная	Перелес воды с цистерны балласта	Утечка в масло	Привалив в шкв	Начальная вода	Широна ретортации
1	Уравнительная цистерна № 1						
2	Уравнительная цистерна № 2	—	—	— R_{123}	R_{123}	R_{123}	R_{123}
3	Нормальная дифферентовая цистерна	R_{123}	R_{123}	R_{123}	R_{123}	—	—
4	Корректирующая дифферентовая цистерна	— R_{123}	— R_{123}	— R_{123}	— R_{123}	—	—

В указанной таблице приводятся все возможные случаи, как расходования, так и замещения переменных грузов. Анализ этой таблицы дает возможность определить потребные объемы цистерн и количество начальной дифферентовочной воды в каждой из цистерн. При анализе таблицы необходимо уделить особое внимание возможности существования каждого из рассмотренных случаев в совокупности с другими, т.е. взаимно определять и несовместимые случаи.

Объем уравнительной цистерны № 1 определяется изменением гидрологических факторов.

Следует отметить, что часть из перечисленных выше случаев расходования переменных грузов происходит одновременно (например, топлива и масла, провизии и пресной воды и других), поэтому их изолированное рассмотрение невозможно. Последнее вносит су-

щественные поправки в определение объемов цистерн вспомогательного балласта и количества начальной дифферентовочной воды.

Количество начальной дифферентовочной воды (НДВ) определяется как сумма всех случаев, в которых вода удаляется из данной цистерны плюс некоторый запас по воде, принимаемый на основании статистических данных по усмотрению конструктора:

$$P_{\text{НДВ}} = \sum_{i=1}^n (-P_i) + \Delta P. \quad (7.13)$$

Свободные объемы каждой цистерны, необходимые для замещения переменных грузов, определяются как сумма всех случаев замещения, в которых вода принимается в данную цистерну, плюс также некоторый запас по объему:

$$V_i = \sum_{j=1}^n \left(\frac{P_{ij}}{\rho} \right) + \Delta V. \quad (7.14)$$

Расчет замещения переменных грузов заканчивается общим выводом, показывающим, что выбранное количество цистерн вспомогательного балласта и их объем обеспечивает удифферентовку подводной лодки во всех практически возможных случаях расходования переменных грузов.

На основании выполненного расчета выпускается Инструкция расходования и замещения переменных грузов, которая входит в отчетную документацию подводной лодки. Она предназначена для руководства личному составу ПЛ по порядку расходования и замещения переменных грузов во время эксплуатации корабля.

В частности, в Инструкции описываются два метода удифферентовки уже построенной подводной лодки в период эксплуатации [84]:

- 1 метод сравнения с предыдущей удифферентовкой.
- 2 метод сравнения с нормальной нагрузкой.

Первый метод является более удобным, т.е. обладает наибольшей простотой. Суть его заключается в следующем.

При вычислении суммарных изменений грузов и их моментов ΔP и ΔM в таблицу удифферентовки записываются только те значения переменных грузов, которые расходовались или принимались вновь по сравнению с их состоянием на момент предыдущей удифферентовки. После суммирования величин ΔP и ΔM возможны следующие варианты:

$$\begin{aligned} \Delta P &\geq 0 \\ \Delta M &\geq 0 \end{aligned} \quad (7.15)$$

Количество воды в цистернах вспомогательного балласта определяется на основании решения уравнений сил и моментов.

Второй метод является контрольным и удифференцовка по этому методу выполняется периодически.

В таблицу расчетной удифференцовки записываются все переменные грузы, входящие на ПЛ в период расчета, с их моментами по длине и ширине. Рассчитывается и записывается также остаточная плавучесть ПЛ, возникшая из-за изменения плотности воды и балласта, корпуса и покрытий.

Полученный в таблице расчетной удифференцовки итог фактических грузов сравнивается с постоянной суммой всех переменных грузов при нормальной нагрузке, и разность этих величин определяет суммарное количество воды в уравнительных и дифференциальных цистернах.

Для компенсации дифференцирующего момента полученное количество воды должно быть распределено между цистернами таким образом, чтобы суммарный момент веса этой воды был равен разности между постоянным моментом всех переменных грузов при нормальной нагрузке и итоговому фактическому моменту грузов на корабле. Естественно, что распределение воды между цистернами вспомогательного балласта должно производиться с учетом схемы удифференцовки (раздельной или смешанной). Следует помнить, что при раздельной схеме общее количество воды в дифференциальных цистернах всегда постоянно.

8. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФОРМЫ КОРПУСА ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ

8.1. Выбор архитектурно-конструктивного типа

Определению главных размерений ПЛ предшествует один из наиболее ответственных этапов разработки проекта — выбор архитектурного типа корпуса и принципов общего расположения вооружения и оборудования подводной лодки, от которых главным образом, зависит возможность варьирования отдельными элементами корабля с целью получения наиболее высоких боевых качеств, не превышая обусловленного заданием водоизмещения. Архитектурный тип выбирается не только исходя из предъявляемых к кораблю требований, условий его использования, но также опыта и школы проектировщика.

В практике подводного кораблестроения под архитектурой подводной лодки понимается совокупность общепроектных технических решений, определяющих особенности внешнего облика, формы и конструкции корпуса, оправдания выдвинутых устройств, выступающих частей, расположения помещений, цистерн, важнейших видов вооружения и оборудования [28].

К основным элементам архитектуры ПЛ обычно относят:

- архитектурно-конструктивный тип ПЛ;
- форму обводов наружного корпуса и выступающих частей;
- число и расположение встав.

В понятие «архитектура» могут включаться и другие особенности подводной лодки, оказывающие влияние на ее облик [82].

Архитектурно-конструктивный тип подводной лодки в зависимости от наличия наружного (легкого) корпуса принято называть:

- *однокорпусным*, когда наружный корпус отсутствует на всей длине прочного корпуса. Балластные цистерны у данного типа ПЛ располагаются в оконечностях (рис. 8.1а) и внутри прочного корпуса и том случае, если требуется обеспечение подводной непотопляемости;

— *двухкорпусным*, когда наружный корпус полностью охватывает прочный корпус на всей его длине. В этом случае между корпусами размещены штерны главного балласта (рис. 8.1б);

— *полторакорпусным* (за рубежом называемым смешанным), когда по длине прочного корпуса чередуются однокорпусные и двухкорпусные конструкции (рис. 8.1а);

— *многокорпусным*, когда наружный корпус полностью охватывает два и более прочных корпуса. Данный тип характерен для подводных транспортных судов (рис. 8.1г).

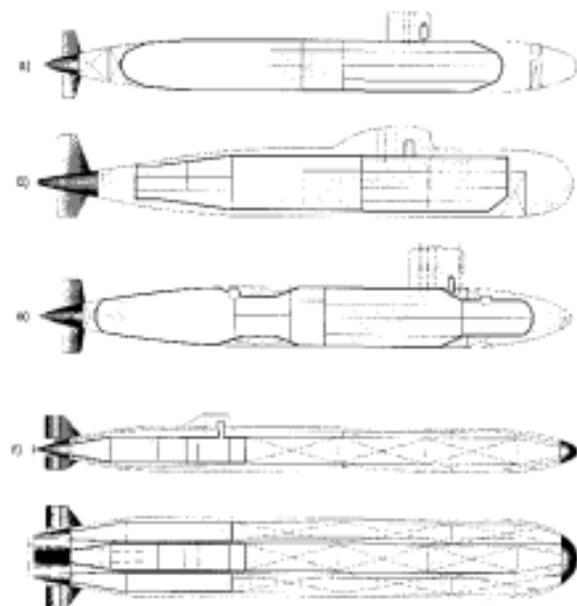


Рис. 8.1. Архитектурно-конструктивные типы современных подводных лодок

Архитектурно-конструктивный тип ПЛ определяется в начальной стадии проектирования, так как оказывает непосредственное влияние на величину водоизмещения и главные размеры корабля.

Рассмотрим некоторые факторы, которые необходимо учитывать при выборе архитектурного типа. Прежде всего необходимо решить вопрос об обеспечении непотопляемости ПЛ в надводном положении, что позволит в первом приближении назначить величину запаса плавучести.

У подводных лодок любых архитектурно-конструктивных типов существуют концевые штерны главного балласта. Доля запаса плавучести, размещаемого в концевых ЦТБ будет различной для ПЛ различного водоизмещения. У малых ПЛ ($D_0 = 400-500$ т) в концевых штернах может располагаться до 50% запаса плавучести, у больших — значительно меньше. Очевидно, что использование однокорпусного типа для подводных лодок с обеспеченной надводной непотопляемостью довольно сложная задача.

Существуют трудности с размещением запаса плавучести и при проектировании ПЛ малого водоизмещения двухкорпусного типа, минимальная ширина междубертного пространства регламентируется конструктивными и технологическими соображениями, что приводит к высокому значению запаса плавучести и как следствие к снижению ряда ТТХ корабля.

В мировой практике существует два подхода к вопросу о непотопляемости подводных лодок в надводном положении.

Американские конструкторы при создании атомных подводных лодок первого поколения "Наутилус", "Сейг" (рис. 8.2) применили полторакорпусный архитектурный тип.

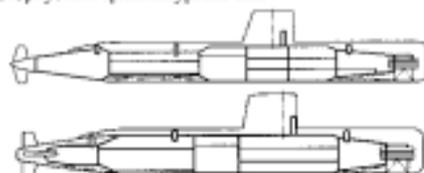


Рис. 8.2. Схемы архитектурных типов подводных лодок первого поколения США

Выбор такого решения был обусловлен стремлением сократить полное подводное водоизмещение ПЛ для достижения более высоких скоростей

хода при имеющейся мощности установки. Кроме того, отпала необходимость в размещении на ПЛ больших запасов топлива.

Применение полторакорпусного архитектурного типа потребовало пересмотра взглядов на надводную непотопляемость и, как следствие, отказа от одноотсечного стандарта непотопляемости. Если остальные факторы носили характер естественной эволюции, то в данном вопросе произошел определенный скачок развития архитектуры подводной лодки с переходом на качественно новый ее уровень.

В результате запас плавучести сократился с 25—35% от нормального водоизмещения, характерных для дизельных ПЛ, до 14—16%.

В отличие от американских ПЛ, советские атомные подводные лодки первого поколения типа "Ленинский Комсомолец" (рис. 8.3) сохранили двухкорпусный тип архитектуры.

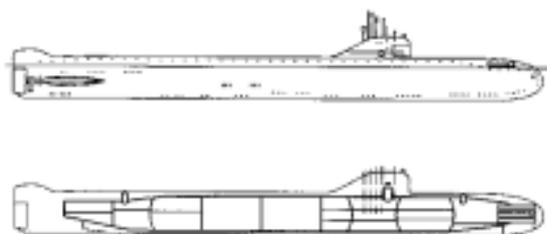


Рис. 8.3 Наружный вид и схема корпуса первой атомной ПЛ "Ленинский Комсомолец"

Это определялось тем, что необходимость обеспечения одноотсечного стандарта непотопляемости не подвергалась сомнению. Более того, специалисты ВМФ настаивали на обеспечении всплытия аварийной ПЛ с грунта при полном затоплении любого из отсеков прочного корпуса. Это требовало не только развитого запаса плавучести, но и упрочнения межотсечных переборок и увеличения запаса воздуха высокого давления [5].

Другим фактором, определявшим сохранение двухкорпусного типа на советских ПЛ, являлось придание наружному корпусу хорошо обтекаемых обводов. Данный тип позволяет иметь большую свободу при проектировании как прочного, так и наружного корпуса.

При выборе архитектурного типа необходимо учитывать и вопросы устойчивости. У однокорпусных ПЛ, как правило, хорошая остойчивость в подводном положении.

В надводном же положении ухудшение устойчивости однокорпусных ПЛ связано с малой площадью действующей ватерлинии и, как следствие, с малыми значениями момента инерции. Особенно трудно обеспечить устойчивость в надводном положении у ПЛ малого водоизмещения. Например, на XII серии "Малютки" времен второй мировой войны для получения удовлетворительной устойчивости в надводном положении вынуждены были уложить твердого балласта $R_{\text{д}} = 12\% D_{\text{в}}$ [35].

У двухкорпусных подводных лодок ширина действующей ватерлинии возрастает за счет расколованных в междурном пространстве простири главного балласта, что приводит к улучшению характеристик устойчивости в надводном положении. В подводном положении устойчивость двухкорпусных ПЛ обеспечивается соответствующим расположением оборудования и балласта.

На выбор архитектурно-конструктивного типа ПЛ влияют и конструктивные особенности проекта. Так, например, двухкорпусная конструкция позволяет использовать наружные шпангоуты на прочном корпусе, что имеет определенные преимущества при размещении оборудования внутри прочного корпуса.

Двухкорпусный вариант уменьшает и эффект воздействия некоторых типов противолодочного оружия, что повышает живучесть корабля.

При создании подводных лодок малого водоизмещения может быть выдвинуто требование транспортировки их по железной дороге. Какой из архитектурных типов в данном случае имеет преимущества сказать сложно, так как при транспортировке возможен демонтаж легких конструкций или разреза ПЛ на блоки.

Для большинства подводных лодок, построенных в мире за последние двадцатилетие, характерно применение как однокорпусного, так и двухкорпусного архитектурного типа. Каждая из школ продолжает следовать своим национальным путем. США развивали однокорпусный вариант, Россия сохраняла двухкорпусный.

Подводные лодки типа "Лос-Анжелес" (рис. 8.1а) стали первыми полностью однокорпусными атомными подводными лодками. На всем протяжении прочного корпуса отсутствует как легкий корпус, так и надстройка. Прочный корпус в носу и корме завершается коническими обечайками, к которым крепятся оконечности. Изменяя и

принцип расстановки поперечных переборок, который заключается в уменьшении их количества.

Масса, ранее используемая на межотсечные переборки, может быть более рационально использована для решения других задач, в частности улучшения обитаемости и удобства размещения и обслуживания механизмов и систем [28].

Подводные лодки России до недавнего времени имели только двухкорпусную архитектуру.

Вместе с тем на подводных лодках IV поколения применен подторакорпусный (смешанный) архитектурный тип корабля, который позволил обеспечить надводную непотопляемость при более низких значениях запаса плавучести (18—20% D_0).

8.2. Форма обводов наружного корпуса и выступающих частей

Гидродинамические качества ПЛ определяют ее способность совершать пространственное маневрирование в толще воды с необходимой скоростью. В свою очередь указанные качества (ходкость и маневренность) определяют способность ПЛ выполнять переход в район боевых действий за заданное время, вести бой и уклоняться от противоположных сил и оружия противника. Поэтому гидродинамические факторы, которые, как правило хорошо согласуются с акустическими, оказывают доминирующее влияние на формирование обводов корпуса ПЛ, форму и расположение выступающих частей [63].

В результате эволюционного развития ПЛ были выработаны следующие принципы их проектирования, ставшие в настоящее время основополагающими для обеспечения гидродинамических качеств:

- безусловный приоритет подводного плавания;
- достижение максимально возможной скорости хода в подводном положении при заданной мощности установки;
- обеспечение высоких маневренных качеств во всем диапазоне скоростей хода;
- обеспечение оптимальных условий для работы двигателей;
- обеспечение минимальной гидродинамической составляющей акустического поля ПЛ и помех работе собственных шумопеленгаторных станций.

Гидродинамические качества связаны с внешним обликом ПЛ и элементами так называемой внешней архитектуры корабля — формой корпуса и расположением выступающих частей. Для их характеристики используется целый ряд параметров, которые могут быть разбиты на две группы. Первая группа описывает обводы корпуса

ПЛ в целом, другая характеризует форму составных частей корпуса и архитектурных элементов (ограждение выдвинутых устройств, кормовое оперение) и их положение на корпусе.

К основным параметрам (первая группа) относятся:

- форма корпуса ПЛ в целом;
- относительная длина корпуса, определяемая как отношение длины к полному подводному водоизмещению $\ell = L/V_{\text{пл}}^{1/3}$ или отношение длины к ширине $\ell = L/B$, как частный случай, характерный для подводного положения;
- окантовка модельного сечения — отношение высоты корпуса к его ширине H/B ;
- относительные прогибности носовой и кормовой оконечностей и цилиндрической вставки $L_{\text{но}}/L$; $L_{\text{ко}}/L$; $L_{\text{ц}}/L$;
- коэффициенты полноты корпуса (коэффициент общей полноты δ , коэффициент продольной остроты ϕ и коэффициент полноты площади модель-шангута β).

К локальным параметрам, определяющим форму отдельных частей корпуса (вторая группа), относятся:

- угол заострения кормовой оконечности α ;
- коэффициенты полноты носовой и кормовой оконечностей $\delta_{\text{но}}$ и $\delta_{\text{ко}}$;
- форма, размеры и положение по длине ПЛ ограждения выдвинутых устройств;
- тип, размеры и расположение по длине кормового оперения и носовых горизонтальных рулей.

Эволюция архитектурного облика подводных лодок наглядно отражает тенденции их развития и представляет собой показательный пример успешной проектной работы. Достижение диалектического единства между техническим содержанием и формой, в которую это содержание облечается.

Это требует своевременной разработки научно обоснованной, ориентированной на перспективу концепции проектирования формы. В этом отношении характерна точка зрения известного американского специалиста в области проектирования Т.К. Гилмера, считающего, что "здесь всем многообразием и сложностью различных корабельных систем и подсистем и их функциональной значимости для корабля лет более важной характеристикой, чем геометрическая форма его корпуса" [23].

Анализируя развитие подхода к проектированию формы корпуса и выступающих частей, можно выделить несколько этапов, на

которых состав факторов, влияющих на проектирование, и связанные с ними критерии существенно изменялись.

На первом этапе, который условно можно ограничить периодом времени до широкого внедрения атомной энергетики, форма обводов диктовалась в основном требованиями ходкости, маневренности и мореходности в надводном положении. Это являлось прямым следствием ограниченной мощности энергетических установок, обеспечивающих подводное плавание, диктовавшим соответствующую тактику использования ПЛ [85].

Другим важным моментом было слабое развитие средств противолодочной обороны, позволяющих подводным лодкам активно действовать в надводном положении.

Теоретической основой для выбора параметров формы корпуса ПЛ служили многочисленные труды по ходкости и управляемости быстроходных надводных кораблей.

Цель использовавшегося на этом этапе подхода к проектированию формы можно выразить как достижение максимальной скорости надводного хода.

$$\begin{aligned} C &\Rightarrow \max \vartheta_{\text{над}}(X_i) \\ X_i &\in X_{\text{над}} \end{aligned} \quad (8.1)$$

где $\vartheta_{\text{над}}$ — скорость надводного хода в надводном положении;

X_i — параметры, характеризующие форму наружного корпуса.

Следствием такого подхода было применение обводов корпуса, характерных для быстроходных кораблей (рис. 8.4)

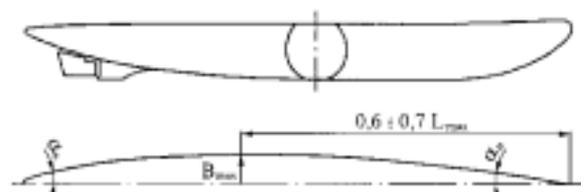


Рис. 8.4. Штепсельная форма корпуса ПЛ

Основными чертами формы наружного корпуса являлись:

- штепсельная форма оконечностей;

- большие значения удлинения корпуса L/B до 13—14 и относительной длины $L/V_{\text{над}}^K > 5.5 \dots 6.0$;

- острые слопы ватерлиний в носу и корме (угол носового заострения $\alpha_n = 4-5^\circ$, кормового заострения $\alpha_k = 7-8^\circ$);

- смещение шпангоута наибольшей площади в корму от миделя;

- развал и подъем бортов в носовой оконечности;

- значительные плоские участки шпубы, многочисленные плоскообтекаемые в подводном положении детали.

Переломным моментом в превращении подводной лодки из выходящего в истинно надводный корабль явилось внедрение на них атомных энергетических установок. Открывшиеся при этом широкие возможности по улучшению ходовых и маневренных качеств в полной мере могли быть реализованы только на подводных лодках, форма корпуса которых в максимальной степени приспособлена к условиям подводного плавания. В качестве основной динамической характеристики рассматривалась максимальная скорость подводного хода. В последующем этот подход был применен и при проектировании дизельных ПЛ III и IV поколений, так как в современных условиях нахождение ПЛ в надводном положении означает ее неминуемую гибель. На рис. 8.5 показана тенденция изменения максимальных надводных и подводных скоростей для дизельных подводных лодок разных поколений [48].

Таким образом, в соответствии с концепцией достижения высоких ходовых и маневренных качеств проектисты стремились в первую очередь увеличить максимальную скорость подводного хода при выполнении целого ряда критериев управляемости [63]:

$$\begin{aligned} C &\Rightarrow \max \vartheta_{\text{под}}(X_i, X_j) \\ X_i &\in X_{\text{под}}, \\ X_j &\in X_{\text{уп}} \end{aligned} \quad (8.2)$$

где $\vartheta_{\text{под}}$ — скорость подводного хода в подводном положении;

X_i — параметры формы корпуса и оперения;

X_j — значения критериев управляемости.

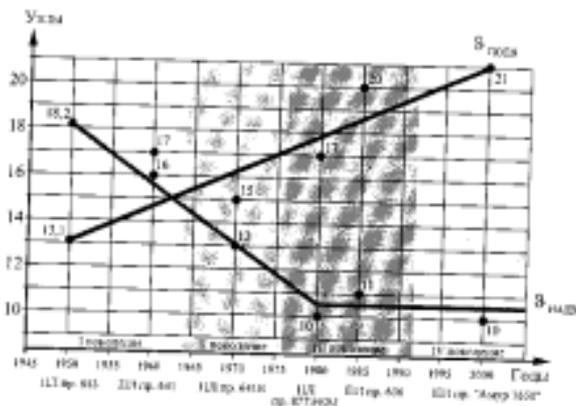


Рис. 8.5. Тенденция изменения максимальной подводной и подводной скоростей ДПЛ разных поколений

Оптимальная форма для подводного плавания спецподразделений известна давно (рис. 8.6).

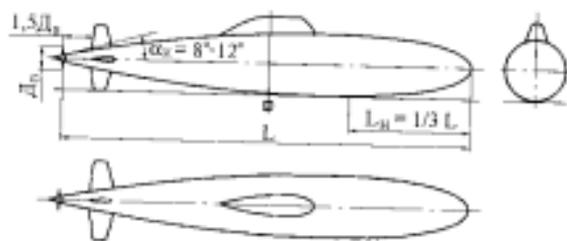


Рис. 8.6. Осесимметричная форма корпуса ПЛ

Это тело вращения с носовой оконечностью по форме приближающейся к трезлому эллипсоиду. Кормовая оконечность сильно

заострена $\alpha_k = 8-12^\circ$. Наиболее полное сечение смещено в нос от носила и расположено примерно на $(0,3-0,4) L$ от носового перпендикуляра. Относительное удлинение у таких корпусов значительно меньше и составляет $L/B = 7-9$ при значениях относительной длины $L/V_{max} = 4,8-5,3$.

Однако нарисовать идеальную форму, обеспечивающую наименьшее сопротивление при движении в подводном положении значительно проще, чем спроектировать корпус реальной подводной лодки. Этому несколько причин.

Во-первых, при оптимальном удлинении возникают трудности с расположением оборудования по отсекам.

Во-вторых, узкое пространство в кормовой оконечности создает затруднения в расположении приводов рулей и линии вала.

Кроме того, при затоплении кормовых отсеков возникает трудность в компенсации отрицательной плавучести, так как узкое междубортное пространство в корме приводит к малому объему ЦГБ.

Наружный корпус подводной лодки обычно имеет местные надельки, такие как ограждение выдвижных устройств, надстройка, оперение, которые искажают облик закономерности обводов (рис. 8.7.) [45]

Их присутствие на корпусе вызвано тем, что при проектировании необходимо решить целый комплекс частных задач, таких как размещение гидроакустических станций, выдвижных устройств, комплексов вооружения, рулей и т.д.



Рис. 8.7. Ограждение выдвижных устройств и надстройка на осесимметричном корпусе ПЛ

Указанные отступления естественно приводят к увеличению сопротивления движению ПЛ, ухудшают параметры скрытности, но они необходимы для ее нормальной эксплуатации.

Поставим задачу выбора основных параметров формы корпуса ПЛ и соотношений ее главных размерений следующим образом:

1. Оптимальная форма корпуса по условиям подводного плавания известна.
2. Изменятся вынужденные отклонения от рекомендаций ходкости по выбору основных параметров формы ПЛ.
3. Необходимо исследовать влияние изменения основных параметров на ходовые и маневренные качества, чтобы проектировщик знал цену отступлений от оптимальных значений.

8.3. Влияние соотношений главных размерений L/B и H/B на ходовые и маневренные качества подводной лодки

В теории проектирования судов под относительной длиной корабля — ℓ понимается отношение, характеризующее заострение его ватерлиний:

$$\ell = \frac{L}{\sqrt{V}} = \sqrt{\frac{L^2}{\Delta \cdot B \cdot T}} = \ell_0^{\delta} \cdot (\ell_0 / \delta)^{\delta} \quad (8.3)$$

Из приведенной зависимости видно, что на величину относительной длины влияют такие характеристики полноты и остроты обводов как отношения $\ell_0 = L/B$, $b_0 = B/T$ и коэффициент общей полноты δ .

В.Л. Поздониин отмечал [67], что каждая из этих характеристик в отдельности не дает полного представления об остроте корабля, в то время как относительная длина — ℓ характеризует эту остроту и поэтому должна использоваться при оценке ходкости судна.

В то же время в публикации, посвященной данному вопросу, применительно к подводным лодкам часто фигурирует не относительная длина ℓ , а отношение L/B, которое называют удлинением ПЛ. Насколько такая замена в вопросах исследования ходкости правомерна? Дело в том, что при исследовании влияния относительной длины на ходовые качества ПЛ в подводном положении в выражении (8.3) величина осадки заменяется высотой корпуса H, которая для тела вращения равна ширине (H = B). В этом случае зависимость (8.3) преобразуется в вид

$$\ell = \frac{L}{\sqrt{V_{\text{пр}}}} = \delta^{\delta/2} \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^{\delta/2} \quad (8.4)$$

что дает право анализировать влияние отношения L/B на ходовые качества ПЛ.

Как известно, под ходкостью понимается способность ПЛ двигаться заданной скоростью при минимально необходимых затратах мощности энергетической установки.

В общем виде скорость ПЛ и необходимая для ее достижения мощность ГЭУ связаны следующей зависимостью.

$$N = \xi \frac{\rho V^3}{2} \frac{\Omega_0}{\eta_k \eta_{\text{в}}}, \quad (8.5)$$

где N — мощность установки на валу;

ξ — коэффициент сопротивления;

Ω_0 — смоченная поверхность голого корпуса;

η_k — коэффициент аэриации корпуса;

$\eta_{\text{в}}$ — КПД гребного винта.

Таким образом, ходовые качества ПЛ зависят от сопротивления воды движению (ξ), эффективности двигателя и его взаимодействия с корпусом (η_k ; $\eta_{\text{в}}$), а также величины смоченной поверхности (Ω_0), т.е. от размеров ПЛ.

Для «голового» корпуса подводной лодки (без выступающих частей и ОБУ) при движении в подводном положении наиболее существенными являются сопротивление трения и сопротивление формы. У современных ПЛ с хорошо обтекаемыми осесимметричными обводами на долю сопротивления трения приходится 50—60% полного сопротивления. Как известно из курсов теории корабля величина сопротивления трения определяется по формуле Шлихтинга для эквивалентной пластины, а затем корректируется коэффициентами, учитывающими шероховатость поверхности корпуса и кривизну обводов:

$$R_{\text{тр}} = \frac{0,455}{(\log Re)^{2,58}} \frac{\rho S^2}{2} \Omega_0, \quad (8.6)$$

где $Re = \frac{\rho L}{\nu}$ — число Рейнольдса;

ν — коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$

Вторая составляющая сопротивления — сопротивление формы обусловлена вязкостью воды и отражает влияние формы обводов и соотношения главных размеров на распределение давлений по длине корпуса.

Учитывая общую вязкостную природу сопротивления трения и формы, для хорошо обтекаемых тел сопротивление формы принято выражать через сопротивление трения.

$$R_o = k_o R_T \quad (8.7)$$

где k_o — безразмерный коэффициент, связывающий величину сопротивления формы с величиной сопротивления трения, может быть определен по номограмме В.Ф. Дробленкова (рис. 8.8) [29].

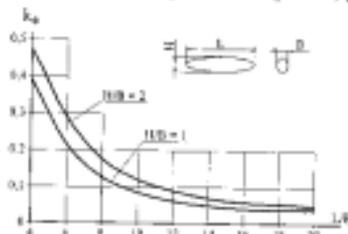


Рис. 8.8. Кривые В.Ф. Дробленкова для определения расчетных значений коэффициента k_o хорошо обтекаемых тел в зависимости от их относительного удлинения L/B и овалности N/B

Как следует из приведенного рисунка, диапазон изменения коэффициента k_o для принятого у ПЛ интервала удлинения составляет 0,1—0,2. Это означает, что величина сопротивления формы не превышает 10—20% сопротивления трения. Очевидно также, что увеличение удлинения корпуса до $L/B = 10$ —14 приводит к уменьшению сопротивления формы.

В то же время, увеличение удлинения приводит к росту величины смоченной поверхности, а, следовательно, и сопротивления трения.

Вместе с тем рост удлинения ПЛ приводит к возрастанию числа Re и уменьшению сопротивления трения, однако его влияние значительно слабее, чем влияние смоченной поверхности. Противоположное влияние удлинения корпуса ПЛ на составляющие вязкостного сопротивления предполагает существование такого значения удли-

нения, при котором величина сопротивления принимает минимальное значение (рис. 8.9) [28].

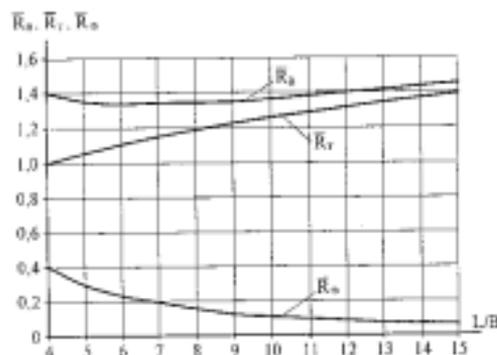


Рис. 8.9. Зависимость вязкостного сопротивления корпуса ПЛ от относительного удлинения L/B

\bar{R}_T — относительная величина сопротивления трения;

\bar{R}_o — относительная величина сопротивления формы;

\bar{R}_o — относительная величина вязкостного сопротивления

$$\bar{R}_o = \bar{R}_T + \bar{R}_o$$

Примечания: 1. Относительная величина всех составляющих сопротивления получена, как их отношение к задатке сопротивления трения при удлинении корпуса $L/B = 4$;

2. При построении графиков полное подводное волнообразование принято постоянным.

Овальность корпуса ($N/B \geq 1$) также приводит к увеличению смоченной поверхности. Количественная зависимость величины относительной смоченной поверхности $\bar{\Omega} = \Omega / V^X$ хорошо объективирует тел от N/B при различных L/B приведена на рис. 8.10 [29].

Из рисунка видно, что величина $\bar{\Omega}$, а при равных V и величина Ω растут как с увеличением удлинения, так и с отклонением формы поперечных сечений корпуса от круговых.

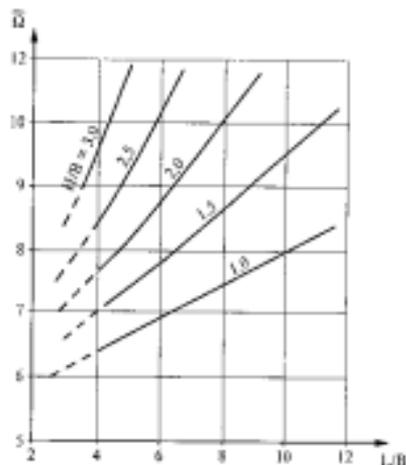


Рис. 8.10. Зависимость относительной поверхности хорошо обтекаемых тел от соотношений их главных размеров L/B и H/B

Результаты сравнительных расчетов показывают, что при отклонении формы поперечных сечений от круговых наблюдается увеличение полного вязкостного сопротивления, при этом оптимальные значения L/B значительно смещаются в сторону меньших значений (рис. 8.11).

Подытоживая изложенное, можно отметить, что по соображениям ходкости существует оптимальное удлинение корпуса ПЛ и отклонение от него в ту или иную сторону приводит к увеличению сопротивления, а следовательно и потребной мощности энергетической установки. Однако пологий характер зависимости $R_d = f(L/B)$ в области минимума (см рис. 8.9), дает возможность изменять удлинение корабля в пределах $L/B = 7-12$ без значительного увеличения мощности, так как изменение сопротивления в этом случае не превышает 10% [51].

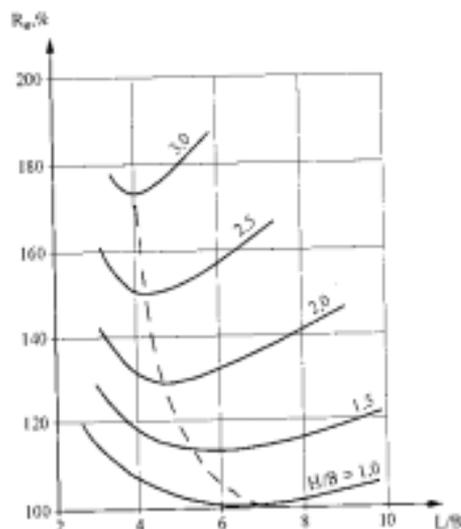


Рис. 8.11. Процентное приращение вязкостного сопротивления хорошо обтекаемых тел при отклонении соотношений их главных размеров от оптимальных ($H/B = 1,0$ и $L/B = 7,0$).

Удлинение наружного корпуса алает и на параметры управляемости ПЛ. Так, с ростом отношения L/B увеличивается статическая и динамическая устойчивость ПЛ при установившемся движении. А это значит, что площадь оперения с увеличением удлинения, при прочих равных условиях, для одного и того же коэффициента динамической устойчивости $k = \frac{\bar{b}^*}{b} \cdot \text{const}$ (где \bar{b}^* — приведенное плечо демпфирующих сил; \bar{b} — плечо равнодействующей гидродинамических сил) будет уменьшаться.

На рис. 8.12 показано изменение относительной площади оперения ПЛ $S_{оп} = \frac{S_{оп}}{V^{3/2}}$ от величины L/B при условии $k = \text{const}$ для горизонтального оперения.

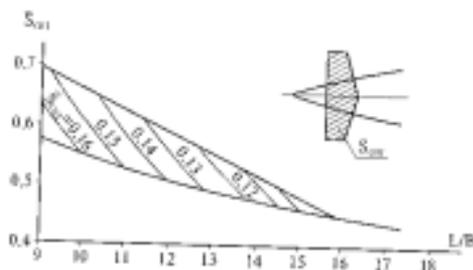


Рис. 8.12. Влияние удлинения ПЛ на величину относительной площади горизонтального оперения

В части влияния отношения H/B на управляемость ПЛ отметим следующее. У тела вращения $H/B = 1$ гидродинамические характеристики голого корпуса будут одинаковыми в вертикальной и горизонтальной плоскости. Однако, как правило, полной осесимметричности корпуса обеспечить не удается. По условиям размещения оборудования появляется надстройка, особенно развитая на ракетных ПЛ. На всех подводных лодках пока не избежать наличия ограждения выдвижных устройств и прочной палубы входа. По требованиям эксплуатации приходится идти на формирование плоской палубы надстройки. Ширина такой палубы должна быть минимально возможной. Это обусловлено тем, что в местах перехода от плоской палубы к бортам возникает система вихрей, увеличивающая сопротивление и изменяющая гидродинамические характеристики. Например, при встрече с большими углами атаки (аварийное всплытие при потере хода), т.е. фактически при поперечном обтекании, покажутся гидродинамические силы, которые могут приводить к крупным значительным величинам, особенно при развитом ограждении выдвижных устройств. Изменение формы поперечного сечения корпуса $H/B \approx 1,0$ существенно влияет на его гидродинамические характеристики и на характеристики устойчивости движения, что при заданных критериях статической и динамической устойчивости влияет на

необходимую площадь оперения. Расчеты показывают, что при сплюсывании корпуса в вертикальном направлении $H/B < 1$ устойчивость движения в вертикальной плоскости возрастает, а следовательно необходимая площадь неподвижного горизонтального оперения уменьшается (рис. 8.13). Однако следует иметь в виду, что подводное оперение (рули) при сохранении поворотности корпуса на прежнем уровне потребует большей площади [72].

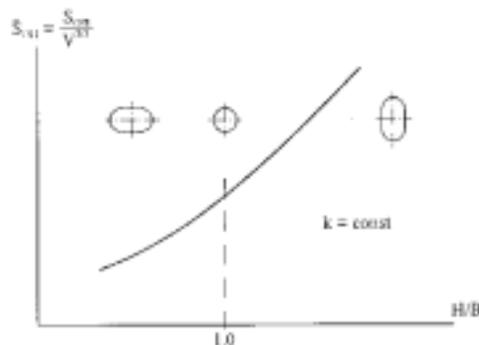


Рис. 8.13. Изменение относительной площади горизонтальных стабилизаторов при изменении H/B

Подобные рассуждения естественно можно провести относительно влияния H/B и на площадь вертикального оперения.

8.4. Влияние относительной протяженности цилиндрической вставки, носовой и кормовой оконечностей на ходовые качества ПЛ

Кроме соотношений главных размерений, на величину сопротивления формы оказывает влияние полнота корпуса и формообразование его оконечностей.

Это связано с тем, что по своей физической природе сопротивление формы представляет собой равнодействующую распределения сил давления в потоке, обтекающем корпус ПЛ. Распределение сил давления определяется формой обводов, но даже для хорошо обтекаемых тел вращения с безотрывным обтеканием характерно наличие значительных градиентов давления в носовой и кормовой частях

корпуса. В носовой части корпуса, где для обводов характерно резкое увеличение площади поперечных сечений, скорость натекающего потока заметно растет, что вызывает снижение гидродинамического давления и турбулентизацию пограничного слоя. В кормовой части наблюдается обратный процесс — скорость потока уменьшается с плавным градиентом, а давление соответственно растет. Вследствие вязкости воды и потери скорости в пограничном слое давление в кормовой части оказывается ниже, чем в носовой. Градиенты давления возникают также в местах расположения выступающих частей (ограничение рубки, кормовое оперение, обтекатели различных устройств и т.п.), где образуются вихри. Разность давления в кормовой и носовой частях корпуса приводит к возникновению сопротивления формы.

На рис.8.14. представлены эталонные распределения сил давления для тел вращения с обводами трех форм — параболическими, эллиптическими и эллиптическими с цилиндрической вставкой. Как видно из приведенных графиков, наименьшие градиенты сил давления, а следовательно и минимальное сопротивление формы имеет тело с эллиптическими обводами без цилиндрической вставки [5].

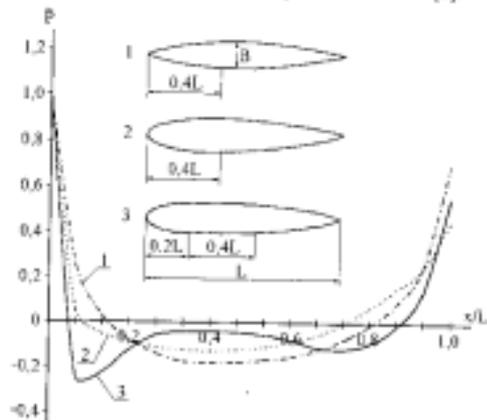


Рис.8.14. Распределение гидродинамического давления для тел вращения с относительной длиной $L/B = 7$

- 1 — тело с параболическими обводами;
- 2 — тело с эллиптическими обводами;
- 3 — тело с эллиптическими обводами и цилиндрической вставкой.

Примечание: \bar{P} — относительная величина гидродинамического давления, снятая относительно давления в произвольном сечении тела x скоростью течения;
 x/L — относительная координата по длине тела.

С другой стороны отметим, что при заданном объеме наружного корпуса исключение цилиндрической вставки приводит к сокращению длины ПЛ, что уменьшает смоченную поверхность и сопротивление трения.

Введение цилиндрической вставки и сокращение длины носового и кормового профилированных участков приводит к увеличению перепадов давления в оконечностях ПЛ (рис.8.15.), что влечет за собой рост сопротивления формы [82].

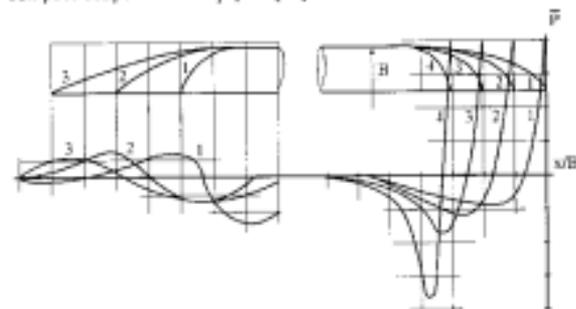


Рис.8.15. Распределение гидродинамического давления для тел вращения при изменении длин носовой и кормовой оконечностей.

Однако как показала практика, уменьшение смоченной поверхности перекрывает возрастание сопротивления формы, связанные с ростом коэффициента продольной полноты φ при увеличении L_{30}/L и в результате сопротивление R снижается.

Наличие цилиндрической вставки и возможность перемещения ее по длине корпуса дают также возможность при проектировании иметь на удельферостовку ПЛ в крайнем правом положении.

Кроме сопротивления воды движению ПЛ, propulsive quality корпуса корабля зависит от взаимодействия движителя с корпусом. Для ПЛ с гребными винтами (в частности этим типом движителей оснащено подавляющее большинство ПЛ) входящий в выражение (8.8) propulsive coefficient имеет вид:

$$\eta = \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{к}} = \eta_{\text{в}} \cdot \frac{1-t}{1-w} \quad (8.8)$$

где $\eta_{\text{в}}$ — КПД винта;

$\eta_{\text{к}}$ — коэффициент влияния корпуса;

t — коэффициент засасывания;

w — коэффициент попутного потока.

Взаимодействие корпуса и гребного винта определяется двумя процессами: работой винта в попутном потоке, вызванном движением масс воды вместе с корпусом корабля, и ускорением потока, обтекающего кормовую часть корпуса, вследствие засасывания, создаваемого гребным винтом [51].

Попутный поток в районе диска гребного винта определяется характером пограничного слоя в кормовой части ПЛ, который, в свою очередь, зависит от формы корпуса и абсолютных размеров ПЛ. Наличие попутного потока приводит к тому, что скорость натекающей на гребной винт воды оказывается меньше абсолютной скорости движения корабля. Это положительно сказывается на работе винта и ведет к некоторому повышению его КПД по сравнению с КПД такого же винта, работающего в "чистой воде".

Величина прироста КПД винта зависит от соотношения его диаметра и поперечных размеров попутного потока. В проектной практике при выполнении расчетов это отклонение заменяется отношением диаметра винта к ширине корпуса. С ростом этого отношения в реальном диапазоне от 0,3 до 0,6—0,7 влияние попутного потока возрастает, и это ведет к увеличению КПД винта. Однако возможность увеличения диаметра гребного винта на практике зависит от параметров энергетической установки (частоты вращения гребного вала) и имеет ограниченный диапазон для оптимизации.

В отличие от попутного потока засасывание имеет отрицательное действие, т.е. приводит к некоторому увеличению сопротивления движению корабля. В основе этого явления лежит эффект увеличения скорости потока, обтекающего кормовую оконечность, вследствие работы гребного винта. Это приводит к росту сопротивления трения кормовой оконечности и к снижению гидродинамического давления в кормовой части корпуса, которое вызывает увеличение

сопротивления формы. Область проявления эффекта засасывания невелика и ограничивается расстоянием, примерно равным двум диаметрам гребного винта.

Для подводных лодок величина коэффициента влияния корпуса определяется, главным образом, формообразованием кормовой оконечности и удлинением корпуса. Для одноваловых ПЛ основным параметром, определяющим полноту и длину кормовой оконечности, является угол кормового заострения, т.е. угол, образуемый обводом корпуса с продольной осью. Как правило, величина угла кормового заострения ограничивается по условиям безотрывного обтекания диапазоном 8—12° (на один борт).

С ростом угла кормового заострения коэффициент засасывания возрастает (рис. 8.16) [5].

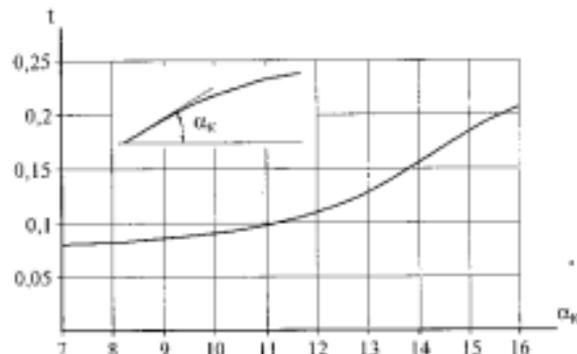


Рис. 8.16. Зависимость коэффициента засасывания t от угла кормового заострения корпуса α_k .

Примечание: Зависимость построена для гребного винта с относительным диаметром $\bar{d} = \frac{d}{B} = 0,4$,

где d — диаметр винта;

B — ширина корпуса ПЛ.

Как видно из приведенного рисунка, минимальный коэффициент засасывания имеет место в диапазоне углов кормового заострения $\alpha_k = 7-9^\circ$.

На полутный поток небольшое влияние оказывает удлинение корпуса (рис. 8.17).

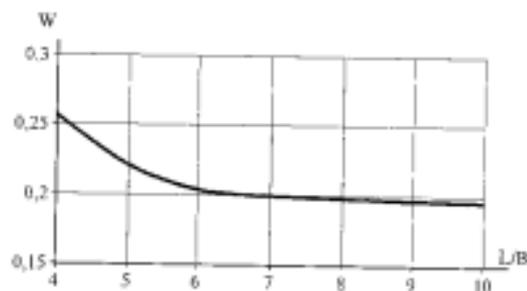


Рис. 8.17. Зависимость коэффициента полутного потока W от относительного удлинения корпуса L/B

Примечание: зависимость построена для гребного винта с относительным диаметром $\bar{d} = d/B = 0,4$

С ростом относительной длины корпуса ПЛ коэффициент полутного потока убывает, достигая минимума при L/B от 8 до 10. Поэтому целесообразно использовать диапазон L/B от 6 до 8, который также оптимален и по комплексу факторов сопротивления трения и формы.

При выполнении перечисленных условий для коэффициентов засасывания и полутного потока обобщающий их действие коэффициент влияния корпуса для одинаковых ПЛ будет находиться в диапазоне значений 1,14—1,16 (рис. 8.18) и обеспечит получение значимой продольного коэффициента 0,75—0,80 [5].

Следует отметить, что с увеличением угла кормового заострения и полноты кормовой оконечности происходит увеличение ее жесткости, которое благоприятно сказывается на вибрационных характеристиках. Вместе с тем усложняются проблемы размещения кормового оперения. Наибольшие сложности возникают у крестообразного оперения, нижней вертикальной руль которого может выступать ниже основной плоскости, т.е. выходить за габариты корпуса и увеличивать габаритную осадку ПЛ. Кроме того, увеличивается габаритная

ширина ПЛ по горизонтальному оперению, что создает определенные сложности при эксплуатации ПЛ. Учитывая это, выбор параметров формы кормовой оконечности осуществляется на основе компромисса характеристик ходкости, управляемости, конструктивных и эксплуатационных факторов.

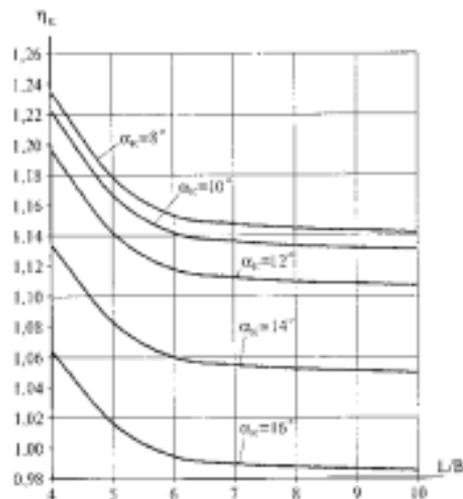


Рис. 8.18. Зависимость коэффициента влияния корпуса η_K от относительной длины L/B при различных углах кормового заострения α_K

В заключение отметим, что при рассмотрении вопроса об оптимальных соотношениях главных размерений корпуса принимались во внимание лишь основные составляющие сопротивления (трения и формы) голого корпуса. Однако для обеспечения должной управляемости и устойчивости на курсе устанавливаются рули и стабилизаторы, для нормальной эксплуатации ПЛ необходимо ограждение выдвинутых устройств. Обуславливаемая ими величина дополнительного сопротивления, а также сопротивление вырезов и шероховатости корпуса приводит к смещению оптимального удлинения в сторону

большин значений L/B и как показывает практика проектирования данное увеличение составляет 10–15 %.

С другой стороны при проектировании ПЛ под заданные комплексы вооружения и энергетическую установку может оказаться, что по условиям размещения оборудования водонизмещение корабля при оптимальном удлинении будет меньше чем при оптимальном.

В связи с изложенным представляется целесообразным указать в качестве близких к оптимальным некоторый интервал значений ($L/B = 7-12$) удлинения корпуса ПЛ.

8.5. Коэффициенты полноты формы наружного корпуса

Для подводного режима плавания форма наружного корпуса ПЛ характеризуется тремя коэффициентами полноты:

- коэффициентом общей полноты δ ;
- коэффициентом продольной полноты φ ;
- коэффициентом полноты площади мидель-шпангоута β .

Продольный призматический коэффициент $\varphi = V/ZL$, являясь сопротивлением формы, является важной проектной характеристикой. Теоретически для корпуса ПЛ с удлинением $L/B = 7-8$ без цилиндрической вставки сопротивление формы будет минимально при значении $\varphi_{opt} = 0,60$. Отклонение от указанного значения в большую или меньшую сторону приводит к росту сопротивления формы. Поскольку при несимметричной форме корпуса, как указывалось выше, наиболее полное сечение смещено в нос и носовая оконечность полнее кормовой, то и коэффициенты продольной полноты оконечностей различны. Так, в рассматриваемом случае при $\varphi = 0,60$ для носовой оконечности $\varphi_n = 0,68-0,70$, а для кормовой оконечности $\varphi_k = 0,53-0,55$. Однако во многих случаях проектирования, как показывает практика, продольный призматический коэффициент принимают больше чем φ_{opt} . Это связано, прежде всего, с наличием цилиндрической вставки, которая увеличивает φ до значений 0,7–0,8, хотя это и ведет к увеличению сопротивления формы корабля. В то же время доля сопротивления формы составляет, как уже отмечалось, не более 10% общего сопротивления, что позволяет идти на некоторое его увеличение для решения других задач.

То же самое можно сказать о коэффициенте общей полноты $\delta = \beta\varphi$, который для современных подводных лодок составляет 0,60–0,65 и численно равен произведению продольного призматического коэффициента φ и коэффициента полноты площади мидель-шпангоута β . Последний, как правило, имеет величину близкую к

0,785, так как подавляющее большинство подводных лодок имеют форму наружного корпуса, близкую к круговой.

В практике проектирования ПЛ при проведении различных расчетов и исследований часто прибегают к замене реальной формы наружного корпуса корабля эквивалентным трехосным эллипсоидом. Такая замена значительно упрощает многие расчеты динамики корабля [72]. Под эквивалентным эллипсоидом понимается эллипсоид, главные размеры которого равны главным размерам реального корпуса ПЛ. В связи с этим приведем для сравнения с реальными значениями коэффициентов полноты ПЛ таковые для трехосного эллипсоида (табл. 8.1).

Следует отметить, что указанные в таблице коэффициенты полноты эллипсоида будут неизменны при любых значениях отношений $L/V^{\sqrt{3}}$ и B/B , поэтому на начальных стадиях проектирования такая замена вполне допустима.

Таблица 8.1

Параметры формы наружного корпуса ПЛ

Время постройки	δ	β	φ	$L/V^{\sqrt{3}}$	B/B
До 1945	0,5	-	-	6-7	0,9-1,2
1946-60	0,52-0,65	0,8-0,82	0,65-0,7	5,5-7,0	0,9-1,2
1960-80	0,52-0,65	0,8-0,85	0,67-0,7	4,9-5,5	1,0-1,4
1980-90	0,55-0,75	0,8-0,85	0,65-0,8	4,5-5,0	0,7-1,4
Трехосный эллипсоид	0,525	0,785	0,670	-	-

8.6. Выбор формы ограждения выдвижных устройств

На выступающие части (ограждение выдвижных устройств, кормовое оперение, носовые или рубочные горизонтальные рули, обтекатели различных устройств и т.п.) приходится значительная доля сопротивления воды движению ПЛ. На современных ПЛ эта доля достигает 15–30% от полного сопротивления.

Для выступающих частей основными составляющими, также как и для корпуса, являются сопротивление трения и формы. Однако, учитывая различие чисел Рейнольдса, методологический расчет сопротивления выступающих частей производится отдельно от расчета сопротивления корпуса. При этом для определения сопротивления трения используется тот же подход, что и для корпуса. Соответ-

важно сохранить справедливость ранее сделанное заключение о необходимости минимизации шероховатости поверхности.

Для определения сопротивления формы выступающих частей характерно широкое использование экспериментальных данных модельных испытаний. Поэтому на основе накопленного опыта можно провести качественный сопоставительный анализ различных типов формообразования выступающих частей, применяемых в практике проектирования ПЛ.

Наиболее значительной (по габаритам) выступающей частью на корпусе подводной лодки является ограждение выдающих устройств (ОВУ). В практике проектирования выработаны два основных типа ОВУ — крыловидное и лимузинное (рис. 8.19).

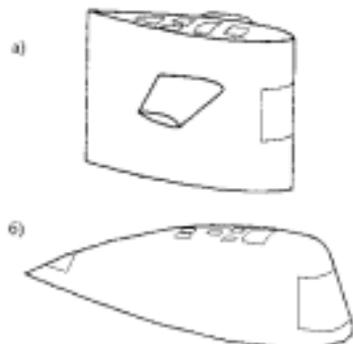


Рис. 8.19. Типовые формы ограждений выдающих устройств:
а) крыловидное ограждение выдающих устройств;
б) лимузинное ограждение выдающих устройств.

Для крыловидного ограждения характерны относительная малая длина ($l_{ОВУ}/h_{ОВУ} = 1,0-1,5$), сравнительно большая абсолютная высота (более 5—7 м), вертикальные стенки и сечения по воде в виде симметричного крыльцевого профиля с $l_{ОВУ}/h_{ОВУ} = 4-5$. Лимузинная форма характеризуется удлиненным профилем диаметрального батокса (отношение $l_{ОВУ}/h_{ОВУ} > 4-5$) с наклонной назад передней кромкой и плавным сходом кормовой кромки от краев ограждения к палубе задстройки (угол притыкания кромки к палубе около

30°). В поперечном сечении стенки лимузинного ОВУ, как правило, имеют наклон к диаметральной плоскости. На практике форма ОВУ может сочетать элементы как крыловидного, так и лимузинного типа.

При проектировании ПЛ набор той или иной формы ограждения определяется его внутренним насыщением (количеством ПМУ, габаритами их антенн, наличием всплывающей оптической камеры и т.д.) и необходимыми для размещения этого оборудования габаритами самого ограждения. Опыт проектирования показывает, что ОВУ российских ПЛ имеют значительные габариты и особенно длину, которая на многоцелевых лодках достигает 20—25% длины корпуса.

ПЛ ВМС США имеют компактные ограждения рубки малой длины и большой высоты. За счет отказа от доступа к ПМУ и их антеннам, от прохода внутри ограждения и других мер на американских ПЛ достигается сокращение ширины ограждения до 2 м. В результате на ПЛ ВМС США принята крыловидная форма ограждения выдающих устройств. На российских ПЛ применяется как лимузинная форма, так и форма, близкая к крыловидной.

На незавершенных многоцелевых российских подводных лодках IV поколения при оригинальных конструктивных решениях удалось получить ширину ОВУ $l_{ОВУ} < 2$ м при длине, равной $l_{ОВУ} = 0,11-0,13L_{ПЛ}$. Такая конструкция у российских конструкторов получила название «снежного» ОВУ.

На рис. 8.20 представлены данные по сопротивлению ограждений выдающих устройств различной формы, из которого видно, что наименьшее сопротивление при прочих равных условиях имеют крыловидная со ступенчатой законцовкой и лимузинная форма ОВУ [5].

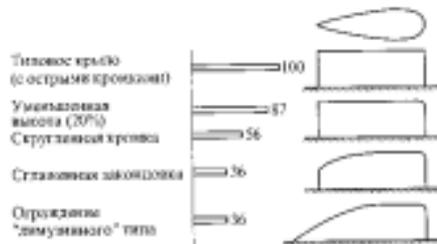


Рис. 8.20. Сопротивление ограждения выдающих устройств различной формы

Существенное влияние на сопротивление ограждения выдвигных устройств оказывает его взаимодействие с корпусом, т.к. в районе сопряжения ограждения с корпусом образуются вихревые структуры — надпорный вихрь в носовой части и боковые вихри по бортам ограждения. С целью снижения этой составляющей сопротивления производится тщательная профилировка района сопряжения ограждения с корпусом ПЛ, устраиваются резкие переходы и прямые углы (рис.8.21) [99].

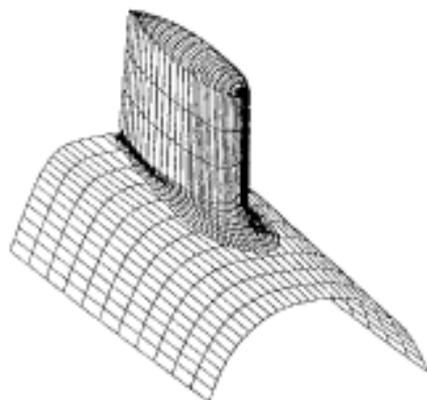


Рис.8.21. Профилированный район сопряжения ограждения с корпусом ПЛ

На рис.8.22 приведены результаты испытаний ограждений выдвигных устройств крыловидной формы с одинаковой высотой и шириной, но разной длины [5]. Из него следует, что суммарное сопротивление ОВУ может быть уменьшено за счет составляющей взаимодействия с корпусом путем выбора оптимальной относительной длины ограждения.

Величина составляющей сопротивления от взаимодействия с корпусом может быть также уменьшена при размещении ограждения на расстоянии 0,2—0,3 длины корпуса от носового перпендикуляра ПЛ.

Однако, смещение ограждения в нос ПЛ увеличивает плечо (по длине от центра тяжести ПЛ) возникающей на нем боковой силы. Это приводит к возрастанию углов дрейфа при изменении курса и, соответственно, уменьшению радиуса циркуляции. С другой стороны, носовое расположение ограждения несколько повышает сопротивление движению ПЛ и увеличивает степень турбулентности в пограничном слое, ухудшая акустические характеристики гребного вала.

В конечном счете, установка ОВУ по длине определяется размещением постов и оборудования в прочном корпусе и, в первую очередь, главного командного поста и выдвигных устройств. Применение выдвигных устройств, не входящих в прочный корпус, позволяет исключить этот демпфирующий фактор. Тогда размещение ограждения на корпусе будет определяться в основном положением шахты входного лока относительно ГЗП и гидродинамическими факторами.

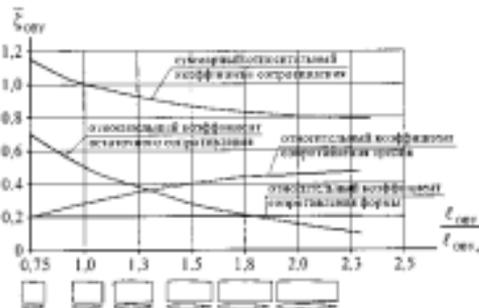


Рис. 8.22. Сопротивление ограждения выдвигных устройств в зависимости от их удлинения.

Примечание:

- $C_{OBU} = \frac{R_{OBU}}{\rho g V_{корп}}$ — относительный коэффициент сопротивления по отношению к базовому ограждению
- При построении графика высота и ширина ограждения принимались одинаковыми
- Относительное удлинение базового варианта $\frac{l_{корп}}{b_{корп}} = 8$

При выборе типа ограждения выдвигных устройств необходимо учитывать и гидродинамическую боковую силу при обтекании ОВУ косым потоком. При прочих равных условиях (в первую очередь равных габаритах) на крыловидном ограждении при изменении курса или наличии дрейфа возникает бо́льшая гидродинамическая подъемная сила крыла.

На лимбовидной форме ОВУ производная коэффициента боковой силы по углу дрейфа будет меньше, чем на крыловидном ограждении, имеющем такую же площадь на проекции "бок" теоретического чертежа. На крыловидном ОВУ эта сила имеет большее плечо по высоте относительно центра тяжести ПЛ, что обуславливает возникновение на циркуляции бо́льшего кренящего момента.

В заключение отметим, что сопротивление ограждения выдвигных устройств независимо от его типа составляет в общем сопротивление современного корабля незначительную величину, поэтому выбор формы ограждения в большей степени определяется школой проектирования, составом и расположением оборудования в нем, а не минимизацией сопротивления.

8.7. Влияние количества валов на форму корпуса и гидродинамические качества ПЛ

Выбор количества валов (вальности) энергетической установки ПЛ является одним из вопросов, который определяет форму и компоновку кормовой оконечности корабля (рис. 8.23).

Количество валов оказывает влияние и на такие параметры ПЛ, как живучесть, водоизмещение, пропульсивные качества и уровень шумности корабля.

Первые послевоенные поколения дизель-электрических подводных лодок имели, как правило, двух-трехвальную установку. Основными факторами, определявшими вальность ГЭУ проектируемой подводной лодки, являлись параметры ряда двигателей, которыми располагал конструктор. При заданной в ТЗ скорости хода, параметры ряда располагаемых двигателей, в частности мощность, могла исключить создание 2-х вальной установки и сделать реальной только 3-х вальную. Первые атомные подводные лодки также были двухвальными. Это объяснялось традиционным подходом, характерным для дизель-электрических ПЛ и отсутствием уверенности в надежности новых энергетических установок. Действительно, преимуществ по показателям живучести принадлежит многовальным установкам.

Об этом говорит опыт Великой Отечественной войны, когда ПЛ возвращались в базу с поврежденной линией вала. Практика показы-

вает, что отказы и поломки линии вала бываюи и в мирное время. Таким образом, можно считать, что для увеличения показателей живучести ЭУ, а следовательно, и ПЛ в целом, необходимо проектировать ПЛ многовальными. Вместе с тем, следует отметить, что все вышесказанное справедливо лишь в том случае, если ПЛ атакованы обычными видами оружия.



Рис. 8.23. Эволюция архитектуры кормовой оконечности подводной лодки [51]

Американская практика проектирования, начиная с ПЛ второго поколения, ориентировалась на одновальную энергетическую установку, что помимо гидродинамических причин явилось следствием благоприятных условий базирования и эксплуатации американских ПЛ. Невверно считать, что гидродинамические преимущества одновальной архитектурного типа не были известны и правильно оценены отечественными специалистами. Однако они не могли стать в то время решающим доводом в пользу отказа от надежного резервирования движительной установки на случай аварии линии вала.

Опыт проектирования показывает, что при прочих равных условиях наименьшая масса энергетической установки, а следовательно и наименьшее нормальное водоизмещение D , проектируемой ПЛ получается при одновальной схеме ЭУ. В случае использования двухвальной компоновки масса ЭУ возрастает за счет дублирования механизмов. Так, если учесть долю массы энергетической установки в нормальном водоизмещении (~ 20%), а коэффициент Нормана допустить $\eta_n = 2,5$, то при переходе от одновальной к двухвальной ЭУ нормальное водоизмещение возрастает на 10—15% при одинаковой мощности установки. Это безусловно важный фактор и с ним необходимо считаться.

Большое количество исследований и экспериментов, а также анализ материалов по построенным в мире ПЛ убедительно показывает, что несомненные преимущества в части ходовых качеств принадлежат ПЛ с одновальными ЭУ.

На рис. 8.24 [5] представлена зависимость водоизмещения и скорости хода от мощности на валу для двухвальных и одновальных подводных лодок. Зависимости получены расчетным путем для принятого базового варианта корабля и в определенной степени носят условный характер.

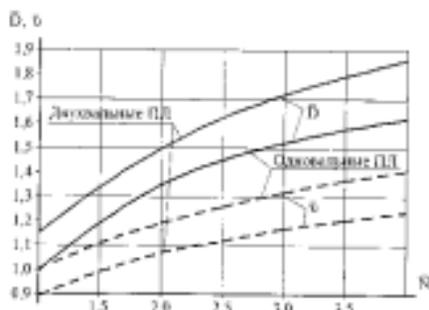


Рис. 8.24. Зависимость водоизмещения и скорости хода от мощности главной энергетической установки для одновальных и двухвальных ПЛ, где: \bar{N} — относительная мощность главной энергетической установки (ГЭУ),

\bar{D} — относительное водоизмещение ПЛ. За $\bar{D} = 1$ принято водоизмещение одновальной ПЛ, имеющей ГЭУ мощностью $\bar{N} = 1$.

\bar{V} — относительная скорость полного хода ПЛ. За $\bar{V} = 1$ принята скорость одновальной ПЛ, имеющей ГЭУ мощностью $\bar{N} = 1$.

Из приведенного графика видно, что одновальные ПЛ имеют скорости на 10—12% выше, чем двухвальные. Увеличение скорости хода, кроме меньшего водоизмещения, объясняется следующими двумя причинами гидродинамического характера.

1. На одновальной ПЛ конструктивно возможно установить гребной винт большего диаметра, чем на двухвальной (в последнем случае увеличение диаметра гребного винта ограничивается его малым отстоянием от борта). Возможность увеличения диаметра винта, наряду с увеличением количества лопастей, позволяет снизить удельную нагрузку на его лопасти и частоту вращения. Это, в свою очередь, повышает КПД винта, который на одновальных ПЛ выше, чем у двухвальных, на 15—20%.

2. Одновальная схема органично сочетается с осесимметричными обводами кормовой оконечности в виде тела вращения, что создает наиболее благоприятные условия для работы гребного винта. Коэффициент попутного потока и коэффициент засасывания при осесимметричной кормовой оконечности обеспечивают одновальную ПЛ величину коэффициента кливния корпуса значительно больше единицы. Он может достигать 1,05—1,20, что повышает общий пропульсивный коэффициент до 0,75—0,80. У ПЛ с двухвальной энергетической установкой коэффициент кливния корпуса обычно близок к единице, а общий пропульсивный коэффициент не превышает 0,60—0,65 (т. е. в 1,25 раза ниже, чем у одновальных ПЛ).

Повысить коэффициент кливния корпуса, а следовательно и общий пропульсивный коэффициент у двухвальных ПЛ можно в случае применения кормовой оконечности с осесимметричными коническими обтекателями гребных валов [82].

Сказанное справедливо только для случая равенства мощностей одновальной и двухвальной ПЛ. На практике применение двухвального архитектурного типа позволяет удвоить мощность ГЭУ, разместив две двигательные установки вместо одной и повысить скорость двухвальной лодки до 15% по сравнению с одновальной.

Не менее важным чем ходкость, а в настоящее время пожалуй и более значительным фактором, влияющим на выбор вальности ЭУ ПЛ является требование к уровню акустического поля, который в ряде частотных диапазонов определяется шумоизлучением гребного винта. Он зависит от частоты вращения и степени неоднородности потока в диске винта. Она вызывается ограждением выдвижных уст-

ройств, стабилизаторах и рулях, эластичностью наружного корпуса и винтов, таким образом, от общей компоновки выступающих частей на корпусе ПЛ и винта, а следовательно и от вальности ЭУ.

Естественно, что при осесимметричной корме у одновальной ПЛ возникает возможность формирования более равномерного потока, истекающего на винт, чем у двухвальной ПЛ.

Применительно к двухвальным кораблям улучшение условий работы винтов может быть достигнуто за счет применения кормовой оконечности с развитыми обтекателями гребных валов (рис. 8.25.). Однако на этом возможности двухвального типа оказались исчерпанными, и устаревшая форма корпуса в противоречие с возмещающимися требованиями, предъявляемыми к современным ПЛ.

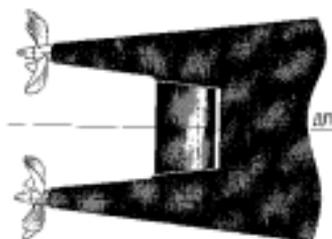


Рис. 8.25. Кормовая оконечность двухвальной ПЛ с развитыми обтекателями гребных валов (так называемые "глазны")

На рис. 8.26. представлены эпюры поля скоростей в плоскости диска винта для одновальной и двухвальной установки ПЛ. На этом же рисунке приведены и схемы компоновки кормовой оконечности для приведенных случаев [82].

Из рис. 8.26. видно, что более равномерный поток в диске винта у одновальной ЭУ. Следует также отметить, что снижение частоты вращения винта одновальной ПЛ и уменьшение нагрузки позволяют на 25—30% увеличить критическую скорость ПЛ, т.е. скорость, при которой начинается проявление кавитационной шум винта. Это тактическое качество особенно важно для многоцелевых ПЛ, которые, преследуя цель, должны развивать повышенную скорость хода с минимально возможным ростом шумности и помех работе ГАС.

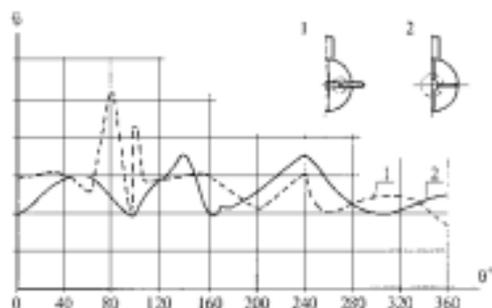


Рис. 8.26. Эпюры поля скоростей в диске винта ПЛ
1 — двухвальная ЭУ, 2 — одновальная ЭУ.

Таким образом, по большинству показателей кроме живучести и максимально достижимой скорости, при ограниченной агрегативной мощности преимущество принадлежит ПЛ с энергетическими установками в одновальном исполнении. Требования же живучести могут быть обеспечены установкой резервных средств движения. Отечественные конструкторы, как правило, используют варианты резервных движительных комплексов, скрытых в обводах корпуса. В качестве последних используются вспомогательные винты, размещаемые в каналах или выдвинутых гоцдолах, водометные движители и т.д. В этом случае они могут играть роль и водружающих устройств при проходе узостей, швартовке и т.д. Устанавливаемые на ПЛ резервные средства движения должны обеспечивать определенную скорость хода в подводном положении (как правило около 5 узлов) и возможность возвращения в базу для ремонта. Одна из возможных схем таких резервных средств движения представлена на рис. 8.27 [48].

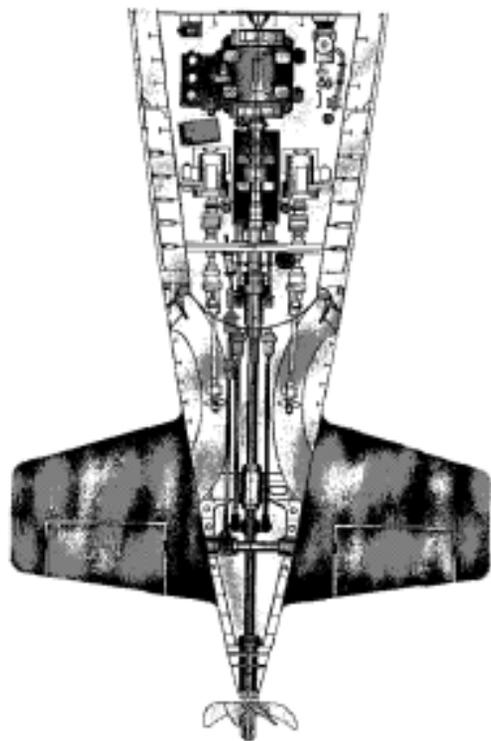


Рис. 8.27. Разрезные движители ПЛ проекта 877

8.8. Влияние конструктивных факторов на выбор параметров формы наружного корпуса

При проектировании наружного корпуса ПЛ и выборе параметров его формы, помимо известного выше, необходимо иметь в виду, что на их выбор влияют многие конструктивные факторы, из которых, прежде всего, отметим вопросы общего расположения и компоновки оборудования и вооружения корабля. В большинстве случаев соотношения главных размерений определяются прежде всего установкой комплексов вооружения, гидрокустники и энергетика.

Иногда конструктор, зная, как принимаемое им решение негативно отразится на том или ином качестве корабля, а порой и на целом комплексе качества, вынужден все же принимать такое решение для достижения требуемого состава оружия.

В качестве примера такого вынужденного решения можно привести высокую надстройку в районе ракетных шахт РАПЛ (рис. 8.28), которое отрицательно повлияло на полное подводное водонизмещение, параметры скрытности и управляемости, скорость подводного хода, остойчивость корабля в надводном положении и особенно при всплытии ПЛ, но при этом была решена главная задача: размещение экономически оправданным способом нового, более мощного, но и более габаритного ракетного комплекса.



Рис. 8.28. Ракетная атомная подводная лодка

Подобное же влияние на выбор формы наружного корпуса ПЛ могут оказать ограничения на главные размеры корабля по условиям завода строителя, по осадке в крейсерском положении и ряд других. Эти ограничения иногда вынуждают отступать от рекомендаций оптимальных формы корпуса.

Аналогичные смещения optimumов бывают и при проектировании местных участков корпуса. Так, например, при проектировании носовой оконечности размещение датчика ГАС может потребовать изменения ее формы обводов, что изменит условия обтекания (см рис. 8.15).

Наличие прочного корпуса, иногда и нескольких, а также прочных конструкций в междубортном пространстве прямым образом влияет на форму и конструктивно наружного корпуса.

Обычно процесс проектирования ПЛ строится таким образом, что сначала конструируется прочный корпус, а затем приступают к формированию наружного корпуса. При таком подходе говорить о значительных вариантах формы наружного корпуса не приходится [9]. Его размеры в значительной степени оговорены размерами и особенностями прочного корпуса. Если получаемый при этом наружный корпус не удовлетворяет многим свойствам и качествам ПЛ, встает вопрос о необходимости разработки нового варианта прочного корпуса. Таким образом, методом последовательных приближений согласовывают оба корпуса ПЛ.

Именно здесь при окончательном выборе проектного решения должно проявиться главное качество конструктора — его искусство находить компромиссы в соединении противоречивых требований и в единое целое, имеющее подводным кораблем с оптимальными параметрами. При этом можно уверенно утверждать, что если форма наружного корпуса, общий облик подводной лодки красивы, значит, конструктор добился оптимального сочетания всех качеств, отличающих природной целесообразности.

9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ

9.1. Общие положения

Следующий шаг после определения водонизменения и архитектуры подводной лодки — это выбор ее главных размерений: длины, ширины и высоты корпуса, а также осадки корабля (L, B, H, T).

Выбор главных размерений должен быть согласован со всеми свойствами и качествами проектируемой подводной лодки. Главные размерения должны соответствовать архитектурному типу и удовлетворять ряду требований конструктивного характера. Если комбинация главных размерений, которые можно получить при данном прочном корпусе, оказываются такими, что некоторые требования ТТЗ не удовлетворятся, то необходимо либо поставить вопрос об изменении ТТЗ либо пересмотреть габариты прочного корпуса и найденное ранее водонизменение.

Специфика ПЛ накладывает определенные ограничения на выбор главных размерений, которые состоят в том, что при выбранном архитектурном типе и установленных размерах прочного корпуса длина подводной лодки уже в значительной степени определена и не может варьироваться в широких пределах. Ограничен и диапазон предел ширины. При однокорпусном архитектурном типе прочный корпус полностью определяет ширину и в значительной степени высоту борта и осадку. Варьирование главных размерений в данном случае связано с варьированием размеров прочного корпуса и расположения оборудования в нем.

Таким образом, главные размерения связаны с формой и размерами ПК. Вследствие этого чисто аналитические методы определения главных размерений, широко используемые при проектировании надводных кораблей [6], [15], [60], не могут быть полностью применены при проектировании ПЛ, ибо результатом такого определения может явиться несоответствие наружного корпуса прочному.

По изложенным причинам главные размерения ПЛ определяются как результат построения эскиза теоретического чертежа при вы-

бранных габаритах прочного корпуса. Затем производят оценку полученных размеров с точки зрения размещения оборудования и вооружения в носовой и кормовой оконечностях, надстройке, а также основных мореходных качеств и в случае необходимости вносят изменения. Для отыскания комбинации главных размеров, наилучшим образом удовлетворяющих требованиям ПТЗ, производят в некоторых допустимых пределах варьирование главных размеров, причем, если окажется необходимым, рассматривают варианты с различными прочными корпусами (укороченными или удлиненными).

Такой метод определения главных размеров связан с большими затратами времени на измеривание ряда вариантов теоретического чертежа и требует известного опыта проектировщика. При построении эскиза теоретического чертежа используют приближенные формулы и статистический материал по построенным ПЛ, что позволяет быстрее найти правильное решение.

В современных условиях, когда построение и тем более варьирование теоретического чертежа производится с помощью компьютерной техники, эта задача требует значительно меньшего времени, что позволяет рассматривать большее количество вариантов.

Ниже излагаются методы предварительного определения главных размеров ПЛ с последующим уточнением их в процессе разработки теоретического чертежа. Такое предварительное определение главных размеров, а также их варьирование производится при постоянном водоизмещении, величина которого получена в предыдущих приближениях.

9.2. Определение длины корпуса подводной лодки

У подводных лодок различают несколько длин корпуса (рис.9.1)

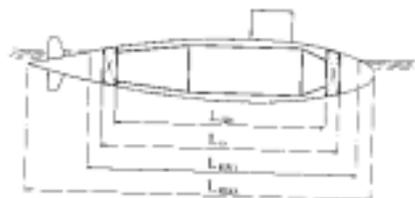


Рис.9.1. Классификация длин корпуса подводной лодки

$L_{пр}$ — длина прочного корпуса;

L_4 — длина непроливаемого объема в надводном положении;

$L_{вдл}$ — длина при осадке по кривосерую ватерлинию;

$L_{нос}$ — максимальная длина носовой части (без винта);

$L_{корм}$ — максимальная длина кормовой части.

Длина непроливаемого объема L_4 является базовой для построения теоретического чертежа. В нос и корму от непроливаемого объема выносятся проливаемые части оконечностей. Поскольку длина прочного корпуса уже известна, длину непроливаемого объема можно определить по зависимости

$$L_4 = L_{пр} + \ell_{нос} + \ell_{корм} \quad (9.1)$$

где $\ell_{нос}$ и $\ell_{корм}$ — длина концевых цистерн главного балласта.

Длина носовой цистерны $\ell_{нос}$ определяется, в основном, длиной наружных частей торпедных аппаратов, находящихся в концевой ЦГБ, и выгородкой гидроакустического комплекса (ГАК). Длина цистерны принимается из предварительных проработок общего расположения или по прототипу с аналогичным калибром торпедного вооружения.

Необходимо учитывать, что на современных подводных лодках III и IV поколений выгородка ГАК выполняется герметичной и участвует в обеспечении надводной непотоплываемости. Для решения этой задачи она снабжена животовым и клапанной вентиляцией.

Длина $\ell_{корм}$ может быть определена из условия потребного объема кормовой ЦГБ и расположения оборудования в оконечности или по прототипу.

При определении длины носовой оконечности необходимо проработать вспомогательные шты. Опыт войны показал слабую их живучесть при большой длине [9]. В ледовых условиях, во время шторма, при действии оружия противника часто происходили поломки и заклинивание вспомогательных шты, что делало невозможным использование оружия ПЛ. Иногда даже прибегали к намеренному их снятию, однако при этом уменьшалась на 1,5—2,0 узла скорость подводного хода вследствие увеличения сопротивления. Учитывая вышесказанное, при проектировании ПЛ следует иметь в виду, что увеличение длины носовой оконечности увеличивает размеры вспомогательных шты и может привести к совершенно неприемлемым конструктивным решениям. Для обеспечения беспрепятственного выхода торпеды из торпедного аппарата необходимо обеспечить боевой корпус с определенным углом α (рис.9.2а), что еще больше увеличивает раз-

меры волнорезные шпанги. На штевеньях ПЛ времян второй мировой войны для уменьшения длины волнорезных шпанг вынуждены были применять местную S-образную ватерлино на уровне торсионных аппаратов (рис.9.2б), что естественно увеличивало сопротивление формы корпуса.

У тех вращений вопрос с обеспечением необходимой длины волнорезных шпанг в ряде случаев не стоит столь остро, однако необходимость обеспечения надлежащего боевого конуса при больших длинах оконечности также может привести к неконструктивным решениям (рис.9.2в).

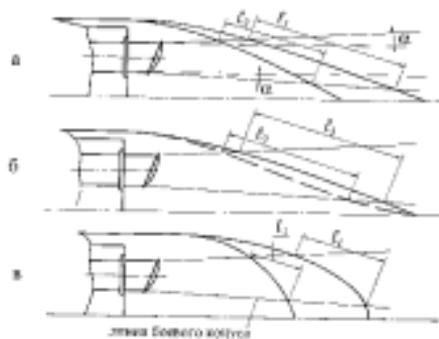


Рис.9.2. Схемы волнорезных шпанг ПЛ

Для определения длины носовой оконечности по крейсерскую ватерлино $L_{вк}$ необходимо вымерить диаметральною проекцию прочного и легкого корпусов, прорисовать в оконечностях расположение оборудования (возможно использовать прототип).

Очевидно, что при штевневых формах обводов ПЛ $L_{вк} = L_{вкл} + L_{вклд}$ и при несимметричных обводах $L_{вклд}$ полностью определяется прорисованной диаметрально (см. рис. 9.1).

9.3. Определение ширины корпуса подводной лодки

Ширина корпуса для однокорпусных ПЛ полностью определяется диаметром ПК, а для двухкорпусных определяет объем междубортного пространства, а следовательно, величину запаса плавуче-

сти. Необходимо отметить, что ширина наружного корпуса при выбранных размерах прочного корпуса и запаса плавучести практически определена и изменится в незначительных пределах. Она может быть найдена в первом приближении из следующих соотношений.

$$V_{гк} = \delta L B H. \quad (9.2)$$

Объем галого корпуса $V_{гк}$ складывается из постоянного плавучего объема (за вычетом объемов ограждения, стабилизаторов и рулей), запаса плавучести и объема проникновения шпигов:

$$V_{гк} = V'_g + V_{ст} + V_{шп} \quad (9.3)$$

где $V'_g = kV_g = V_g - V_{огр} - V_{ст} - V_{шп}$ — постоянный плавучий объем галого корпуса, m^3

$k < 1.0$ — коэффициент, учитывающий объем ограждения, стабилизаторов и других выступающих за наружный корпус частей;

$V_{шп}$ — постоянный плавучий объем, m^3

Тогда максимальная ширина корпуса ПЛ может быть определена из выражения

$$B_{max} = \frac{V_{гк}}{\delta L H}. \quad (9.4)$$

Следует также иметь в виду, что ширина корпуса может быть лимитирована технологическими аспектами: минимально возможным размером междубортного пространства, шириной построенного места, шириной ворот здания, шириной дока и т.д.).

Поскольку ширина тесно связана с начальной остойчивостью ПЛ в надводном положении, необходимо сравнить полученное значение ширины со значениями (9.4) со значением, полученным далее по уравнению остойчивости (9.26), (9.27).

9.4. Определение высоты корпуса подводной лодки

Высота корпуса на \square при выбранном диаметре прочного корпуса определяется высотой надстройки и киля (рис.9.3).

$$H = d_{вк} + \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad (9.5)$$

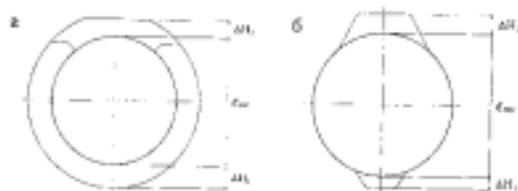


Рис. 9.3 Поперечные сечения корпуса ПЛ

Высота киля ΔH выбирается обычно из конструктивных соображений и составляет у двухкорпусных ПЛ $\Delta H \approx 0,9-1,2$ м. В случае необходимости увеличения запаса плавучести и невозможности увеличения ширины корпуса дополнительный запас плавучести создается за счет увеличения высоты ΔH . При этом необходимо убедиться, что ограничения по осадке выдержаны. Иногда и однокорпусные ПЛ имеют так называемый балластный киль (рис. 9.3б), в котором размещается твердый балласт для обеспечения устойчивости подводной лодки. Высота киля в этом случае составляет $\Delta H \approx 0,5-0,6$ м. Выступ корпуса в вертикальной плоскости, которая получается при этом, как уже говорилось, не приводит к существенному увеличению смоченной поверхности, но ухудшает остойчивость в надводном положении.

Высота надстройки ΔH_1 определяется из условий размещения в ней баллонов ВВД, трубопроводов, клапанов вентиляции и т.д. На торпедных ПЛ обычно высота $\Delta H_1 \approx 1,0-1,5$ м, на ракетных кораблях высота надстройки определяется условиями размещения оружия (см. рис. 8.28).

Если расположение в надстройке не проработано, то ΔH_1 можно определять по прототипу.

9.5. Запас плавучести. Приближенное определение осадки по заданному запасу плавучести

В процессе проектирования любого судна или корабля определяют его размеры и коэффициенты полноты таким образом, чтобы обеспечить необходимую грузоподъемность (грузовместимость), скорость, остойчивость, а также запас плавучести и определенный уровень непотопляемости.

А.Н. Крылов отмечал, что "мерой запаса плавучести служит объем между действующей ватерлинией корабля и верхней из водонепроницаемых палуб, при этом предполагается, что наружный борт водонепроницаем" [6].

Отсюда полный запас плавучести подводной лодки в любом надводном положении равен объему всех непонижаемых частей корпуса выше ватерлинии с одной стороны:

$$W = V_1 + W_2 \quad (9.6)$$

и объему свободных от воды цистерн главного балласта, — с другой (рис. 9.4):

$$W = W_1 + W_2 \quad (9.7)$$

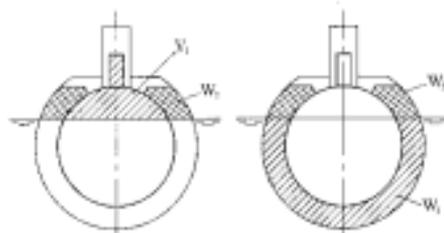


Рис. 9.4 Распределение запаса плавучести на подводных лодках

Из рис. 9.4 видно, что объем цистерн главного балласта, расположенный выше ватерлинии W_2 , входит в оба уравнения.

Следовательно,

$$\begin{aligned} W_1 + W_2 &= V_1 + W_2; \\ W_1 &= V_1 \end{aligned} \quad (9.8)$$

Таким образом, объем цистерн главного балласта выше ватерлинии не оказывает влияния на осадку ПЛ в надводном положении и называется пассивным запасом плавучести в отличие от объема ЦГБ ниже ватерлинии, называемого активным запасом плавучести.

Очевидно, что осадка не изменится, будет ли верхний стрингер ЦГБ располагаться на уровне верхней кромки ПК, или в любом другом месте выше ватерлинии. Полезная сторона пассивного запаса плавучести состоит в том, что он, увеличивая полный запас

плавуности, улучшает тем самым мореходные качества ПЛ в надводном положении и ее надводную непотопляемость с учетом крена и дифферента ПЛ в аварийном состоянии [62]. Однако следует иметь в виду, что увеличение запаса плавучести, благоприятное с точки зрения непотопляемости и мореходных качеств в надводном положении, имеет ряд отрицательных сторон:

— возрастает полное подводное водоизмещение, что влечет за собой увеличение смоченной поверхности, а следовательно и сопротивления движению ПЛ в подводном положении;

— растет нормальное водоизмещение ПЛ из-за более развитого легкого корпуса и увеличения его веса. Увеличивается и вес некоторых систем, например ВВД;

— вследствие увеличения объема ЦГБ увеличивается время погружения. Конструктивные мероприятия, направленные на сохранение времени погружения, могут привести к утяжелению системы погружения—высульты.

По указанным выше причинам нежелательно иметь запас плавучести более минимально требуемого. При проектировании подводных лодок нельзя забывать, что величина водоизмещения всегда имела значение для скрытности корабля, и в дальнейшем этот фактор будет усиливаться вместе с развитием акустических методов обнаружения ПЛ.

Зная в результате определения водоизмещения размеры ПК, схему расположения и размеры отсеков, можно приблизительно наметить величину запаса плавучести, необходимую для удовлетворения поставленным требованиям по непотопляемости. Нормы общего порядка для выбора запаса плавучести, обеспечивающего непотопляемость при удовлетворительной мореходности в надводном положении нет, и вряд ли они могут быть. Для каждого корабля необходимо определять наиболее неблагоприятный случай аварии и исходя из требований непотопляемости, назначать запас плавучести.

По современным воззрениям запас плавучести должен быть минимально необходимым для выполнения требований надводной непотопляемости при удовлетворительной мореходности. Выполнение указанных выше требований обычно приводит к запасу плавучести в 25—35% нормального водоизмещения корабля для двухкорпусных и 18—20% для однокорпусного и смешанного архитектурного типа ПЛ.

В проектах ПЛ других стран в настоящее время, как правило, надводная непотопляемость ПЛ не обеспечивается, что позволяет снизить требуемый запас плавучести до 12—15% D_0 .

Балластные цистерны на однокорпусных ПЛ располагаются, как правило в носовой и кормовой оконечностях корабля, а на двухкорпусных — в междубортном пространстве и, если позволяет конструкция, в носовой и кормовой оконечностях (рис. 9.5).

Разделение междубортного пространства на ЦГБ, а также размещение цистерн в носовой и кормовой оконечностях должно производиться таким образом, чтобы объемы их были примерно одинаковыми. Разница в объемах цистерн более чем на 30%, как правило, не допускается, что позволяет обеспечить более равномерное их заполнение или продувание. При назначении районов установки поперечных переборок ЦГБ необходимо учитывать требования по надводной непотопляемости. В частности, длина цистерн должна быть равна примерно половине длины среднего по протяженности отсека. Ширина междубортного пространства 1,5 и 2-х корпусных ПЛ должна быть не менее 0,7 м, исходя из технологических возможностей приварки легкого корпуса к прочному и других работ выполняемых в междубортном пространстве.

При назначении объемов, отводимых под цистерны главного балласта по длине ПЛ, необходимо стремиться к достижению условия, чтобы центры тяжести запаса плавучести (выходящий из воды непроницаемый объем) и полного объема ЦГБ лежали на одной вертикали. Это позволит исключить появление конструктивного дифферента корабля в надводном положении. При этом учитывается расположение прочих цистерн, выгородок и других объемов в междубортном пространстве.

Из общего количества ЦГБ на подводной лодке выделяются цистерны средней группы. Количество цистерн средней группы и их расположение по длине выбирается таким образом, чтобы обеспечить процесс всплытия ПЛ с минимальным дифферентом на корму и безопасное нахождение корабля в позиционном положении с минимально допустимым запасом плавучести и надводным бортом.

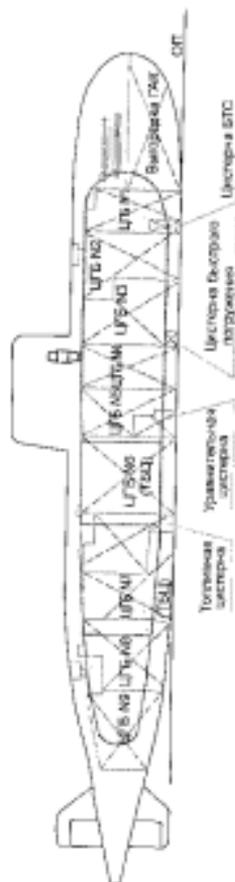


Рис. 9.5. Расположение цистерн главного балласта на ДУБПЛ

По способу обеспечения непроницаемости ЦГБ делятся на:
 — кингстоновые — герметичность цистерн главного балласта обеспечивается клапанами вентиляции в верхней части и кингстоками в нижней;

— шпигатные (бескингстоновые) — герметичность цистерн обеспечивается только клапанами вентиляции в верхней части, а в нижней части устанавливаются шпигатные решетки.

При проектировании подводных лодок предпочтительней использовать кингстоновые ЦГБ, которые (несмотря на некоторое увеличение массы ПЛ из-за установки кингстонов и систем управления ими) позволяют обеспечить высокую эксплуатационную надежность в аварийных ситуациях и при плавании на волнении.

Таким образом, прежде чем назначать или определять необходимый запас плавучести, нужно решить вопрос — в какой степени будут обеспечены требования надводной непотопляемости. Величина запаса плавучести должна быть установлена непосредственно после определения размеров отсеков ПК и размещения механизмов и устройств, т.к. в значительной степени определяет как архитектурный тип, так и главные размеры ПЛ.

Приближенно запас плавучести можно определить несколькими способами:

1. Используя статистическую информацию по построенным ПЛ — самый простой, но и самый ненадежный способ, т.к. запас плавучести зависит не только от водоизмещения, но и многих параметров, основные из которых перечислены выше.

2. По прототипу с близкой схемой расположения оборудования и деления на отсеки. Этот метод более надежен, т.к. при этом могут быть учтены особенности проекта.

3. Определение потребного запаса плавучести по диаграмме надводной непотопляемости, разработанной инженерами кораблестроителями И.С. Васильевым и Д.Л. Гармашевым. Диаграмма надводной непотопляемости (рис.9.6) строится в прямоугольных координатах и представляет собой совокупность двух семейств кривых, двояких зависимости: $M_d = f(V)$ при $T = \text{const}$ и $M_d = f_d(V)$ при $\psi = \text{const}$. По вертикальной оси откладывается водоизмещение подводной лодки V (m^3). По горизонтальной оси откладываются дифференцирующие моменты M_d (m^4), вправо — на нос, влево на корму.

Наличие на диаграмме (-) О, в которой сходятся линии равных дифференциалов при полном погружении ПЛ, говорит об отсутствии на корабле бескингстоновых балластных цистерн. Приведения выше

диаграмма непотопляемости входит в состав технической документации ПЛ и позволяет, не прибегая к сложным расчетам по теоретическому чертежу, определить посадку и запас плавучести аварийной ПЛ. Однако следует помнить, что данной размерной диаграммой можно пользоваться только для той ПЛ, для которой она построена.

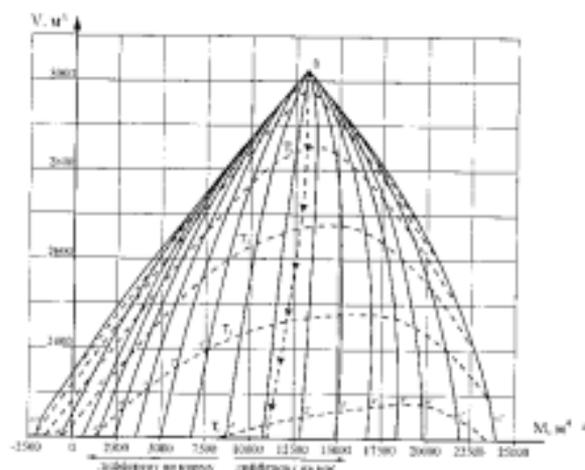


Рис. 9.6. Диаграмма валовой непотопляемости подводной лодки
 Обозначения: ———— — кривые равных углов дифферента;
 - - - - - кривые равных осадок корпуса; —•— кривые среднего момента M_D .

Поэтому на ранних стадиях проектирования для определения необходимого запаса плавучести ПЛ удобнее использовать безразмерную диаграмму валовой непотопляемости, предложенную А. В. Базилевичем [9]. Для построения такой диаграммы используется размерная диаграмма. Пересечем начало координат диаграммы в (:)0, соответствующую полному погружению ПЛ. В этом случае по оси ординат будет откладываться вышедший из воды объем, т.е. оставшийся после аварии запас плавучести W , а по оси абсцисс момент вышедшего объема M' (рис.9.7). В нашем случае для определения

необходимого запаса плавучести достаточно построить только кривые предельных дифферентов.

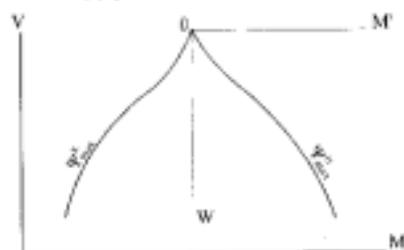


Рис.9.7. К определению запаса плавучести

Для получения безразмерных величин запаса плавучести и его момента воспользуемся зависимостями:

$$\bar{W}' = \frac{W'}{V_0}; \quad (9.9)$$

$$\bar{M}' = \frac{M'}{V_0 L_0}; \quad (9.10)$$

где \bar{W}' — относительный запас плавучести, оставшийся после аварии;

W' — оставшийся после аварии запас плавучести, m^3 ;

V_0 — постоянный плавучий объем ПЛ для каждой построенной диаграммы непотопляемости, m^3 ;

\bar{M}' — относительный момент вышедшего объема;

M' — момент оставшегося после аварии запаса плавучести по длине от центра, m^4 ;

L_0 — длина непропавшей части корабля, m .

Перестроив указанным выше методом размерные диаграммы однотипных ПЛ, например торпедной формы, в безразмерные, получим семейство кривых, которые, как следует из рис.9.8, могут быть заменены с достаточной для начальных стадий проектирования точностью, одной кривой. Последнее дает основание в первом приближении пользоваться полученной безразмерной диаграммой для любой однотипной ПЛ.

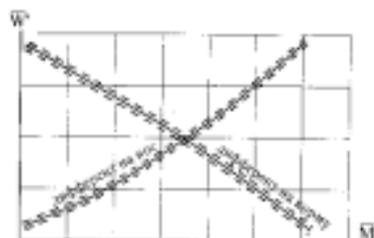


Рис. 9.8. Безразмерная диаграмма непотопляемости А.В. Базилевича

Порядок действий при определении запаса плавучести ПЛ по данному методу следующий. Подбирается ПЛ—прототип, одинаковая по форме и схеме отсеков и цистерн. Для нее берется диаграмма непотопляемости и кривые предельно допускаемых равных дифферентов перестраиваются в безразмерном виде. Далее по схеме общегоразположения разрабатываемого проекта выбирается наиболее тяжелый случай аварии. Для выбранного случая приблизительно определяют объем "нетто" затопляемых отсеков и цистерн — V_1 , а также его момент относительно миделя V_1x_1 . Затем подсчитываем величину безразмерного оставшегося после аварии момента запаса плавучести \bar{M}' и с этой величиной входим в график (рис. 9.8.)

$$\bar{M}' = \bar{M}_0' - \frac{V_1 x_1}{L_0 V_0}, \quad (9.11)$$

где \bar{M}_0' — момент запаса плавучести прототипа, для которого построена диаграмма.

По графику снимаем величину \bar{W}' безразмерного, оставшегося после аварии запаса плавучести (при условии, что угол дифферента не превышает допустимого). Тогда необходимый запас плавучести в процентах от V_0 составит:

$$\Delta \bar{V}^{\text{н}} \cdot 100\% = \left[V + \frac{V_1}{V_0} \right] \cdot 100\%. \quad (9.12)$$

После этого аналогичным путем определяют необходимый запас плавучести при аварии с дифферентом на корпус $\Delta \bar{V}^{\text{н}}$ и из полученных двух значений в проекте принимают большую величину.

В случае, если часть цистерн на проектируемой ПЛ — бесконтактные, то потребный запас плавучести возрастает, но оценить это увеличение достаточно сложно и воспользоваться в данном случае безразмерной диаграммой непотопляемости обычно не удастся. Это объясняется тем, что безразмерные диаграммы существенно изменяются как от объема, так и от расположения по длине корабля бесконтактных цистерн.

4. При определении потребного запаса плавучести по расчетным формулам, прежде всего, отметим, что он выбирается для обеспечения подводной непотопляемости из условий, отличающихся от изложенных. Подводная лодка после аварии должна оставаться на плыву с положительной продольной остойчивостью, которая нормируется максимальным плечом продольного восстанавливающего момента.

В качестве примера рассмотрим метод, разработанный Ю.К. Прытковым, согласно которому искомая величина запаса плавучести зависит от следующих параметров:

$$a = \frac{x_{30}}{L_0} + \frac{V_1 x_1}{L_0 V_0} \quad \text{— относительное плечо центра тяжести аварийной ПЛ;}$$

$$b = 1 + \frac{V_1}{V_0} \quad \text{— относительный погруженный объем аварийной ПЛ;}$$

$$k = \frac{\ell_{\text{max}} \cdot 10^3}{L_0} \quad \text{— относительное плечо продольного восстанавливающего момента аварийной ПЛ;}$$

где ℓ_{max} — максимальное плечо продольного восстанавливающего момента аварийной ПЛ;

$$\sigma = \frac{V_{\text{из}}}{V_{\text{из}}} \quad \text{— степень бесконтактности цистерн ПЛ,}$$

где V_1 — суммарный затопляемый объем (нетто) отсеков и цистерн;

x_1 — абсциссы центров тяжести этих объемов;

ℓ_{max} — максимальное плечо продольного восстанавливающего момента аварийной ПЛ, которое необходимо обеспечить;

$V_{\text{из}}$ — объем цистерн главного балласта;

$V_{\text{из}}$ — объем бесконтактных цистерн;

V_0 — нормальное водоизмещение ПЛ;

L_0 — длина непроницаемого и подводного положений объема.

Далее приводятся приближенные формулы для определения потребного запаса плавучести $\Delta \bar{V}$ для случаев аварии с дифференлом на нос $\Delta \bar{V}^n$ и на корму $\Delta \bar{V}^k$ для ПЛ со всеми кингстонными цистернами:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{V}_{\text{нос}}^n &= f_1(a; b; k) \\ \Delta \bar{V}_{\text{корм}}^k &= f_2(a; b; k) \end{aligned} \quad (9.13)$$

В том случае, если на проектируемой ПЛ по каким-либо соображениям предполагается часть цистерн главного балласта сделать бескингстонным, потребный запас плавучести ПЛ, как указывалось, возрастает:

$$\Delta \bar{V}_{\text{нос}}^{\text{ср}} = k_{\text{ки}} \Delta \bar{V}_{\text{нос}}^n, \quad (9.14)$$

где $k_{\text{ки}}$ — коэффициент влияния бескингстонных цистерн на запас плавучести можно определить как

$$k_{\text{ки}} = 1 + 0,3 \left(1,0 - \frac{x_k}{l_0} \right) \sigma, \quad (9.15)$$

где x_k — абсцисса центра величины кингстонных цистерн главного балласта.

Из приведенной зависимости видно, что $k_{\text{ки}}$ может изменяться от 1,0 для случая всех кингстонных цистерн до 1,3, если все цистерны ПЛ бескингстоновые. Это значит, что при прочих равных условиях необходимый запас плавучести для обеспечения требований надводной непотопляемости у ПЛ с бескингстонными цистернами на 30% больше.

Отмеченное выше увеличение запаса плавучести можно объяснить и физически. Если ПЛ в надводном положении получила пробоину, то вода будет поступать не только в поврежденный отсек и ЦГБ, но и в бескингстонные ЦГБ ввиду роста запора воды из-за увеличения осадки, что приводит к увеличению потребного запаса плавучести [89].

На сегодняшний день большинство отечественных ПЛ строится с обеспеченной надводной непотопляемостью, однако намечается тенденция к переходу на обеспечение частичной надводной непотопляемости, когда отсек затопляется лишь частично. Последнее обеспечивается применением непроницаемых палуб для отсеков большого объема, рассчитанных на давление 1,5—2 атм. В случае, когда надводная непотопляемость ПЛ не обеспечивается, выбор за-

паса плавучести существенно упрощается, т.к. его величина в основном будет определяться мореходными качествами в надводном положении.

Заданную (или намеченную) величину запаса плавучести можно использовать как условие для приближенного определения осадки подводной лодки.

Пусть V_1 запас плавучести проектируемой ПЛ.

Определим по прототипу безразмерный коэффициент

$$\lambda_k = \frac{V_1}{F_0 L_{\text{пр}}}, \quad (9.16)$$

где V_1 — запас плавучести прототипа;

F_0 — площадь сегмента прочного корпуса прототипа выше КВЛ (рис.9.9);

$L_{\text{пр}}$ — длина прочного корпуса прототипа.

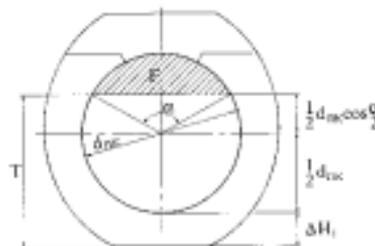


Рис.9.9. К определению осадки ПЛ по заданному запасу плавучести

Полная, что этот коэффициент для проектируемой подводной лодки будет близок к найденному, для прототипа определяем площадь сегмента:

$$F = \frac{V_1}{\lambda_k L_{\text{пр}}}, \quad (9.17)$$

где V_1 , $L_{\text{пр}}$, F относятся к проекту.

Согласно рис.9.9, осадка подводной лодки определится выражением

$$T = \frac{d_{\text{вк}}}{2} \cos \frac{\alpha}{2} + \frac{d_{\text{вк}}}{2} + \Delta H_1 = d_{\text{вк}} \cos^2 \frac{\alpha}{4} + \Delta H_1, \quad (9.18)$$

где $d_{\text{вк}}$ — диаметр прочного корпуса на шиделе;

α — центральный угол, соответствующий сегменту F .

Значение угла α для площади сегмента F при заданном диаметре круга можно определить по любому математическому справочнику.

9.6. Использование уравнения устойчивости для определения главных размеров

Основным режимом плавания для современных подводных лодок, как уже отмечалось, является подводный. Однако это не означает, что надводное положение или надводные режимы плавания перестали быть актуальными. Именно в надводном положении подводная лодка выходит и возвращается в базу, находится в аварийном состоянии. Поэтому уже на ранних стадиях проектирования необходимо приблизительно оценивать параметры устойчивости ПЛ в надводном положении и влиять последней на выбор главных размеров.

Чтобы использовать выражение для начальной поперечной метacentрической высоты

$$h_0 = z_c - z_g + \rho \quad (9.19)$$

при определении главных размеров, ординаты центра кельвинны — z_c и центра тяжести — z_g , а также поперечный метacentрический радиус ρ представим в зависимости от главных размеров и коэффициентов полноты корпуса.

Приближенные формулы для определения z_c и ρ имеют вид

$$z_c = k_c T; \quad \rho = k_r \frac{B_0^2}{T}, \quad (9.20)$$

где B_0 — ширина по крейсерской ватерлинии.

Коэффициенты k_c и k_r можно определить по выделенным (в части численных коэффициентов) зависимостям, предложенным профессором Б.М.Малышковым [55]:

$$k_c = k_1 \left(1 - 0,415 \frac{\delta}{\alpha} \right); \quad (9.21)$$

$$k_r = k_2 \frac{(2\alpha + 1)^2}{\delta}. \quad (9.22)$$

Численные значения коэффициентов k_1 и k_2 , полученные путем обработки статистической информации по современным подводным лодкам имеют следующие значения:

$k_1 = 0,860$; $k_2 = 0,0030$ — для двухкорпусных ПЛ;

$k_1 = 0,860$; $k_2 = 0,0028$ — для однокорпусных ПЛ.

Отметим, что координат в зависимости (9.21) и (9.22) коэффициент B отнесен к наибольшей ширине корпуса, длине и осадке по конструктивную ватерлинию, а коэффициент α отнесен к ширине по крейсерскую ватерлинию.

Ордината центра тяжести определяется в долях от высоты корпуса на шиделе:

$$z_g = \mu H, \quad (9.23)$$

где $\mu = 0,43$ — 0,45 для двухкорпусных ПЛ;

$\mu = 0,39$ — 0,41 для однокорпусных ПЛ.

Если имеется предарителльная нагрузка, составленная по массам и моментам, то ординату z_g следует брать из таблицы нагрузки.

Большие значения μ для двухкорпусных ПЛ объясняются тем, что прочный корпус у них поднят над основой на высоту вертикального кила.

Подставляя значения z_c , z_g и ρ в зависимость (9.19), получим уравнение устойчивости:

$$h = k_1 \left(1 - 0,415 \frac{\delta}{\alpha} \right) T + k_2 \frac{(2\alpha + 1)^2}{\delta} \frac{B_0^2}{T} - \mu H. \quad (9.24)$$

Если учесть, что ширина по КВЛ связана с максимальной шириной достаточно устойчивым для данного архитектурного типа ПЛ коэффициентом

$$B_0 = k_3 B \quad (9.25)$$

где $k_3 = 0,92$ — 0,95 для двухкорпусных ПЛ;

$k_3 = 0,75$ — 0,80 для однокорпусных ПЛ,

то уравнение (9.24) может быть записано так:

$$h = k_1 \left(1 - 0,415 \frac{\delta}{\alpha} \right) T + k_2 k_3^2 \frac{(2\alpha + 1)^2}{\delta} \frac{B^2}{T} - \mu H \quad (9.26)$$

Необходимо подчеркнуть, что коэффициенты k_1 , k_2 , k_3 , а также μ в данной работе приведены для ПЛ с различной величиной запаса плавучести. Поэтому при проектировании ПЛ их нельзя брать меха-

тически по приведенным выше данным, а следует всегда уточнить по прототипу.

Зависимостями (9.25) и (9.26), а также приближенными формулами (9.20) можно пользоваться, когда расчеты статики корабля еще не проведены для:

— приближенного определения начальной метацентрической высоты в заданном положении h_0 ;

— приближенного определения h_0 по назначенным главным размерениям B и T и коэффициентам α и δ , последние принимаются в этом случае по прототипу или статистическим данным, приведенным в главе 8;

— определения ширины ПЛ, обеспечивающей заданное значение начальной метацентрической высоты в надводном положении.

Для этого уравнение (9.24) удобно решить относительно B . При этом, если осадка T предварительно определена, то выражение для определения B запишется в виде:

$$B = \sqrt{\frac{(h + \mu h)T - k_1(1 - 0,415\frac{\delta}{\alpha})T^2}{k_2 k_3^2 \frac{(2\alpha + 1)^2}{\delta}}}. \quad (9.27)$$

Если же осадка неизвестна, то разделив правую и левую части (9.27) на B , после преобразования будем иметь

$$B = \frac{h + \mu h}{k_1 \left(1 - 0,415 \frac{\delta}{\alpha} \left(\frac{T}{B}\right) + k_2 k_3^2 \frac{(2\alpha + 1)^2}{\delta} \left(\frac{B}{T}\right)\right)}. \quad (9.28)$$

При использовании выражения (9.27) необходимо задать коэффициентами α и δ , а формулы (9.28) еще и отношением $\left(\frac{B}{T}\right)$.

Определив ширину подводной лодки, можно найти и остальные ее главные размерения.

10 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЧЕРТЕЖ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ

10.1. Общие положения

Значение теоретического чертежа определяется тем, что он фиксирует форму корпуса подводной лодки, которая, как было сказано выше, оказывает непосредственное влияние на многие ее характеристики. Таким образом, теоретический чертеж, наряду с расчетами нагрузки, постоянного плавучего объема и чертежами общего расположения может быть отнесен к основным проектным материалам [14].

Разработка теоретического чертежа базируется на двух положениях:

— необходимо, чтобы при фиксированных главных размерениях ПЛ были выдержаны значения водоизмещения и таких интегральных параметров формы корпуса, какими являются коэффициенты полноты площади и объема;

— желательно, чтобы и остальные параметры формы корпуса, такие, как протяженность и положение по длине цилиндрической вставки, форма носовой и кормовой оконечностей и другие были бы близки к оптимальным для данного корабля.

Теоретический чертеж подводной лодки предназначен:

— для полного и наглядного представления о форме наружной поверхности корпуса подводной лодки;

— для производства вычислений, связанных с определением проектных характеристик подводной лодки;

— для изготовления моделей подводной лодки, служащих для опытного определения ходовых и маневренных качеств будущей подводной лодки в опытовых бассейнах и аэродинамических трубах;

— для придания надлежащей формы корпусу подводной лодки при ее постройке путем разбивки листов обшивки, шпангоутов, стрингеров и других деталей корпуса на плане верфи в натуральную величину;

— для эксплуатационных целей (производства ремонтных работ по корпусу, поставкам в док, оказания помощи аварийной подводной лодке и т.д.). Для этих целей теоретической чертеж дается на каждую подводную лодку с технической документацией [31].

Теоретическим чертежом подводной лодки называют совокупность проекций (на главные плоскости) линий сечения корпуса подводной лодки плоскостями, параллельными главным плоскостям и которым относятся:

— горизонтальная плоскость, проходящая по верхней кромке среднего прямолинейного участка киля, называется *основной плоскостью (OII)*;

— продольно-вертикальная плоскость симметрии корпуса подводной лодки, перпендикулярная к основной плоскости, называется *диаметральной плоскостью (DII)*;

— поперечно-вертикальная плоскость (перпендикулярная к двум первым), проходящая по середине линии подводной лодки, называется *плоскостью мидельшпангоута*, или *плоскостью миделя*.

Линии пересечения главных плоскостей обычно принимают за оси координат, связанные с подводной лодкой:

— линию пересечения диаметральной плоскости с основной плоскостью за ось X (абсцисс) с положительным направлением в нос;

— линию пересечения диаметральной плоскости с плоскостью мидельшпангоута за ось Z (апсидат) с положительным направлением вверх;

— линию пересечения плоскости мидельшпангоута с основной плоскостью за ось Y (ординат) с положительным направлением на правый борт.

За начало координат принимают точку пересечения главных плоскостей и осей координат между собой.

Плоскости, параллельные диаметральной плоскости, называются *плоскостями бабок*; плоскости, параллельные основной плоскости, — *плоскостями теоретических ватерлиний (ВЛ)*; плоскости, параллельные плоскости мидельшпангоута, — *плоскостями теоретических шпангоутов*.

На теоретическом чертеже обычно изображается внутренняя поверхность наружной обшивки корпуса подводной лодки.

Линии пересечения поверхности корпуса подводной лодки с плоскостями бабок называются *бабками*. Пересечение диаметральной плоскости с поверхностью корпуса подводной лодки —

диаметральный батокс — дает линию киля, линии штевей (форштевя и ахтерштевя) и диаметральную линию палубы. Счет батоксов ведется от диаметральной плоскости на правый и левый борта раздельно.

Линии пересечения плоскостей теоретических ватерлиний с поверхностью корпуса подводной лодки называются *теоретическими ватерлиниями*. Основная плоскость принимается за нулевую ватерлинию. Счет ватерлиний ведется от нее вверх.

Линии пересечения плоскостей теоретических шпангоутов с поверхностью корпуса подводной лодки называются *теоретическими шпангоутами*. Счет шпангоутов ведется с носа в корму, начиная с нулевого шпангоута. Обычно длина вращающего корпуса или длина от носовой переборки первой ЦТБ до кормовой последней ЦТБ (непроницаемая динна) делится на 10 или 20 теоретических шпангоутов. Длины оконечностей делятся на свои теоретические шпангоуты в зависимости от длины оконечностей и сложности их обводов.

Совокупность проекций теоретических шпангоутов, теоретических ватерлиний и батоксов на диаметральную плоскость образуют, проекцию которая носит название *бок*, на основную плоскость — *полушироту* и на плоскость мидельшпангоута — *корпус*. Таким образом, теоретический чертеж подводной лодки состоит из трех проекций *бок*, *полуширота* и *корпус* (рис. 10.1.)

На проекции *бок* в истинном виде проектируются батоксы, а теоретические ватерлинии и шпангоуты изображаются соответственно горизонтальными и вертикальными прямыми.

На проекции *полуширота* теоретические ватерлинии проектируются в их истинном виде, а батоксы и теоретические шпангоуты — в виде горизонтальных и вертикальных прямых. Так как теоретические ватерлинии симметричны относительно диаметральной плоскости, то на проекции *полуширота* изображаются их половинки, обычно с левого борта от диаметральной плоскости. Этим и объясняется название проекции.

Для удобства часто делают две проекции *полушироты*, располагая их одну над другой. Тогда на одной из них изображаются теоретические ватерлинии от нулевой до крейсерской, а на другом — от крейсерской до ватерлинии полного погружения корпуса подводной лодки.

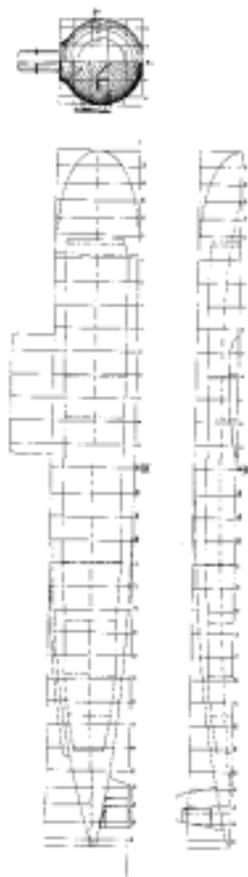


Рис. 10.1. Теоретический чертеж подводной лодки

На проекции корпус теоретические шпангоуты проектируются в их истинном виде, а теоретические ватерлинии и батоксы изображаются горизонтальными и вертикальными прямыми. Так как шпангоуты симметричны относительно диаметральной плоскости, то на проекции корпус полностью изображается только модельшпангоут. Остальные шпангоуты изображаются в виде полушпангоутов: справа от диаметральной плоскости — носовые шпангоуты, а слева — кормовые (рис. 10.2).

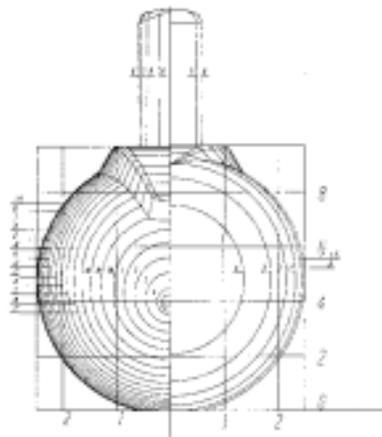


Рис. 10.2. Теоретический чертеж ПЛ (проекции "Корпус")

На чертеже показывают 10 или 20 теоретических шпангоутов, по 6—10 теоретических ватерлиний и по 2—3 батокса на каждый борт.

Кроме проекций линий сечения наружного корпуса подводной лодки на теоретическом чертеже показывают:

- очертание прочного корпуса подводной лодки;
- оси линий вала, диски винтов, оси торцевых аппаратов и т. д.;
- основные кораблестроительные данные подводной лодки, габаритные размеры и т.д.

Главной технической задачей стоящей перед разработчиком теоретического чертежа является получение гладкой, согласованной по всем координатам поверхности корпуса, удовлетворяющего всей совокупности требований к ПЛ и также вычисление координат поверхности с точностью, достаточной для выполнения окончательных расчетов и упрощения технологических процессов постройки ПЛ. Эти задачи решаются на всех этапах проектирования ПЛ, но с разной степенью точности и подробности, обусловленными целями каждого этапа.

10.2. Особенности разработки теоретического чертежа на разных этапах проектирования ПЛ

Наличие на ПЛ прочного и легкого (наружного) корпусов, проритичность характеристик подводного плавания и одновременно необходимость обеспечения параметров мореходности в надводном положении приводит к существенным отличиям в подходах и методах используемых при проектировании их теоретического чертежа. Эти подходы и методы варьируются в зависимости от стадии разработки проекта, так как от стадии к стадии меняются сами задачи, решаемые с помощью создаваемого теоретического чертежа. В то же время проектирование теоретического чертежа для ПЛ несомненно имеет много общего с проектированием обводов надводных кораблей, которое исторически развивалось в течение гораздо более долгого времени и накопило громадный опыт создания сложных судовых поверхностей [60]. Проектирование теоретического чертежа органически связано с вопросом общего расположения, нагрузок, остойчивости, мореходности, ходкости, управляемости и осуществляется в тесном взаимодействии с соответствующими специалистами и при обязательной оценке последних возможных изменений обводов.

В последнее время бурно развиваются методы построения теоретического чертежа, основанные на возможностях вычислительной техники активно вытесняющие традиционные "чертежные" приемы. Однако последние сохраняют свое значение в контексте общего понимания проблемы формирования судовых поверхностей и взаимосвязанности различных проектных характеристик.

При этом нельзя забывать, что внешний вид корабля должен быть красивым и тут нет более совершенного инструмента, чем глаз конструктора и его восприятие объекта. Поэтому на завершающей стадии разработки теоретического чертежа необходима его визуальная

доработка и, как правило, контрольные испытания в кантаднойной трубе подтверждают высокое качество обтекания корпуса ПЛ.

Таким образом, проектирование теоретического чертежа является достаточно широкой, и специфической областью инженерной деятельности, требующей специальной подготовки в части создания сложных поверхностей и широкой общей подготовки в области кораблестроительных наук [49].

Рассмотрим задачи, решаемые с помощью проектирования теоретического чертежа на разных этапах создания ПЛ.

В исследователеском проектировании наиболее важен сопоставительный анализ различных вариантов ПЛ, поэтому теоретический чертеж часто представляют в виде сочетания простейших геометрических фигур, позволяющих получить значения основных геометрических характеристик в конечном аналитическом виде и проследить зависимость этих характеристик от варьируемых параметров. Наиболее употребительные геометрические модели представляют собой сочетание эллипсоидной носовой оконечности, цилиндрической вставки и кормовой оконечности в виде прямого или параболического конуса.

Такое упрощенное представление позволяет исследовать возможность и целесообразность получения для проекта заданных главных размерений и их отклонений, осадки, водонизмещения и таких интегральных характеристик формы корпуса, какими являются коэффициенты полноты площадей и объемов. Параллельно проводится оптимизация геометрических соотношений для получения максимальных значений выбранных частных и общих критериев (ходкости, управляемости, шумности, стоимости, эффективности). При этом применяются прямые и обратные методы теории проектирования.

На данном этапе теоретический чертеж существует в виде математической модели, описывающей изменение полного подводного подонизмещения, главных размерений, смоченной поверхности, осадки и т. д. Графическое представление ограничивается схемой построения обводов [7].

Интересно отметить, что развитие вычислительной техники и математических методов построения поверхностей уже приводит к распространению этого подхода на другие стадии проектирования, на которых теоретический чертеж также начинает терять самостоятельное значение как графический документ, все более и более заменяясь некоторой математической моделью, позволяющей получить

любую геометрическую информацию, минуя этап графического представления.

На стадии технического предложения или аванпроект теоретический чертеж как отдельный документ обычно в составе проектной документации не представляется. Он разрабатывается в упрощенном виде, со степенью подробности, достаточной для определения главных размерений, выполнения основных расчетов и конструктивных чертежей.

В принципе, на данном этапе нет необходимости в тщательной отработке формы и точном согласовании теоретического чертежа. Однако, если он выполняется с помощью современных графических или вычислительных средств и методов, это условие выполняется автоматически.

На стадии эскизного проекта отработка теоретического чертежа приобретает первостепенное значение. Это связано с выпуском полного комплекта расчетов и чертежей по теории корабля и другим направлениям проектирования, использующих теоретический чертеж в качестве исходной информации. Другой важной чертой данного этапа является проведение большого объема модельных испытаний с целью определения или подтверждения характеристик лодкости, управляемости и других проектных элементов. Эти работы требуют изготовления моделей создаваемого корабля в различных масштабах. До внедрения вычислительной техники изготовление чертежей и моделей сопровождалось большими трудовыми затратами, так как было необходимо изготавливать чертежи длиной до 7 м. Ситуация упростилась с заменой копировальных станков на станки с числовым программным управлением, использующих не собственно чертеж, а числовые значения координат наружной поверхности.

Доработка обводов производится с учетом полученных экспериментальных результатов по определению структуры обтекающего модель подводной лодки потока и включает оптимизацию участков с недопустимо большими градиентами скорости обтекания, мест, провоцирующих вихреобразование, перетекание воды в провисающих частях и так далее.

В целом обводы корпуса ПЛ с ограждением и оперением должны удовлетворять всему комплексу требований, предъявляемых к кораблю и закрепленных в договорной спецификации. Поэтому на стадии технического проекта теоретический чертеж разрабатывается как отдельный документ, фиксирующий форму корабля. Столь высокая роль теоретического чертежа предполагает его качественное и под-

робное исполнение, возможность масштабирования и получения любого сечения или сазанной с ним характеристики (периметра, площади, объема и т. д.). В настоящее время теоретический чертеж технического проекта выполняется исключительно с использованием средств вычислительной техники.

Стадия рабочего проектирования предполагает адаптацию теоретического чертежа для нужд производственной базы верфи. На этом этапе необходимо цифровое представление координат поверхности, необходимое для раскорта материала корпуса и изготовления шаблонов, постелей и другой необходимой оснастки. По результатам этого представления выпускается специальный документ, называемый плазовой таблицей. Ранее, а иногда и в настоящее время, эта работа окончательно выполнялась на плазе, где теоретический корпус вычерчивался в натуральную величину, проходил окончательное согласование точек поверхности по всем координатам и проверку на гладкость.

В классическом варианте с помощью плазы окончательно определялись все размеры деталей, подлежащих изготовлению на верфи.

Плазовая подготовка производства весьма трудоемкая, дорогая и длительная часть процесса постройки, потому с развитием подводного кораблестроения предпринимались неоднократные попытки упростить этот процесс. Упрощение плазовых работ в первую очередь требует знания точных значений координат поверхности по дашгоутам, затерлингам и батоксам. Даже если эти координаты снимаются непосредственно с согласованного теоретического чертежа, выполненного в большом масштабе, при разбивке на плазе навязка может достигать нескольких десятков миллиметров. Это обстоятельство делало этап натурных плазовых работ совершенно необходимым элементом постройки ПЛ. Ясно, что только аналитическое представление обводов с возможностью точного расчета координат поверхности открывает дорогу к ускорению и удешевлению плазовой подготовки производства вплоть до полного отказа от геометрических построений конструктивных элементов корпуса и замены их моделированием поверхности и отдельных деталей на ЭВМ.

Такие системы автоматизирования проектирования созданы и широко применяются в практике мирового кораблестроения. При проектировании ПЛ они также находят применение с учетом особенностей, присущих архитектуре этого класса кораблей. Однако в основе современных аналитических методов лежит опыт применения классических графических приемов формирования обводов, осно-

ние понятия которых остается необходимым элементом подготовки инженера-кораблестроителя.

10.3. Методы, применяемые при проектировании и задании корабельных обводов

Все методы, применяемые при построении теоретического чертежа, могут быть объединены в следующие группы:

а) методы, которыми можно пользоваться в тех случаях, когда форма корпуса разработывается на глаз.

б) методы, основывающиеся на перестроении теоретического чертежа прототипа,

в) методы, использующие геометрические построения,

г) аналитические методы построения теоретического чертежа.

При проектировании и задании сложных поверхностей конструктор может пользоваться различными методами. Каждому из них присущи свои достоинства и недостатки. С целью сравнения существующих методов между собой рассмотрим их на примере построения одной и той же простой поверхности. Поверхность ограничивает тело, симметричное относительно диаметрального батокса и максимальной полушироты, представляющее аналог корпуса подводной лодки. В носовой точке касательные к поверхности перпендикулярны диаметру и широчайшей полушироте. Корма имеет разные углы скоса по батоксам и ватерлиниям. Цилиндрическая вставка отсутствует.

Метод ортогональных сечений

Самым старым методом проектирования плавных поверхностей, когда форма корпуса разработывается на глаз, является метод ортогональных сечений или иначе метод батоксов (вертикальных продольных сечений) и горизонталей (ватерлиний). Он основан на применении законов вращательной геометрии. Метод появился с самого начала развития судостроения и до сих пор успешно применяется при выполнении отдельных проработок на начальных этапах проектирования. Сутью этого чисто графического метода сводится к построению большого количества поперечных и продольных сечений поверхности в трех проекциях. Контуры этих сечений взаимно корректируются по проекциям большого количества отдельных точек для получения плавных линий. Расстояния между плоскостями поперечных сечений, плоскостями батоксов и ватерлиний выбираются в зависимости от величины объекта и кривизны его поверхности. Чем больше сечений, тем точнее задана поверхность [7].

Проектирование и задание поверхности производится в следующей последовательности (рис. 10.3):

1) по "критическим" точкам, через которые должен пройти обвод (по условиям размещения прочного корпуса и оборудования в межбортом пространстве в надстройке), при помощи лекала или гибкой рейки вычерчиваются заданные основные продольные линии (в данном примере главный батокс—диаметраль и главная горизонталь—максимальная полуширота;

2) на профильной проекции откладываются координаты исходных точек (по диаметральному батоксу и максимальной полушироте) для выбранных поперечных сечений и намечаются от руки обводы этих сечений;

3) на проекциях наносятся следы плоскостей батоксов и ватерлиний;

4) с намеченных от руки обводов сечений снимаются координаты точек, по которым эти точки переносятся на боковую проекцию. Полученные точки соединяются кривыми линиями. Точно так же на горизонтальной проекции строятся кривые ватерлиний;

5) координаты отдельных точек, выпавших из плавных кривых батоксов и ватерлиний, корректируются до тех пор, пока кривые батоксов, ватерлиний и шпангоутов не станут плавными. Этот этап работы является самым трудоемким и требует определенного навыка;

6) через уточненные точки при помощи лекала или гибкой рейки проводятся окончательные кривые батоксов, ватерлиний и шпангоутов;

7) на сетке батоксов и ватерлиний соответствующих сечений производится замер координат точек и заполняется таблица.

Метод ортогональных сечений дает наглядное представление о поверхности, но объективной оценки плавности поверхности дать не может, так как единственным критерием плавности обводов является визуальная их оценка.

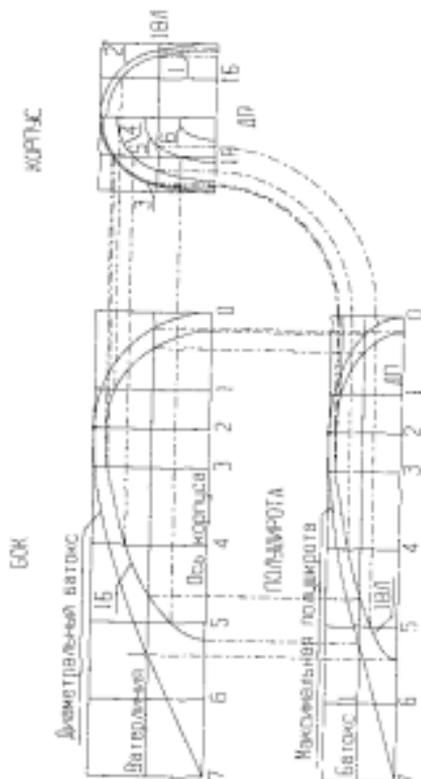


Рис. 10.3. Метод ортогональной проекции

Метод аффинного перестроения чертежа прототипа

В практике проектирования широко применяются методы получения теоретического чертежа проекта перестроением чертежа прототипа. К группе данных методов можно отнести интерполяционный способ построения чертежа, перестроение чертежа прототипа на основании стрелой по шпангоутам проекта. Наиболее простым способом перестроения теоретического чертежа прототипа является аффинное преобразование. Такое преобразование возможно только в том случае, когда изменяются главные размеры, а коэффициенты поворота остаются неизменными [7]. При этом неизменными, помимо центра кельмы, площади ватерлиний и шпангоутов, а также другие элементы чертежа легко вычисляются по простым формулам, основанным на частичной подобии получаемой формы корпуса ПЛ с исходной формой.

Рассмотрим частный случай такого преобразования, когда изменяется только длина корпуса, получаем изменение расстояния между теоретическими шпангоутами при изменении длины

$$\xi_1 = \frac{L_1}{L_0} = \frac{\Delta L_1}{\Delta L_0} \quad (10.1)$$

где индекс "0" относится к исходному, а "1" к проектируемому чертежу.

В том случае, когда изменяется только высота корпуса ПЛ, построение теоретического чертежа заключается только в изменении расстояния между ватерлиниями, которое находится из выражения

$$\eta_1 = \frac{T_1}{T_0} = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_0} \quad (10.2)$$

В случае изменения ширины, получаем ординаты нового чертежа умножаем исходных ординат на выражение

$$b_1 = \frac{B_1}{B_0} = \frac{\Delta B_1}{\Delta B_0} \quad (10.3)$$

Таким образом $y_1 = b_1 y_0$. Построение такого чертежа чрезвычайно просто, главные линии чертежа прототипа остаются плавными и у проекта. На рис. 10.4. показан теоретический чертеж, полученный аффинным увеличением длины корпуса, построенного предыдущим методом. Коэффициент увеличения $k=1.50$.

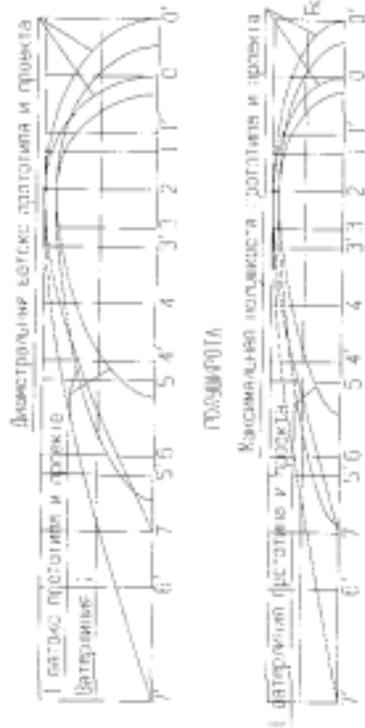


Рис. 10.4. Аффинное построение теоретического чертежа

Радиусографический метод

Радиусографический метод построения теоретического чертежа в подводном кораблестроении появился относительно недавно – в 60-е годы, но быстро получил распространение в подводном кораблестроении. Большинство теоретических чертежей подводных лодок послевоенной постройки включая такие как "Тайфун", "Дельфин", "Янки", "Кило" и других построены этим методом.

Радиусографический метод проектирования сложных поверхностей (предложен инж. Д.С.Кистановым) [37] и основан на геометрическом представлении, рассматривающем поверхность любого объемного тела как пространственную эвольвенту некоторой эвольвентной поверхности. Методы представления и построения этой эвольвенты, которая носит название строительной и представляет собой совокупность пространственных дуг окружностей, составляет сущность радиусографии. На рис.10.5 в качестве примера, представлено совмещенное сечение, параллельное вертикальной плоскости ZY поверхности эллипсоидального обвода и его эвольвентной поверхности.

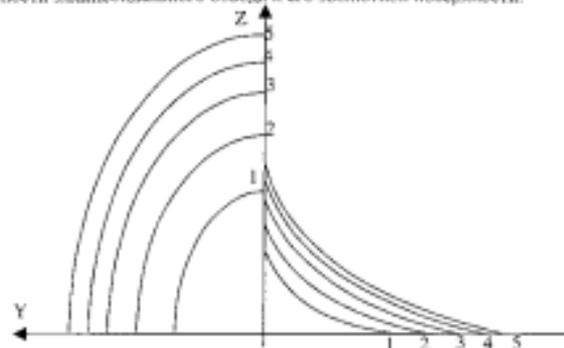


Рис. 10.5. Совмещенные вертикальные сечения эллипсоидального обвода и его эвольвентной поверхности

Практика показывает, что любую относительно сложную эвольвенту во всех случаях можно заменить несколькими прямыми, т.е. значительно упростить. В этом случае эвольвента может быть представлена в виде сумми нескольких дуг окружностей. Количество таких дуг будет зависеть от того, на сколько участков прямых заменена эвольвента. Таким образом переходим от рассматриваемой кривой, в нашем

случае эллипса, к ее примерному эквиваленту — овалу состоящему из нескольких дуг окружностей. При наличии достаточного опыта замена кривой на ломаную дает довольно близкую кривизну обводов вполне допустимую для практики простроивания. Наличие упрощенной эвольвенты позволяет взять ее за центральной ключ (рис. 10.6.). Центральным ключом кривой называется схематическая запись в принятой системе координат начального радиуса и центров точек, обеспечивающая графическое построение, аналитическое выражение и расчет этой кривой в декартовых или полярных координатах из элементарных уравнений окружности

$$(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2 = R^2 \quad (10.4)$$

где y_0 и x_0 — координаты центра окружности, y и x — текущие координаты.

Хотя дуги окружностей и являются кривыми второго порядка, метод радиусографии не относится к методу кривых второго порядка, так как основан на совершенно других принципах. В нем используется как чисто графический способ построения, так и построение по аналитическому расчету

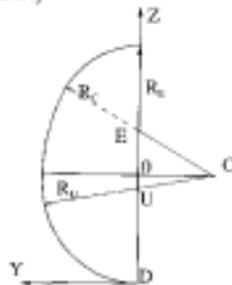


Рис. 10.6. Центральной ключ плоской кривой

Следует заметить, что слишком пологую кривую взять за центральной ключ весьма затруднительно. Данное замечание относится к продольно-образующему обводу — диаметральному батоксу или ватерлинии по наибольшей ширине. В этом случае длина корабля или длина оконечности сжимается до величины $L_{сж} = L_{ис}/k$,

где k — коэффициент сжатия, который устанавливается из расчета наиболее простого построения центрального ключа и удобства разбивки теоретической сетки. В зависимости от условий задания и характера продольных обводов коэффициент сжатия может выбираться разным для носовой и кормовой оконечностей. Таким образом радиусографический метод использует аффинные преобразования как свою составную часть. Для построения теоретических обводов радиусографическим методом, применяя те же исходные данные, что и при построении методом ортогональных сечений. На рис. 10.7. показано задание методом радиусографии той же поверхности, что и на рис. 10.3.

Проектирование и задание производится в следующей последовательности:

1) по исходным данным вычерчиваются основные продольные линии (в данном случае — диаметральный батокс и наибольшая полуширота) и намечаются обводы поперечных сечений;

2) в зависимости от характера поперечных сечений с помощью построений, выполняемых циркулем, определяется потребное количество сопряженных дуг различных окружностей, из которых будет состоять обвод поперечных сечений (в данном примере достаточно двух дуг с радиусами R_1 и R_2);

3) намечаются линии положения центра дуг окружностей радиусов R_1 вдоль поверхности, что и определяет способ построения сечений. Радиус R_2 не требует специального задания, так как полностью определяется величиной R_1 и тем обстоятельством, что центр окружности лежит на ватерлинии максимальной полушироты (оси данного тела).

4) для основных и вспомогательных продольных линий (диаметральный батокс, наибольшая полуширота и график радиусов R_1) подбираются сопряженные дуга окружностей. С целью уменьшения величины радиусов дуг и их количества применяется мезитиное сжатие продольных линий. В данном примере сжаты: наибольшая полуширота ($k = 1,60$), кормовая часть диаметрального батокса ($k = 1,33$) и график радиусов R_1 ($k = 2,00$). Носовая часть диаметрального батокса может быть удовлетворительно аппроксимирована одним радиусом, не прибегая к сжатию ($k = 1,0$). Сжатие и последующее представление продольных линий обводов дугами окружностей имеют основной целью получение гармоничного плавных кривых, которые можно затем рассчитывать аналитически. Плавность продольных кривых в сочетании с единым законом построения поперечных

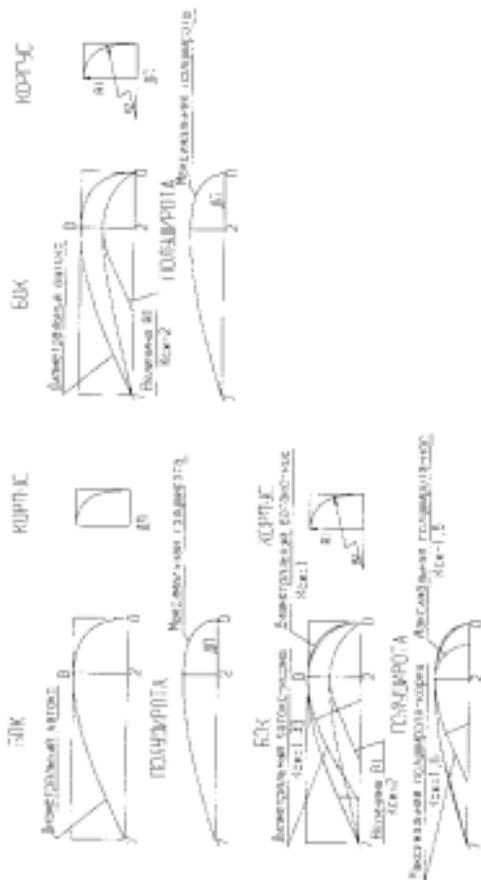


Рис. 10.7. Радиосграфический метод построения теоретического черта

сечений обеспечивают плавность и согласованность всей поверхности. В принципе, продольные кривые можно задавать любыми способами, гарантирующими плавность, например кривыми второго порядка.

5) по уточненным таким образом исходным точкам окончательно строятся поперечные сечения;

6) устанавливаются размеры для линий центров и радиусов дуг сопряженных окружностей и при необходимости выполняется расчет плавных координат.

Одной из основных особенностей метода радиосграфии заключается в гарантированной плавности изменения кривизны линий (так как они задаются сопряженными дугами различных окружностей, причем сопряжение их осуществляется по общей касательной).

Графические построения обводов методом радиосграфии требуют определенного опыта, так как для обводов продольных линий и поперечных сечений, как правило, требуется задание нескольких линий центров. С другой стороны, для построения теоретического черта используются в основном только самые простые инструменты: циркуль и линейка. Аналитический расчет координат поверхности производится после построения черта, если в этом возникает необходимость. Совокупность всех центровых ключей с коэффициентами скелета представляет собой так называемый радиосграфический ключ теоретического черта. Имея данный ключ можно получить любое поперечное сечение корпуса. При этом важно отметить особенность метода — все поперечные сечения будут согласованы и корпус будет иметь плавные обводы [49].

Радиосграфический метод имеет целый ряд преимуществ, основными из которых являются:

- обводы получаются более правильными и плавными по сравнению с методом рикования;
- радиосграфический ключ при введении его в ЭВМ позволяет построить любое сечение корпуса с помощью графопостроителя;
- метод дает по существу используемой плавную разбивку корпуса, т.к. любые сечения корпуса могут быть рассчитаны без глаза по радиосграфическому ключу;
- построение теоретического черта РГМ производится гораздо быстрее, т.к. отсутствует один из наиболее трудоемких этапов, а именно процесс согласования черта;
- метод достаточно хорошо приспособлен для постановки на ЭВМ, что значительно расширяет его возможности.

Этот метод оптимальен для круговых обводов, характерных для архитектуры П.Л. Гибка корпусных деталей по нескольким, но постоянным радиусам существенно упрощает технологию постройки. Координаты поверхности аналитически вычисляются с любой необходимой точностью.

В силу этих преимуществ метод радиусографии получил широкое применение.

Аналитические методы построения теоретического чертежа

Рассматриваемая группа методов, зная свои родоначальником шведского инженера Ф.Г. Чапмана, начала применяться в практике зарубежного кораблестроения с 1760 года, а в России с 1831 г. Они зародились в то время, когда за неизменем других критериев качество обводов оценивалось по плавности и красоте линий теоретического чертежа [7], [59], [60].

Среди аналитических кривых, предлагающихся в различное время для изображения корабельных сечений наиболее известны следующие:

— параболы

$$\begin{aligned} y^2 &= px && \text{(Чапман Ф. Г.)} \\ y &= 1 - (ax^m - cx^2) && \text{(Тейлор)} \\ y &= ax^4 + bx^3 + cx^2 + 1 && \text{(Ногви Л. М.)} \\ y &= kx^2(1 - x^2)^2 && \text{(Яковлев И. А.)} \end{aligned}$$

— прогрессивы

$$\begin{aligned} y &= \frac{1 - x^2}{1 - mx^2} && \text{(Попов А. А.)} \\ y &= \frac{(1 - c)\sqrt{1 - x^2}}{1 - c\sqrt{1 - x^2}} && \text{(Арцулов С.)} \end{aligned}$$

— пластичные линии

$$y = (u^m - m\alpha^{\frac{m}{2}} \ln u)^2 \quad \text{(Афанасьев В. И.)}$$

— инверсия эллипса

$$y = \frac{a}{\sqrt{\lg^2 \theta + \left(\frac{a}{b}\right)^2}} \quad \text{(Альмов И. П.)}$$

Все перечисленные зависимости предназначались для обводов подводных кораблей. Тем не менее, И.Г. Бубнов при проектировании подводной лодки "Барс" впервые применил аналитический метод построения теоретического чертежа. Эти попытки были предприня-

ты на заре подводного кораблестроения и предложенные выше методы в дальнейшем не прижились. Над развитым аналитическим методом построения теоретического чертежа работали также И.Г. Бубнов, Г.Е. Павликов, А.А. Курдюмов, К.Б. Малевич.

Необходимо отметить, что осуществить идею построения теоретического чертежа аналитическими методами достаточно трудно по следующим причинам. Во-первых, представляет затруднение выбор формы уравнения образующей кривой, поскольку оно должно быть достаточно простым в целях удобства выполнения различных математических операций, а также с необходимой степенью точности описывать оптимальную форму корабельных обводов. Во-вторых, в подобные аналитические выражения должны входить проектные характеристики, которые получены в результате определения главных размерений, коэффициенты полноты и т.д.

Предположим, что корабельная кривая в общем виде описывается зависимостью

$$y = f(x, a, b, c) \quad (10.5)$$

где a, b, c — коэффициенты, которые определяются граничными или другими условиями.

При большом числе коэффициентов уравнения (10.5) позволяет воспроизвести любую корабельную кривую. Однако, применяя аналитические кривые, приходится ограничивать число коэффициентов в используемых уравнениях, что приводит к более жесткому заданию кривой. При чрезмерно большом количестве коэффициентов невозможно установить рациональные условия для их определения.

Следует заметить, что рассмотренный ранее радиусографический метод также является аналитическим, но выражение для поверхности весьма сложно и не поддается анализу без использования ЭВМ.

В соответствии с изложенным необходимо различать среди аналитических методов построения теоретического чертежа методы жестко определяющие форму обводов и методы при которых сохраняется одна или две степени свободы. Большая часть методов, базирующихся на математических уравнениях кривых, относится к первой категории. Следует отметить, что основным тормозом в развитии аналитических методов до последнего времени являлась ограниченность вычислительных средств. Кораблестроители стремились использовать только простейшие кривые, кото-

рде можно было построить графически с помощью чертежных инструментов. Сегодня эти трудности в значительной степени преодолены, и современные программные комплексы реализуют очень сложные функции, описывающие любые виды поверхностей. Однако некоторые общие принципы сохранились в первоначальном виде, поскольку они описывают специфику корабельной архитектуры и форму обводов подводных долек в качестве частного случая.

Примером для определенности, что выражение (10.5) является выражением ватерлинии подводной лодки. Тогда оно должно удовлетворять по крайней мере четырем условиям, которые обязательны для класса корабельных кривых. Эти условия, как известно, следующие:

— в носовой точке ($x = 0, y = 0$), угол между касательной к образующей кривой и координатной осью OX должен быть равен 90°

— в кормовой точке ($x = l, y = 0$) угол наклона касательной к оси OX , в целях обеспечения безотрывности обтекания кормовой оконечности тела вращения и получения оптимального продольного коэффициента, должен быть равен $8 - 16^\circ$;

— для достижения минимального сопротивления при движении в подводном положении, наибольшее сечение тела вращения должно находиться в пределах следующих значений от начала координат $x = 0,3l - 0,4l$

— при данных значениях X кривая имеет горизонтальную касательную, что позволяет ввести в обвод корпуса цилиндрическую вставку.

Указанным условием отвечает и метод задания поверхности уравнением второго порядка с переменными коэффициентами. При задании коэффициентов гладкими дифференцируемыми функциями возможно получение аналитических судовых поверхностей.

Рассмотрим построение тепрельческого чертежа методом кривых второго порядка, который нашел применение в судостроительной и авиационной промышленности. Сущность его состоит в задании кривыми второго порядка продольных линий, обводов поперечных сечений, а также вспомогательных линий для построения поверхности. Сама линия может быть построена графическим приемом или рассчитана аналитически. Как расчет, так и способы графических построений, основаны на теории кривых

второго порядка, в соответствии с которой для их определения достаточно пяти условий [8].

Линией (для кривой) второго порядка называется линия, уравнение которой в декартовых координатах имеет вторую степень относительно текущих координат.

Общее уравнение второй степени (кривой второго порядка) с двумя неизвестными переменными имеет вид

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (10.6.)$$

По значениям коэффициентов в уравнении кривой второго порядка можно определять тип кривой (эллиптический, гиперболический или параболический). Критерием для этого служит величина $B^2 - 4AC$, называемая аналитическим дискриминантом.

Если $B^2 - 4AC < 0$ — кривая эллиптического типа,

$B^2 - 4AC > 0$ — кривая гиперболического типа,

$B^2 - 4AC = 0$ — кривая параболического типа.

Из уравнения (10.6) видно, что кривая второго порядка определяется значением пяти коэффициентов (A, B, C, D, E), т.е. пятью геометрическими условиями. Действительно, пусть нам известны координаты пяти точек, принадлежащих кривой второго порядка.

Подставляя их значения в общее уравнение кривой второго порядка, получим систему пяти уравнений. Решая совместно эти уравнения, определим такие значения коэффициентов (A, B, C, D, E) при которых координаты каждой из заданных пяти точек будут удовлетворять уравнению (10.6.). Как уже отмечалось ранее, для подводного кораблестроения более приемлемым является задание кривой величинами углов касательных к обводу носовой точки (90°) и кормовой точке (угол кормового зорострения $\alpha = 8 - 16^\circ$), а также по трем промежуточным точкам. Часто графические построения удобнее производить с использованием так называемого проективного дискриминанта, позволяющего строить кривую по заданным касательным и одной заданной точке [20].

Рассмотрим последовательность проектирования и задания принятой ранее поверхности кривыми второго порядка по заданным трем точкам для диаметрального батокса и наибольшей ползушироты, а также двум касательным для каждой кривой (рис.10.8.):

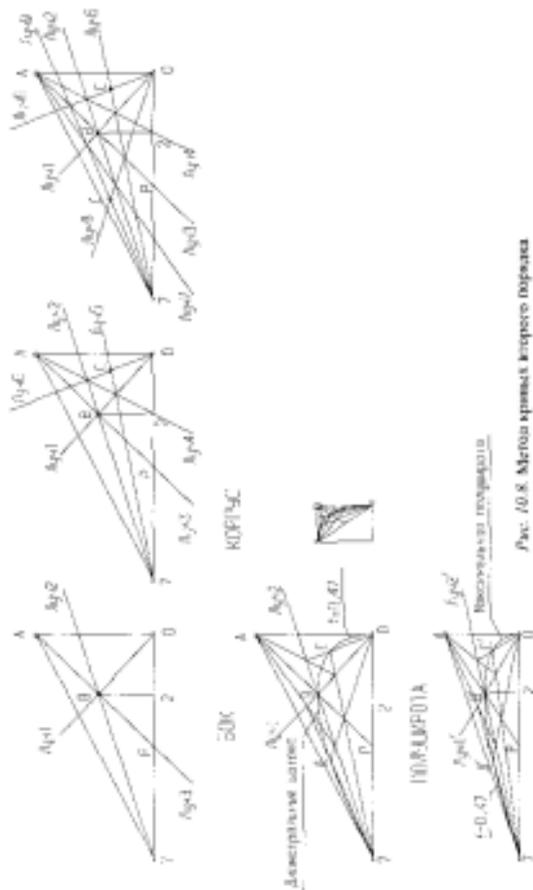


Рис. 10.8. Метод кривых второго порядка

Строится каркасный треугольник, сторонами которого являются длина корпуса и касательные к обводу диаметрального батокса в носовой и кормовой точках. Внутри построенного треугольника отмечается точка максимального сечения В.

Через точку В проводятся лучи 1, 2 и 3. В данном случае луч 3 представляет собой медиану каркасного треугольника. Отношение длин отрезков АВ и АР носит название проективного дискриминанта — $\Gamma = АВ/АР$. Проективный дискриминант Γ вместе с вершинами каркасного треугольника однозначно определяют форму кривой второго порядка.

Строится вторая точка кривой, для чего проводится произвольные лучи 4 и 5, пересечение которых лежат на луче 1. Проводится луч 6 через точку пересечения луча 4 и луча 2. Пересечение лучей 5 и 6 дает точку С, принадлежащую искомой кривой. Аналогично по лучам 7, 8 и 9 строится точка кривой Д, а при необходимости строятся другие дополнительные точки. Проектируется, удовлетворяет ли построенная кривая "критическим" размерам.

Аналогично проводится построения для максимальной полушироты (точки В, С и Д) и поперечных сечений.

Для получения закономерного плавного изменения продольных линий и формы шпангоутов задается закон изменения проективного дискриминанта по длине подводной лодки.

Часто поперечные сечения (шпангоуты) строятся с привлечением дополнительных продольных сечений, не совпадающих с ватерлиниями или батоксами. Такие наклонные к основной плоскости и диаметральные сечения называются рыбными.

Большим достоинством метода является возможность легкого и быстрого построения обводов любого количества поперечных сечений путем задания небольшого количества продольных линий, соединяющих исходные точки. Благодаря этому получается наглядное изображение на чертеже проектируемой формы.

Свойство кривых второго порядка подчиняться аффинным преобразованиям позволяет отказаться при больших размерах проектируемого изделия от построения продольных линий обводов поверхности в натуральную величину. Для этого строится "сжатый контур" продольных линий, на котором все продольные линии, заданные кривыми второго порядка и прямыми, масштабно сжимаются с сохранением натуральных величин ординат. Применение "сжатого контура" позволяет сократить потребности для построений производственные площади.

Благодаря доступности кривых второго порядка технике графических построений и аналитическому расчету геометрии, можно сравнительно легко и быстро с необходимой точностью построить или рассчитать кривую второго порядка.

Возможно совмещение метода кривых второго порядка и метода радиусографии. Поперечные сечения (шпангоуты) строятся методом радиусографии, а линии центровых ключей и основные продольные карловые линии задаются кривыми второго порядка.

Схема стрингеров

Схема стрингеров представляет собой теоретический чертеж (проекции корпус), на котором нанесены не теоретические шпангоуты, а поперечные сечения, соответствующие переборкам цистерны главного и вспомогательного балласта а также различных выгородок, расположенных в междубортном пространстве. На схеме наносятся продольные конструкции, ограничивающие объем цистерны и выгородок — стрингеров, что объясняет название данного документа. Совместимость геометрической и цифровой информации, содержащейся на схеме, позволяет построить эти сечения на плите, сопоставить их с элементами продольного и поперечного набора, получить растяжки листового и профильного материала, а также изготовить необходимую производственную оснастку.

Схема стрингеров разрабатывается на заключительной стадии проектирования ПЛ — этапе технического и рабочего проектирования. В настоящее время делается усиленные попытки заменить схему математической моделью для организации бесплозного производства. В этом случае схема может быть использована как иллюстративный материал, позволяющий наглядно представить себе архитектуру междубортного пространства подводной лодки (рис. 10.9).

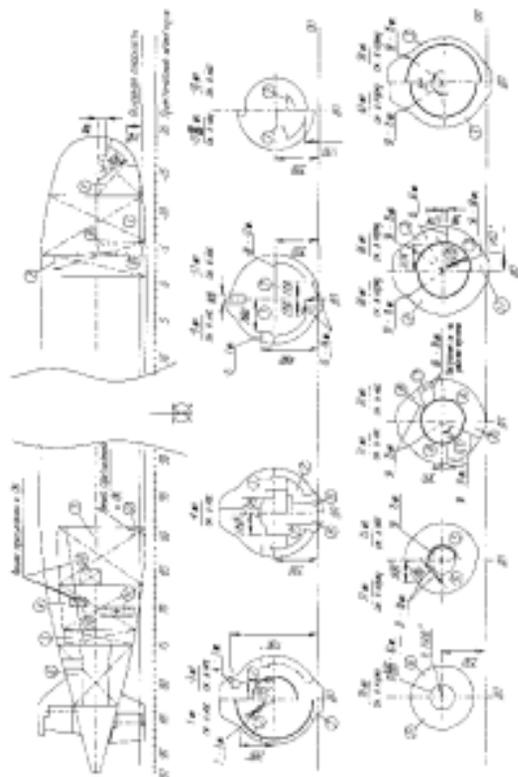


Рис. 10.9 Схема стрингеров

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10



Рис. 10.11. Геометрический чертеж корпуса

10.5. Современные инструментальные средства построения теоретического чертежа

В настоящее время существует множество различных CAD/CAM систем для проектирования поверхности корпуса, его конструкции и оборудования. Каждая из них имеет свои плюсы и минусы.

В подклассе кораблестроения применяются такие системы, как CADDSS, AutoCAD, CADKEY и АПИРС. AutoCAD и CADKEY используются, в основном, для оформления чертежей и разработки сложных деталей и узлов. С помощью программы CADDSS разрабатываются корпусные конструкции, трубопроводы, производится трехмерное электронное моделирование помещений. Для проектирования обводов корпуса используется специализированная программа АПИРС.

Система АПИРС — это система автоматизированного проектирования для судостроения, включающая в себя систему геометрического моделирования, объектно-ориентированную базу данных, расчетные и интерфейсные модули.

Существенные особенности системы АПИРС заключаются в интерактивном формировании поверхности корпуса, определении палуб, надстроек, платформ и переборок, формировании конструкции корпуса, общего расположения, трассировке трубопроводов и кабелей на основе единого математического аппарата B-сплайн кривых и B-сплайн поверхностей. Все построения как для решения задач формирования корпуса, так и для решения задач общего расположения и конструкции корпуса судна, используют единый графический интерфейс и базу данных. Единый математический аппарат позволяет на всех стадиях проектирования использовать аналитически непрерывную поверхность корпуса, что позволяет избежать накопления ошибок на стадии определения геометрии деталей корпуса судна.

Система АПИРС имеет встроенную систему параметризации и позволяет отслеживать изменения, возникающие в процессе проектирования. Единая база данных содержит в себе все взаимосвязи, устанавливаемые пользователем между элементами, и позволяет осуществлять доступ к элементам с рабочих мест пользователей через сеть, причем отслеживаются изменения, осуществляемые пользователями с различных рабочих мест. Вся информация в базе данных структурирована по иерархическому принципу, причем структура иерархии может выбираться пользователем с учетом принципа структуры проектирования и цикла рабочих мест в данной организации.

Система АПИРС позволяет легко формировать поверхность корпуса корабля любого типа, от ПЛ до крупных морских судов, скоростных катеров, судов на воздушной подушке, на подводных крыльках и экранопланов. Математическая модель поверхности корпуса судна определяется набором участков аналитически непрерывных B-сплайн поверхностей.

Формирование поверхности корпуса начинается с задания конструктивных каркасных линий с последующим определением участков поверхностей. Полученные поверхности могут корректироваться и уточняться на последующих стадиях проектирования, причем изменения поверхности корпуса будут отражаться на конструкции корпуса, общем расположении и т.д. Существует возможность создания библиотеки типовых обводов и использования типовых элементов на новых проектах.

Система АПИРС имеет возможность формирования элементов конструкции корпуса судна, общего расположения и трассировки трубопроводов. Все элементы имеют топологические связи с поверхностью корпуса и между собой, и отслеживают все изменения на любой стадии проектирования.

Система имеет в своем составе подпрограмму определения важнейших элементов статики проектируемой ПЛ. Это позволяет одновременно с построением обводов получить всю необходимую информацию по водовмещению, смачивной поверхности, площади и моменту инерции ватерлинии, посадке корабля и другим элементам. Следовательно, проектируя обводы корпуса, конструктор может находить технические решения, которые оптимальным образом удовлетворяют требованиям и критериям, предъявляемым к ПЛ. При необходимости информация передается в специализированные расчетные комплексы, обеспечивающие повышенную точность определения элементов статики или динамики и выпуск проектной документации. Современные системы могут дополняться программами расчета характеристик гидродинамики, действующими непосредственно на основе уравнений теоретической гидромеханики. Это позволяет одновременно с проектированием обводов подводной лодки оптимизировать их, не прибегая к дорогостоящим модельным испытаниям. Этот метод получил название "предбазейновой оптимизации". В случае применения данного метода модельные испытания ПЛ не используются полностью, однако их объем и сроки проведения могут быть значительно сокращены.

11. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПЕРЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК

11.1. Назначение оперения.

Состав оперения подводной лодки

Все надводные корабли, если не рассматривать движение на волнении движутся только в горизонтальной плоскости. Подводная лодка в погруженном состоянии совершает пространственное движение. Оперение ПЛ предназначено для обеспечения заданного уровня управляемости как при плоском, так и при пространственном движении.

Известно, что понятие управляемость является комплексным, сложным понятием, характеризующим движение корабля, его поведение на различных скоростях хода, как без воздействия органов управления, так и при их использовании. В основном управляемость, как известно, можно охарактеризовать устойчивостью движения при воздействии на корабль возмущающих сил и маневренностью при воздействии на него средств управления.

Как устойчивость, так и маневренность характеризуются традиционными критериями, численные значения которых зависят от назначения ПЛ и оговариваются требованиями при проектировании.

Итак, оперение ПЛ предназначено для обеспечения ее устойчивости на курсе и маневренности при всех случаях движения, определяемых условиями эксплуатации.

Все оперение, которое устанавливается на ПЛ можно разделить на неподвижное (стабилизаторы) и подвижное (рули). В свою очередь и тот, и другой вид оперения подразделяется на вертикальное и горизонтальное.

Особое место занимает кормовое оперение. Его появление вызвано исключительно требованиями гидродинамики. Если бы современная ПЛ не имела кормовых стабилизаторов, то при ее движении в безграничной жидкости всякое внесение возмущения

вызвало бы неасимптотическое изменение траектории движения, то есть движение ПЛ было бы неустойчивым. [72]

Для предотвращения несамоуравновешивающегося изменения траектории движения необходимо обеспечить динамическую устойчивость ПЛ. Конструктивно это обеспечивается установкой в кормовой оконечности ПЛ плоскостей (стабилизаторов), которые демпфируют опрокидывающий момент. Стабилизаторам придается крылообразная форма с размахом, который обеспечивает удовлетворительную несущую способность. По дну корпуса стабилизаторы располагают возможно более удаленными в корму для достижения максимальной моментной характеристики.

Ограничивающими факторами смещения стабилизаторов в корму являются следующие соображения:

во-первых, по требованиям акустики задняя кромка стабилизаторов должна отстоять от диска гребного винта на достаточно большом расстоянии;

во-вторых, необходимо обеспечить размещение приводов рулевых машин и конструкций крепления стабилизаторов на корпусе.

Можно выделить три основных типа кормового оперения — крестообразное, Х-образное и И-образное (Рис. 11.1).

Крестообразное оперение — горизонтальные и вертикальные стабилизаторы с вписанными в них рудами.

Крестообразное оперение — наиболее распространенная схема на современных одновальных ПЛ, обеспечивает независимость управления в вертикальной и горизонтальной плоскости. В силу несимметрии корпуса с выступающими частями относительно плоскости ватерлинии максимальной ширины и, соответственно, пространственного характера гидродинамических сил при изменении курса, независимость управления в горизонтальной плоскости от вертикальной плоскости несколько нарушается. Тем не менее, выбор площади горизонтальных и вертикальных стабилизаторов и рудей крестообразного оперения принято производить независимо друг от друга.

Для получения нормальной управляемости критерий динамической устойчивости принято обеспечивать на следующем уровне:

- в вертикальной плоскости — больше 1,0,
- в горизонтальной плоскости — около 1,0.

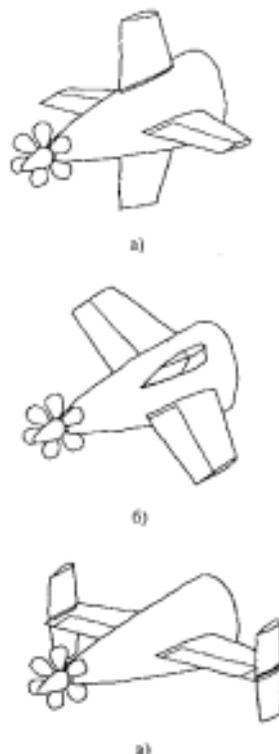


Рис. 11.1. Типовые формы кормового оперения
а) Крестообразное кормовое оперение. б) Х-образное кормовое оперение.
а) И-образное кормовое оперение.

Таким образом, в вертикальной плоскости ПЛ динамически устойчива, а в горизонтальной — динамически нейтральна.

Указанные критерии могут быть получены при относительных площадях кормового оперения $S_{cr} / V_{cr}^{2,0}$

- горизонтальных стабилизаторов — 0,12—0,16,
- вертикальных стабилизаторов — 0,075—0,110.

При этом удлинение стабилизатора, равное отношению квадрата максимального размах стабилизаторов на один борт к его площади изменяется в пределах 0,8—1,5.

Необходимо помнить, что выход кормовых горизонтальных стабилизаторов за полное сечение корпуса ПЛ, повышая эффективность, создает значительные трудности при эксплуатации корабля, так как требует особо осторожных действий при швартовке. Поэтому для сохранения эффективности стабилизаторов при уменьшенном их размахе иногда применяются так называемые шайбы, устанавливаемые на их торцах. Такая конструкция оперения была применена на подводной лодке II поколения проекта 641Б.

X-образное оперение можно представить, как крестообразное оперение, повернутое вокруг оси корпуса на 45° . Такое оперение применяется на ряде шведских, голландских, австралийских и немецких дизель-электрических ПЛ.

При X-образной схеме силы, возникающие на всех четырех стабилизаторах и рулях, имеют составляющие как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. При управлении одной парой рулей эти составляющие принуждают ПЛ входить в пространственное движение. В таком случае для обеспечения маневра в одной плоскости, т.е. перевода только по курсу или только по глубине, требуются одновременное управление сразу обоими парами рулей. Поэтому площади их попарно должны быть равны. На практике все четыре пары выполняются одинаковой площади. И так как все четыре пары одновременно работают в каждой из плоскостей движения ПЛ, их площадь, так же как и площадь стабилизаторов, может быть уменьшена по сравнению с крестообразным примерно на 25%. Выполнение всех четырех рулей, а следовательно и стабилизаторов одинаковыми приводит к тому, что обеспечение требуемой величины устойчивости в одной из плоскостей, например, в вертикальной, влечет излишнюю устойчивость в горизонтальной плоскости. В противном случае при ориентации на уровень устойчивости, применяя для го-

ризонтиальной плоскости, устойчивость ПЛ в вертикальной плоскости будет совершенно недостаточной.

Возникновение на рулях X-образного оперения пространственных сил, действующих составляющие в горизонтальной и вертикальной плоскостях, осложняет управление ПЛ. Поэтому при X-образной схеме оперения управление ПЛ практически возможно только в автоматическом режиме и выход из строя одной пары рулей может привести к серьезной аварии, особенно при движении на больших скоростях хода. По-видимому, по этой причине X-образная схема оперения нашла применение только на дизель-электрических ПЛ, имеющих сравнительно высокую скорость подводного хода.

H-образное оперение отличается тем, что вертикальные рули располагаются по торцам горизонтальных стабилизаторов. Оперение подобного типа применялось на германских ПЛ проекта 201 и представляется перспективным для ПЛ с полной кормовой оконечностью.

Гидродинамические условия работы крестообразного и H-образного оперения можно считать идентичными. Однако, последняя схема является конструктивно более сложной. Кроме того, затенение вертикального оперения корпусом может приводить к некоторому снижению его эффективности.

Управляемость ПЛ обеспечивается подвижными органами — рулями: кормовыми вертикальными и горизонтальными, а также носовыми (или рубочными) горизонтальными.

Вертикальные рули могут быть выполнены в виде закрылков стабилизаторов или в виде изолированных рулей. Первая схема является предпочтительней с точки зрения гидродинамической эффективности, т.е. при этом рули работают совместно со стабилизаторами, что повышает их эффективность в 1,3—1,5 раза. При второй схеме эффективность рулей ниже, но отказ от вертикальных стабилизаторов позволяет снизить степень устойчивости в горизонтальной плоскости, которая в ряде случаев оказывается избыточной.

Площадь вертикальных рулей определяется заданным минимальным диаметром циркуляции в подводном положении. Обычно относительная величина площади рулей $S_{gr} / V_{gr}^{2,0}$ на многоцелевых ПЛ составляет:

- ок. 0,050 для рулей-закрылков вертикальных стабилизаторов;
- ок. 0,075 для изолированных рулей.

Желательно, чтобы нижнее вертикальное оперение не выходило за плоскость килей ПЛ, так как в противном случае появляются трудности при постановке в док, а также при базировании с ограниченной глубиной упира.

Кормовые горизонтальные рули, как правило, выполняются в виде закрылков горизонтальных стабилизаторов, которые должны обеспечивать существенно более высокую устойчивость движения в вертикальной плоскости. Площадь кормовых горизонтальных рулей выбирается так, чтобы при переходе по глубине с дифферентом 15—25° обеспечить требуемую вертикальную скорость, которая может достигать 4 м/с. При этом относительная площадь горизонтальных рулей $S_{кр} / V_{кр}^{2,0}$ составляет около 0,05.

Обесценностью кормовых горизонтальных рулей является наличие инверсионной скорости, то есть такой скорости, при которой перекладка рулей не вызывает изменения траектории ПЛ. Как правило, инверсионная скорость возникает в диапазоне малых скоростей хода ПЛ (менее 3 узлов). На скорости хода ниже инверсионной ПЛ имеет обратную управляемость. Наличие инверсионной скорости у кормовых горизонтальных рулей определяет необходимость установки второй пары горизонтальных рулей, которая должна располагаться в нос от центра гидродинамического давления, что обеспечивает при управлении этими рулями отсутствие инверсионной скорости и управление ПЛ на малых ходах. [72]

Кроме того, в силу своего расположения в нос от центра давления, носовые рули создают дифференцирующий момент противоположного знака по сравнению с кормовыми горизонтальными рулями и в паре с ними позволяют выполнять бездифференциальные переходы по глубине.

Практика показывает, что относительная площадь носовых горизонтальных рулей $S_{кр} / V_{кр}^{2,0}$ составляет 0,03—0,04.

Носовые горизонтальные рули могут быть смещены к шкелю и располагаться у основания ОБУ. В этом случае они называются средними. Могут устанавливаться на ограждении ОБУ (преимущественно крыловидного типа), тогда они являются стационарными (неубирающимися в корпус), и их принято называть рубочными рулями.

Как средние, так и рубочные рули применяют для уменьшения их влияния, особенно при перекладке, на работу носовой ГАК.

Стационарные рубочные рули увеличивают сопротивление движению ПЛ. Кроме того, находясь на ограждении рубки, они располагаются гораздо ближе к центру давления и имеют меньшее плечо по длине, чем носовые. Поэтому для получения равного дифференцирующего момента их площадь должна быть в 1,5—2,0 раза больше, чем у носовых рулей. С позиций гидродинамики носовые рули более эффективны, чем рубочные. Предпочтительность носовых рулей подтверждается как опытом российского подлодного кораблестроения, так, по видимому, и опытом ВМС США, которые отказались от применения рубочных рулей на последней улучшенной серии многоцелевых ПЛ типа "Лос-Анжелес" и ПЛ нового поколения "Синукл" и вновь вернулись к схеме носовых горизонтальных рулей. Эти примеры говорят о необходимости дальнейшего исследования этого вопроса с учетом всех аспектов выбора места расположения НГР[50].

Конструктивно каждая пара горизонтальных рулей может иметь неразрезной или разрезной баллер. В последнем случае рули правого и левого борта можно переключать на разные углы, один на всплытие, другой на погружение. Это может оказаться полезным в особых случаях управления ПЛ, например, для ликвидации крена. В отдельных случаях на ПЛ устанавливают две пары кормовых горизонтальных рулей — большие (БКР) и малые (МКР) (Рис. 11.2). Малые рули используют на больших скоростях хода, что значительно упрощает управление кораблем.



Рис. 11.2 Кормовое горизонтальное оперение ПЛ

В заключение отметим, что все рули на ПЛ до недавнего времени, проектировались балансирующего типа с коэффициентом компенсации $K_n = 0,25—0,30$. В последнее время стремятся уменьшить зна-

чение коэффициента компенсации (особенно для горизонтальных рулей). Это объясняется в основном стремлением снизить гидродинамическую составляющую шумности при переключке таких рулей, а также улучшить условия борьбы за живучесть корабля в аварийных ситуациях.

11.2. Определение гидродинамических характеристик комплекса корпус — оперение

Все оперение ПЛ рассматривается при проектировании как крыло малого удлинения. Поэтому на начальных стадиях разработки проекта для определения гидродинамических характеристик элементов оперения используется теория крыльев малого удлинения. Если какой-либо элемент оперения имеет трапециевидную форму, он заменяется при расчете эквивалентным крылом прямоугольной формы, равной площади (S_1) и удлинения ℓ_1 (Рис.11.3).

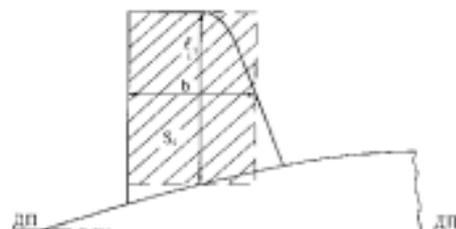


Рис.11.3. Эквивалентное крыло.

Относительные удлинения элементов оперения ПЛ $\lambda_1 = \frac{\ell_1^2}{S_1}$

для прямоугольного крыла $\lambda_1 = \frac{\ell_1}{b_1}$,

где b_1 — хорда крыла, обычно не превышает величину 2,0—2,5. Вообще говоря, сам корпус ПЛ также можно рассматривать как крыло малого удлинения ($\lambda_c \approx 0,1$).

Для решения задачи проектирования оперения ПЛ необходимо учесть расчетным путем, до проведения модельных испытаний, опре-

делять гидродинамические характеристики комплекса корпус — оперение при рабочих углах гребных винтов.

Эта задача весьма сложна, и решить ее строго на ранних стадиях трудно, поэтому используются приближенные методы и определенные допущения.

Во-первых, при выборе оперения ПЛ на ранних стадиях проектирования гидродинамические характеристики комплекса определяются без учета работы гребных винтов.

Во-вторых, выбор оперения производится из рассмотрения только плоского движения в вертикальной и горизонтальной плоскостях отдельно. Пространственное движение на этом этапе проектирования не рассматривается. Это существенно упрощает определение гидродинамических характеристик разрабатываемого комплекса, так как они будут функцией только одного угла — угла атаки — α или угла дрейфа — β .

Все гидродинамические характеристики рассматриваемого движения комплекса — поступательные и вращательные условно определяются методом суммирования по элементам расчетным или как часто говорят сухим методом. Это значит, что любой гидродинамический коэффициент комплекса C_i представляется как сумма этого коэффициента для корпуса, носовых рулей, кормовых рулей и т. д. Таким образом, для любого гидродинамического коэффициента можно записать выражение

$$C_i(\alpha) = \sum C_{i_k}(\alpha) = C_{i_k}(\alpha) + C_{i_{nr}}(\alpha) + C_{i_{kr}}(\alpha). \quad (11.1)$$

Далее при выборе оперения ПЛ и решения других вопросов управляемости на ранних стадиях проектирования все гидродинамические коэффициенты линеаризуют, то есть представляют в виде

$$C_{i_k}(\alpha) = C_{i_k}^* \alpha, \quad (11.2)$$

где $C_{i_k}^*$ — производная коэффициента C_i по углу атаки α , представляющая тангенс угла наклона касательной к кривой $C_i(\alpha)$ (Рис.11.4).

Тогда для любого гидродинамического коэффициента можно записать следующее выражение:

$$C_i(\alpha) = \sum C_{i_k}^* \alpha = C_{i_k}^* \alpha + C_{i_{nr}}^* \alpha + \dots + C_{i_{kr}}^* \alpha. \quad (11.3)$$

Аналогичные выражения можно записать и для гидродинамических коэффициентов, зависящих от угла дрейфа.

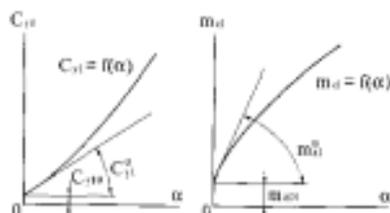


Рис. 11.4. Гидродинамические характеристики оперения

Гидродинамические коэффициенты оперения

Как указывалось выше все элементы оперения ПЛ можно рассматривать как крылья малого удлинения.

Рассмотрим сначала какой-либо элемент оперения ПЛ отдельно от корпуса, то есть как изолированное крыло. Для изолированного крыла малого удлинения и известного относительного удлинения λ можно рассчитать производную нормальной силы крыла по углу атаки α . Как правило, для этой цели используют формулу Г. Ф. Бураго, согласно которой

$$C_{y1\alpha}^* = k(C_{y1}^*)_{\infty} \cdot \frac{2,75\lambda}{2,75\lambda + (C_{y1}^*)_{\infty}} \bar{S}, \quad (11.4)$$

где $k = 0,92$ — коэффициент К. К. Фельдсака, учитывающий телесность крыла;

$(C_{y1}^*)_{\infty} = 5,6$ — производная нормальной силы по углу атаки при бесконечном размахе крыла;

$\bar{S} = S / V_{\infty}^{2\beta}$ — относительная площадь крыла;

V_{∞} — полное подводное водонизменение ПЛ.

Если из (11.4) исключить множители \bar{S} , то получится производная, отнесенная к собственной площади крыла S . При постоянной площади крыла в выражении (11.4) останется только одна переменная λ .

$$(C_{y1}^*)_{\lambda\alpha} = A,25. \quad (11.5)$$

Из полученного выражения видно, что при данной площади крыла его эффективность по нормальной силе с увеличением удлинения λ возрастает, то есть C_{y1}^* с ростом λ растет (Рис. 11.5)

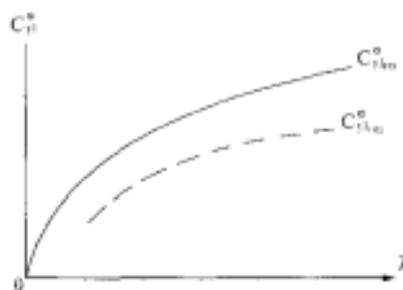


Рис. 11.5. Зависимость C_{y1}^* от относительного удлинения крыла λ .

Следовательно, при проектировании оперения ПЛ и выборе его элементов целесообразно увеличивать размах оперения, но с учетом эксплуатационных требований.

В месте прилегания крыла к корпусу изменяются условия обтекания, как крыла, так и корпуса. Часть крыла попадает в пограничный слой корпуса, соответственно поток, обтекающий корпус, искажает поток на крыле и меняет на теле углы атаки. Корпус в месте установки оперения работает как стенка, что изменяет величину относительного удлинения крыла. Установка крыла меняет эмпор распределения давления на корпусе и т. д. Все перечисленное приводит к тому, что изменяются гидродинамические характеристики, как крыла, так и корпуса. Чтобы упростить данное явление, условно все изменения в гидродинамических характеристиках отнесем к оперению, считая, что для корпуса они не изменяются.

Взаимное влияние учитывается путем введения в гидродинамические характеристики изолированного крыла, представляющего данный элемент оперения, коэффициента взаимного влияния. Так выражение для производной нормальной силы C_{y1} по углу атаки

$\alpha - C_{\gamma 1}^{\alpha}$, для крыла (элемента оперения) на корпусе будут определяться по формуле:

$$C_{\gamma 10}^{\alpha} = \mu_1 (C_{\gamma 10}^{\alpha} \lambda_{10}), \quad (11.6)$$

где μ_1 — коэффициент взаимного влияния.

Следует обратить особое внимание на то обстоятельство, что численные значения μ_1 корпуса ПЛ и элементов оперения различны для разных элементов оперения и для разных гидродинамических коэффициентов (силы, моменты, поступательные и вращательные). Они различны также и для разных форм обводов легкого корпуса — штевневых и дюркабельных. Численные значения коэффициентов влияния могут быть как меньше, так и больше единицы.

К сожалению, значения этих коэффициентов определить аналитически не представляется возможным. Они определяются только экспериментально в аэродинамических трубах.

В настоящее время накоплен достаточно большой экспериментальный материал по коэффициентам взаимного влияния для различных корпусов ПЛ, видов оперения и гидродинамическим характеристикам. [72]

Как указывалось ранее для проектирования оперения ПЛ нужно уметь определять расчетным путем поступательные и вращательные гидродинамические коэффициенты, а также их поступательные и вращательные производные.

Так для выбора элементов горизонтального оперения ПЛ нужно определить для каждого из них $C_{\gamma 1}^{\alpha}$; m_{α}^{α} ; m_{α}^{ω} и $C_{\gamma 1}^{\omega}$.

На ранних стадиях проектирования принято эти производные выражать через производные нормальной силы $C_{\gamma 1}^{\alpha}$. На рис. 11.6 представлен один из элементов оперения — кормовые горизонтальные рули (КГР). Если обозначать их площадь (на оба борта) $S_{\text{КГР}}$, относительное удлинение $\lambda_{\text{КГР}}$, плечо от центра величины полного подводного водоизмещения до оси баллера — $\bar{\ell}_{\text{КГР}}$, то с учетом коэффициента взаимного влияния искомые величины представляются в следующем виде:

$$\begin{aligned} C_{\gamma 10}^{\alpha} &= \mu_1 (C_{\gamma 10}^{\alpha} \lambda_{10}) + \mu_1 A(\lambda_{\text{КГР}}) \bar{S}_{\text{КГР}} \\ m_{\alpha}^{\alpha} &= \mu_1 (m_{\alpha}^{\alpha} \lambda_{10}) + \mu_1 A(\lambda_{\text{КГР}}) \bar{S}_{\text{КГР}} \bar{\ell}_{\text{КГР}} \\ C_{\gamma 10}^{\omega} &= -\mu_1 \bar{\ell}_{\text{КГР}} (C_{\gamma 10}^{\alpha} \lambda_{10}) + -\mu_1 \bar{\ell}_{\text{КГР}} A(\lambda_{\text{КГР}}) \bar{S}_{\text{КГР}} \\ m_{\alpha}^{\omega} &= \mu_1 (m_{\alpha}^{\omega} \lambda_{10}) + \mu_1 (C_{\gamma 10}^{\alpha} \lambda_{10}) \bar{\ell}_{\text{КГР}}^2 = \\ &= \mu_1 \bar{\ell}_{\text{КГР}} A(\lambda_{\text{КГР}}) \bar{S}_{\text{КГР}} \end{aligned} \quad (11.7)$$

Дополнительно к приведенным выше обозначениям $\bar{\ell}_{\text{КГР}} = \ell_{\text{КГР}} / V^{(1)}$ — относительное плечо КГР.

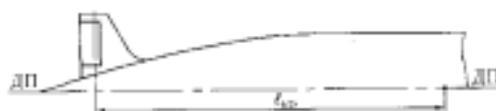


Рис. 11.6. Кормовой горизонтальный руль ПЛ

Производные сил и моментов рулей по углам их перекачки (5) определяются исходя из допущения $C_{\gamma 1}^{\alpha} = C_{\gamma 1}^{\alpha}$, что, строго говоря, не совсем правильно, но соответствует точности остальных допущений.

$$\begin{aligned} C_{\gamma 10}^{\dot{\alpha}} &= \xi_1 (C_{\gamma 10}^{\alpha} \lambda_{10}) = \xi_1 A(\lambda_{\text{КГР}}) \bar{S}_{\text{КГР}} \\ m_{\alpha}^{\dot{\alpha}} &= \xi_2 (C_{\gamma 10}^{\alpha} \lambda_{10}) \bar{\ell}_{\text{КГР}} = \xi_2 A(\lambda_{\text{КГР}}) (\lambda_{\text{КГР}}) \bar{S}_{\text{КГР}} \end{aligned} \quad (11.8)$$

где ξ_1 и ξ_2 — коэффициенты взаимного влияния корпуса и КГР при их перекачке.

Гидродинамические коэффициенты голого корпуса

При решении задачи проектирования оперения ПЛ для каждой плоскости — вертикальной и горизонтальной необходимо знать четыре производные — две поступательные и две вращательные. Так при рассмотрении движения в вертикальной плоскости необходимы производные $C_{\gamma 10}^{\alpha}$; m_{α}^{α} и $C_{\gamma 10}^{\omega}$; m_{α}^{ω} .

Поступательные и вращательные производные голого корпуса можно определить двумя путями — расчетным и экспериментальным.

При использовании расчетных методов корпус ПЛ рассматривается как крыло предельно малого размера и по предложению К. К. Федосеевского заменяется П-образным вихрем эквивалентным трехосному эллипсоиду. При этом, для удобства расчета необходимых коэффициентов присоединенных масс, считается, что корпус по форме эквивалентен трехосному эллипсоиду [83].

В настоящее время накоплен большой экспериментальный материал по гидродинамическим характеристикам корпусов ПЛ двух типов — штевенных и тел вращения, имеющих различные удлинения и овалность.

Это дает возможность подобрать корпус по характеру обводов и по геометрическим параметрам близкий к проектируемому.

Однако, трудно представить, что удастся найти полностью подобную модель.

Как правило, подбирается наиболее близкая модель корпуса данного типа и, используя ее гидродинамические характеристики производится их пересчет на проектируемый корпус. Так формула пересчета для $C_{\gamma_{1x}}^0$ имеет вид

$$C_{\gamma_{1x}}^0 = X_1 X_2 X_3 X_4 (C_{\gamma_{1x}}^0)_0 \quad (11.9)$$

где $(C_{\gamma_{1x}}^0)_0$ — значение производной, выбранной модели прототипа,

X_1 — коэффициент, учитывающий влияние изменения отношения L/B у проекта,

X_2 — коэффициент, учитывающий изменения H/B и т. д.

Численные значения коэффициентов влияния параметров формы корпуса на данный гидродинамический коэффициент определяется по графикм вида (Рис. 11.7), построенным по результатам серийных испытаний, приведенных в атласах и технических отчетах. Аналогично производится пересчет и остальных гидродинамических характеристик. Отметим, что полученные таким образом производные гидродинамических коэффициентов корпуса ПЛ отнесены к объему голого корпуса $V_{гк}$ в соответствующей степени.

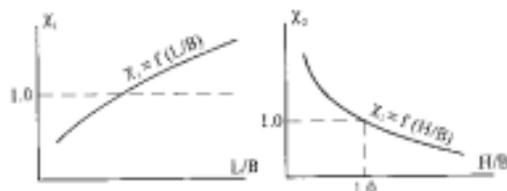


Рис. 11.7. Коэффициенты влияния параметров корпуса

Для дальнейших же расчетов потребуются производные, отнесенные к полному подводному водоизмещению $V_{\text{пл}}$, что производится к необходимости их пересчета. Это делается путем умножения производных на отношение $V_{гк} / V_{\text{пл}}$ в соответствующей степени.

После получения производных гидродинамических сил для голого корпуса необходимо рассмотреть и изменения, вносимые установкой ограждения выдвигаемых устройств. Ограждение само по себе вносит изменение во все гидродинамические характеристики, а также перераспределяет давление на корпусе и меняет характеристики последнего. Оба эти фактора принято учитывать введением поправок $(\Delta C_{\gamma_{1x}}^0; \Delta m_{\gamma_{1x}}^0; \Delta m_{\gamma_{1y}}^0; \Delta C_{\gamma_{1z}}^0)$ — рассчитываются по зависимостям, полученным на базе серийных испытаний.

Величина поправок зависит от геометрических параметров ограждения выдвигаемых устройств и корпуса, а также их взаимного расположения.

Таким образом, для корпуса с учетом ограждения выдвигаемых устройств поступательные и вращательные производные геометрических сил выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} C_{\gamma_{1x}}^0 &= C_{\gamma_{1x}}^0 + \Delta C_{\gamma_{1x}}^0, \\ m_{\gamma_{1x}}^0 &= m_{\gamma_{1x}}^0 + \Delta m_{\gamma_{1x}}^0. \end{aligned} \quad (11.10)$$

11.3. Критерии, используемые при проектировании оперения

Задача проектирования оперения ПЛ, как указывалось, состоит в том, чтобы проработать все оперение, то есть его неподвижную и подвижную часть. Как известно, на ПЛ второй мировой войны как на отечественных, так и на иностранных, стабилизаторов не было и все

оперение состояло из рулей. В стабилизаторах не было необходимости ввиду малых скоростей хода. Площади рулей определялись по ПЛ прототипу, обладающему хорошими маневренными качествами. Так площадь вертикального руля выполнялась как

$$S_{\text{вр}} = k_1 L H.$$

Площадь кормовых горизонтальных рулей $S_{\text{гвр}}$ определялась по аналогичной зависимости

$$S_{\text{гвр}} = k_2 L B,$$

где k_1, k_2 — коэффициенты, принимаемые по прототипу.

L, B, H — главные размеры корпуса.

Такой метод определения площадей рулей следует признать весьма ненадежным по ряду причин.

Во-первых, произведения LH и LH совершенно не определяют форму корпуса ПЛ, а следовательно и его гидродинамические характеристики. Во-вторых, разные ПЛ в зависимости от их назначения должны обладать различными характеристиками устойчивости движения и маневренности, что как-то должно учитываться коэффициентами k_1 и k_2 . Естественно, что сейчас такие расчеты площадей рулей не применяются.

В настоящее время на начальных стадиях проектирования оперения ПЛ используются критерии устойчивости горизонтального установившегося движения и маневренности в установившемся движении. Рассмотрение установившихся режимов значительно упрощает задачу. В качестве критериев устойчивости используются два критерия: — степень статической неустойчивости — \bar{b} или \bar{b}_z и критерий динамической устойчивости — k . Напомним, что указанные критерии устойчивости ПЛ выражаются через гидродинамические характеристики корабля следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{b} &= \frac{b}{V^{3/2}} = \frac{m_{\text{ст}}^0}{C_{S1}^0}, \\ \bar{b}_z &= \frac{b}{L} = \bar{b} \frac{1}{L/V^{3/2}} = \frac{m_{\text{ст}}^0}{C_{S1}^0} \frac{1}{L/V^{3/2}}, \end{aligned} \quad (11.11)$$

$$k = \frac{\bar{b}^0}{\bar{b}} = \frac{\frac{|m_{\text{ст}}^0|}{2(1+k_{11})} - C_{S1}^0}{\frac{m_{\text{ст}}^0}{C_{S1}^0}} \quad (11.12)$$

где k_{11} — коэффициент присоединенной массы при движении по оси OX_1 .

В приведенных формулах все производные гидродинамических коэффициентов относятся ко всему движущемуся гидродинамическому комплексу — корпус—оперение выдвинутых устройств—оперение.

Критерий статической устойчивости \bar{b} или \bar{b}_z представляют собой относительное плечо равнодействующих гидродинамических сил, действующих на ПЛ в установившемся равномерном движении (рис. 11.8), отсчитываемое от начала координат, принятого в центре масс палубного водоземца. На всех ПЛ точка приложения равнодействующей R располагается в нос от начала координат. Это означает, что все ПЛ в установившемся режиме являются статически неустойчивыми, и сила R не восстанавливает, а опрокидывает корабль. Именно поэтому и производится выбор и установка кормового оперения.

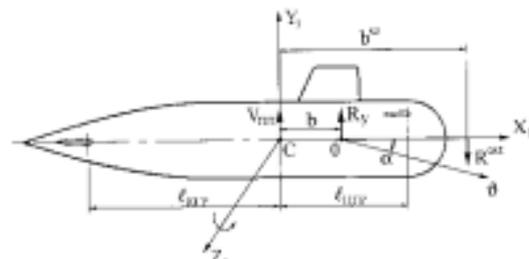


Рис. 11.8. Силы, действующие на подводную лодку

Таким образом, критерий \bar{b} выражает степень статической неустойчивости в виде плеча, отнесенного к $V^{1/2}$ или L .

Критерий динамической устойчивости k , согласно зависимости (11.12), представляет собой безразмерную величину, выражающую отношение приведенного плеча сил демпфирования \bar{b} к плечу равнодействующей гидродинамических сил $R = \bar{b}$. Это отношение у ПЛ при движении в вертикальной плоскости всегда положительно и таким образом, если $k > 1$, она будет в этой плоскости динамически устойчивым. Критерии \bar{b} и k используются для выбора суммарной площади оперения — подкивного и неподвижного, так как и то и другое влияют на устойчивость движения ПЛ.

Для выбора подкивной части оперения рулей используют критерий маневренности. Одним из таких критериев, наиболее простых и потому используемых на ранних стадиях проектирования является критерий скороподъемности установившегося прямолинейного движения. Для движения в вертикальной плоскости, а следовательно, для выбора горизонтального подкивного оперения (КП и НГР) этот критерий выражается следующей зависимостью:

$$\frac{\partial \delta_{\text{вк}}}{\partial \delta_{\text{мк}}} = \frac{\partial^2}{2gh} \cdot C_{\text{н}}^{\text{вк}} \left(\frac{m_{\text{вк}}^0}{C_{\text{н}}^{\text{вк}}} - \frac{m_{\text{мк}}^0}{C_{\text{н}}^{\text{мк}}} \right) \quad (11.13)$$

или

$$\frac{\partial \delta_{\text{вк}}}{\partial \delta_{\text{мк}}} = \frac{\partial^2}{2gh} \cdot C_{\text{н}}^{\text{вк}} (\bar{\ell}_{\text{вк}} - \bar{b}). \quad (11.14)$$

Здесь дополнительно к используемым выше обозначениям:

$\delta_{\text{вк}}$ — вертикальная составляющая скорости движения ПЛ;

$\delta_{\text{мк}}$ — угол перекладки рулей (носовых или кормовых);

$\bar{\ell}_{\text{вк}} = \ell_{\text{вк}} / V^{1/2}$ — относительное плечо рулей от начала координат;

\bar{b} — начальная метацентрическая высота, отнесенная к полному подводному водоизмещению и квадрату скорости хода.

Критерий скороподъемности можно представить физически как вертикальную скорость перемещения центра тяжести ПЛ в установившемся режиме прямолинейного движения в вертикальной плоскости при перекладке рассматриваемых горизонтальных рулей на один градус.

Из (11.13) и (11.14) следует, что критерий скороподъемности сильно зависит от скорости хода ПЛ. Численные значения приведенных критериев устойчивости движения и маневренности у ПЛ различного назначения критериев нормируются в ТТЗ на проектирование. Так степень статической неустойчивости, определяемая отношением плеча горизонтальной силы к длине корпуса ПЛ — L обычно лежит в пределах $\bar{b}_L = \frac{b}{L} = 0,15 - 0,25$, но не более 0,35.

Естественно, что чем меньше величина \bar{b}_L , тем больше должна быть площадь кормового оперения.

Коэффициент динамической устойчивости у действующих ПЛ лежит в пределах $k=2,0-4,0$.

Чем больше значение k , тем больше динамическая устойчивость движения ПЛ.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что критерии устойчивости \bar{b} и k связаны между собой определенным образом. Это видно из выражения (10.12).

Критерии скороподъемности $\frac{\partial \delta_{\text{вк}}}{\partial \delta_{\text{мк}}}$ для носовых и кормовых рулей ПЛ при проектировании нормируются для определенной скорости хода ($\delta_{\text{вк}}=10$ узл.). Как правило, для этой скорости при перекладке рулей на 1 градус для кормовых рулей $\frac{\partial \delta_{\text{вк}}}{\partial \delta_{\text{мк}}} \geq 0,03 \text{ м/сек.}$, а для носовых рулей $\frac{\partial \delta_{\text{вк}}}{\partial \delta_{\text{мк}}} \geq 0,08 \text{ м/сек.}$

Обращает на себя внимание тот факт, что скороподъемность ПЛ при управлении кормовыми рулями значительно выше, чем при управлении носовыми рулями.

Аналогично изложенным выше критериям устойчивости движения и маневренности ПЛ при движении в вертикальной плоскости могут быть представлены подобные критерии и для движения в горизонтальной плоскости. Однако эти критерии будут отличаться от приведенных как по форме, так и по содержанию. При движении в горизонтальной плоскости отсутствует восстанавливающий момент. Он представлен в вертикальной плоскости метацентрической высотой, и потому в горизонтальной плоскости нет понятия статической

устойчивости. Для горизонтальной плоскости употребляется лишь критерий динамической устойчивости. Нет для горизонтальной плоскости и понятия свроподъемности, так как при перекачке вертикального руля на любой угол ПЛ будет совершать циркуляцию. Поэтому маневренность ПЛ при движении в горизонтальной плоскости оценивается зависимостью диаметра циркуляции D_u от угла перекачки вертикального руля

$$D_u = f(\delta_{\text{вр}}).$$

Требования к динамической устойчивости движения в горизонтальной плоскости гораздо ниже, чем в вертикальной и обычно $k_r \approx 1.0$. Маневренность в горизонтальной плоскости обычно нормируется относительным диаметром установившейся циркуляции D_u/L , где L — длина ПЛ, при максимальной перекачке вертикального руля. Величина D_u/L изменяется в пределах 3—6 и зависит от назначения ПЛ [83].

Принято также нормировать угол крена на установившейся ширкуляции при предельной перекачке вертикального руля для определенной скорости хода.

11.4. Методы, применяемые при проектировании оперения подводной лодки

Задача проектирования оперения ПЛ сводится к решению ряда вопросов, определяющих управляемость корабля. Сюда входит выбор комплекса оперения, обеспечивающего выполнение всех требований, предъявляемых к управляемости проектируемой ПЛ, размещение элементов этого комплекса на корабле, выбор площадей каждого из элементов и т. д. Задача эта содержит много неизвестных и потому решить ее чисто аналитическим путем представляется невозможным.

На начальных стадиях проектирования ПЛ существует два метода проектирования оперения. Первый путь состоит в том, что проектирование ориентируется на подобные корабли и статистические данные, задается конструктивной схемой оперения и всеми его элементами. Для принятого состава оперения производится расчет критериев устойчивости и маневренности. Полученные значения критериев сравниваются с нормативными. Если полученные критерии не удовлетворяют требованиям, то в оперение вносятся изменения и

снова проверяются критерии. По сути дела данный метод — метод последовательных приближений.

Второй метод — по существу представляет собой расчетный способ, хотя и не совсем в чистом виде. В данном случае проектирование задается конструктивной схемой оперения и численными значениями критериев устойчивости и маневренности. Затем, принимая часть элементов оперения известными (например, относительное удлинение, плечи оперения по длине), определяют расчетом площади основных элементов оперения. Здесь уже не требуется последовательных приближений, так как вместе возможность в ходе расчета варьировать отдельные параметры — плечи $\bar{\ell}_i$, относительные удлинения λ_i и т. д.

Ниже изложим второй метод, так как за основу его рассмотрения станет всяком, как необходимо действовать и решать задачу первым методом. Кроме того, второй метод, на наш взгляд, дает возможность выявить влияние каждого конструктивного элемента.

Прежде всего, необходимо задаться конструктивной схемой оперения. Это значит, что нужно определиться с составом и ориентировочным местом расположения отдельных элементов оперения.

В настоящее время в практике проектирования ПЛ уже отработаны конструктивные схемы оперения для однозальных и двухзальных кораблей. В качестве примера некоторые из таких схем приведены на рис. 11.9, 11.10 и 11.11.

Видно, что при однозальной энергетической установке кормовое оперение располагается крестообразно, а рули обычно представляют собой закрылки стабилизаторов. С точки зрения повышения эффективности элементов оперения, их целесообразно относить дальше в оконечности, так как при этом увеличивается плечо оперения ℓ_i и, следовательно, увеличивается создаваемый им момент оперения. Помимо этого при выборе конструктивной схемы необходимо установить ряд других важных факторов, например, взаимное расположение кормового оперения и винта. Чем дальше оперение от винта, тем меньше неравномерность потока в диске винта и меньше шум. Важно также учитывать возможность расположения приводов рулей, а также возможность выхода оперения за габариты корпуса (например, по ширине и по высоте, что нежелательно).

В качестве примера рассмотрим проектирование горизонтально-го оперения однозальной подводной лодки.

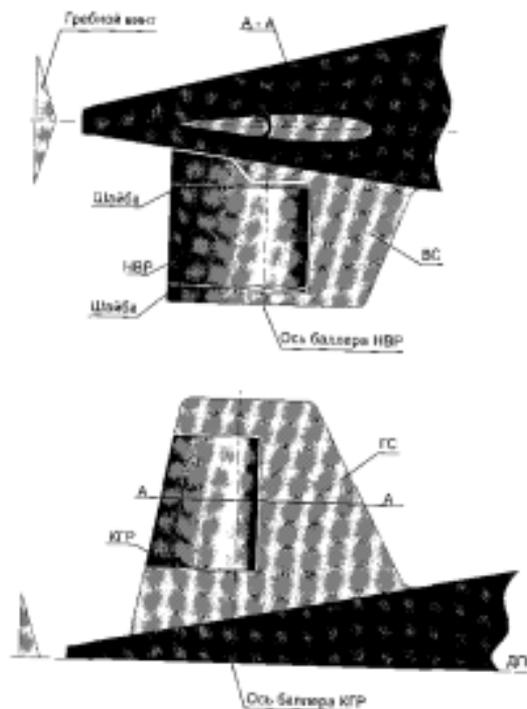


Рис. 11.9. Конструктивная схема кормового оперения однодвухной подводной лодки

ВС — вертикальный стабилизатор. НВР — нижний вертикальный руль.
 ГС — горизонтальный стабилизатор. КПР — кормовой горизонтальный руль.

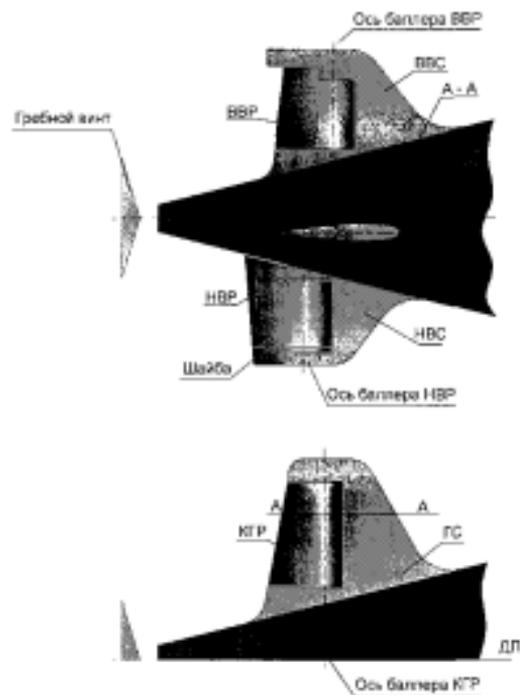


Рис. 11.10. Вариант конструктивной схемы кормового оперения однодвухной подводной лодки

ВВС и НВС — верхний и нижний вертикальные стабилизаторы.
 ВВР — верхний вертикальный руль.

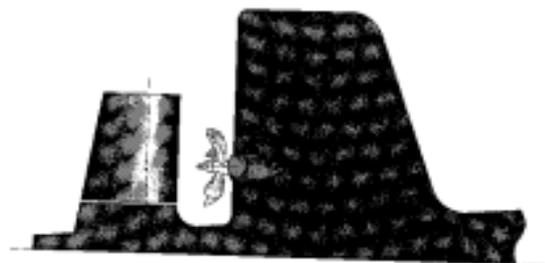


Рис. 11.11. Конструктивная схема оперения двухлопастной подводной лодки

Предположим, что горизонтальное оперение планируется в виде носовых рулей (убирающихся), кормовых стабилизаторов и рулей в виде их закрылков. Для всех этих элементов зададим плечом от начала координат $\ell_{\text{оп}}$, расположенного в центре величины полного подводного объема корабля и относительным удлинением $\lambda_{\text{оп}}$.

Далее для корпуса ПЛ методом, изложенным выше, рассчитываются производные гидродинамических характеристик — поступательные $C_{\text{пл}}^x$ и $m_{\text{пл}}^x$ и вращательные $C_{\text{пл}}^{\omega}$ и $m_{\text{пл}}^{\omega}$ с учетом обрешетки подводных устройств и пересчетом на полное подводное водоизмещение $V_{\text{пол}}$.

Затем, исходя из требований к проектируемой ПЛ, зададимся величиной коэффициента для относительного плеча статической неустойчивости \bar{b} или \bar{b}_x . Выразим относительное плечо \bar{b} через производные и представим их из слагаемых корпуса и оперения.

$$\bar{b} = \frac{m_{\text{оп}}^x}{C_{\text{пл}}^x} = \frac{m_{\text{пл}}^x + m_{\text{оп}}^x}{C_{\text{пл}}^x + C_{\text{оп}}^x} \quad (11.15)$$

Сначала рассчитаем величину \bar{b} для больших скоростей хода ПЛ, то есть при убравших носовых горизонтальных рулях. При выбранной конструктивной схеме горизонтальные стабилизаторы и

кормовые рули при расчете \bar{b} можно рассматривать как одно крыло с удлинением $\lambda_{\text{оп}}$ и относительным плечом $\ell_{\text{оп}}$.

Используя зависимости 11.7, можно записать:

$$\bar{b} = \frac{m_{\text{оп}}^x + \xi A(\lambda_{\text{оп}}) \bar{S}_{\text{оп}} \bar{\ell}_{\text{оп}}}{C_{\text{пл}}^x + \mu_1 A(\lambda_{\text{оп}}) S_{\text{оп}}} \quad (11.16)$$

где ξ и μ_1 — коэффициенты взаимного кливирования оперения и корпуса для производных силы и момента.

В приведенной зависимости (11.16) одно неизвестное $\bar{S}_{\text{оп}}$. Таким образом, получим площадь кормового оперения $S_{\text{оп}}$ из условия удовлетворения \bar{b} и \bar{b}_x , так как

$$\bar{b}_x = \bar{b} \frac{1}{L/V^{0,75}} \quad (11.17)$$

По величине $S_{\text{оп}}$ и $\lambda_{\text{оп}}$ нормировывается кормовое оперение и находится его абсолютный размах. Далее для этого же режима движения можно определить величину коэффициента динамической устойчивости k . При этом все производные гидродинамических характеристик, входящие в формулу, представляются в виде слагаемых по элементам. Так, $C_{\text{пл}}^x$ и $m_{\text{пл}}^x$ представляются аналогично зависимости (11.10), а вращательные производные в виде, приведенном ниже.

$$\begin{aligned} C_{\text{пл}}^{\omega} &= C_{\text{пл}}^{\omega} + C_{\text{оп}}^{\omega} = C_{\text{пл}}^{\omega} + \mu_2 (A(\lambda_{\text{оп}}) \bar{S}_{\text{оп}}), \\ m_{\text{пл}}^{\omega} &= m_{\text{пл}}^{\omega} + m_{\text{оп}}^{\omega} = m_{\text{пл}}^{\omega} + \mu_2 A(\lambda_{\text{оп}}) \bar{\ell}_{\text{оп}}^2 \bar{S}_{\text{оп}}. \end{aligned} \quad (11.18)$$

Коэффициент приведенных масс при движении по оси $Ox_1 - k_{11}$ рассчитывается либо по эквивалентному голому корпусу трехлопастному эллипсоиду, или по методу плоских сечений. Полученная таким образом величина k сравнивается с требованиями. Если она удовлетворяет им, то можно продолжать расчет; нет — необходимо задать величину k и определить площадь стабилизаторов $\bar{S}_{\text{оп}}$, а по ней новое значение величины \bar{b} .

Затем можно определить необходимую площадь кормовых горизонтальных рулей.

Для этого зададим критерием скороподъемности при управлении кормовыми горизонтальными рулями (см. п.11.3). Входящие в эту зависимость производные представим аналогично изложенному выше, а производные сил и моментов по углу деформации руля (δ_{Σ}) запишем в виде:

$$\begin{aligned} C_{\Sigma}^{\delta} &= C_{\Sigma}^{\delta} = \xi(C_{\Sigma}^{\delta}) = \xi A(A_{\Sigma}) \bar{S}_{\Sigma}, \\ m_{\Sigma}^{\delta} &= C_{\Sigma}^{\delta} \cdot \bar{r}_{\Sigma} = \xi(m_{\Sigma}^{\delta}) = \xi \bar{r}_{\Sigma} A(A_{\Sigma}) \bar{S}_{\Sigma}. \end{aligned} \quad (11.19)$$

Из выражения $\frac{\partial \bar{S}_{\Sigma}}{\partial \delta_{\Sigma}}$, представленного в развернутом виде можно определить некую величину \bar{S}_{Σ} , а, следовательно, и S_{Σ} .

Таким образом выбирается кормовое оперение ПЛ исходя из устойчивости и маневренности — S_{Σ} , и S_{Σ} , так как $S_{\Sigma} = S_{\Sigma} - S_{\Sigma}$.

По заданному значению λ_{Σ} можно прорисовать их на эскизе кормового оперения.

Теперь необходимо решать вопрос о выборе носовых горизонтальных рулей. Зададимся площадью НГР — S_{Σ} и их относительным удлинением λ_{Σ} . Поскольку при движении ПЛ с выдвинутой НГР меняется устойчивость ее движения, необходимо пересчитать значения критериев b и k с учетом работы НГР. Делается это аналогично изложенному, только в выражение для производных гидродинамических характеристик входят слагаемые для НГР. Полученные значения b и k вновь сравниваются с требуемыми. Если они входят в допустимых пределах, то определяется критерий скороподъемности при управлении носовыми рулями. В случае, когда результат расчета не удовлетворяет требованиям, задачу решают во втором приближении, изменяя S_{Σ} .

Несмотря на относительную сложность изложенного выше метода проектирования оперения, при дальнейшей разработке проекта ПЛ, необходимо производить уточнения.

Для этого проводятся модельные испытания в аэродинамических трубах по углам атаки и дрейфа, при которых уточняются гидродинамические характеристики комплекса — корпус, оперение, ограждение выдвинутых устройств. Кроме них определяются также гидродинамические характеристики по углам деформации рулей в соответствующих плоскостях.

Производятся также испытания в кавитационных трубах и в опытовых бассейнах. Все перечисленным выше испытания позволяют

обнаружить недостатки в комплексе и дать рекомендации по их устранению.

В дальнейшем на базе материалов модельных испытаний и существующих методов расчета управляемость проектируемой ПЛ оценивается более точно. Для этого рассматривают переходные процессы движения в горизонтальной и вертикальной плоскости, а также пространственное маневрирование ПЛ.

По методикам теории корабля [72] учитывается также влияние работы гребных винтов на гидродинамические характеристики и на параметры устойчивости и маневренности ПЛ. Может также оцениваться изменение указанных выше характеристик управляемости при ходе на перископной глубине или вблизи дна моря. В этих случаях принято говорить об учете влияния свободной поверхности или твердой стенки.

Обводы всех составных частей оперения тщательно обрабатываются на теоретическом чертеже оперения ПЛ. При этом обращается особое внимание на сочетание элементов оперения и корпуса, а также эксплуатационные моменты, связанные с размещением оперения.

После выбора оперения естественно желание проектировщика сравнить полученные данные с таковыми у однотипных ПЛ.

Совершенно очевидно, что подобное сравнение необходимо производить не в абсолютных величинах, а в относительных. В качестве такого безразмерного параметра принята относительная площадь оперения (см. п.11.1).

12. ВОЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ЕГО РОЛЬ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК

12.1 Предмет военно-экономического анализа

В процессе проектирования подводных лодок, как и во многих других областях человеческой деятельности, проектиant постоянно стоит перед необходимостью выбора. Перед ним всегда возникает вопрос «Что лучше?». Дополнительные два узла скорости или 50 метров глубины погружения, десять суток автономности или 4 дополнительных торпеды. Он отсиживает худшие варианты, стремится найти наилучшее решение поставленной задачи. Опыт показывает, что выбрать лучший вариант, не учитывая ограничения, невозможно. Эти ограничения существуют всегда. К ним относятся массогабаритные ограничения (желая неограниченно увеличить водоизмещение без ущерба для корабля), производственные ограничения, определяемые заводом-строителем (габариты помещений мест), и конечно, ограничения экономического характера, к которым относятся ограничения на ресурсы, обуславливающие возможность создания и эксплуатации подводной лодки [12]. Ресурсы не обязательно носят финансовый характер, это могут быть материалы, производственные возможности промышленности и другие, но все выделенные на постройку и содержание корабля ресурсы удобно выражать в одном ценностном измерении. Без учета ограничений на ресурсы, т.е. экономического фактора, задача выбора варианта становится неразрешимой. При неограниченных ресурсах можно построить сколько угодно подводных лодок любого типа, — т.е. решить любую свойственную им задачу.

Возникновение и развитие военно-экономического анализа (ВЭА) как самостоятельной научной дисциплины и ставшей неотъемлемой составляющей проектирования любого инженерного сооружения, в том числе и такого сложного как ПЛ, связано именно с этими обстоятельствами. Можно выделить три причины названного процесса.

Расширение возможностей выбора в процессе проектирования. Действительно, за последние десятилетия спектр вариантов проектных решений существенно расширился. Появились энергетические

установки новых типов, для формирования прочных и легких корпусов ПЛ используются различные материалы. Особенно широк выбор в области систем оружия и вооружения. Учет многовариантности внутри каждого класса оружия и оборудования позволяет сделать вывод о том, что число возможных сочетаний, определяющих облик подводной лодки, достаточно велико.

Отмеченное выше приводит к стремительному росту затрат на корабли. Можно со сравнительно небольшой погрешностью утверждать, что цена подводных лодок одного типа возрастает на порядок в среднем за 20 лет. Стоимость серии кораблей становится сопоставимой со всем военным бюджетом крупных государств, даже таких, как США (табл. 12.1). Рост цен объясняется двумя факторами:

1. Инфляцией, в среднем на 3—5% в год.

2. Ростом сложности современной военной техники, ее насыщенностью дорогостоящими приборами и электроникой.

Таблица 12.1

Рост стоимости серийных подводных лодок в послевоенный период [12], [76]

Годы	Наименование подводных лодок	Стоимость, млн. долл.
1945	Океанская ДЭПЛ "Балло"	5—7
1965	ПЛАТ II поколения "Саргатов"	70—75
	ПЛАРБ II поколения "Диффер"	120—130
1978	ПЛАТ III поколения "Лес-Ангелес"	400
1980	ПЛАРБ III поколения "Отбой"	1200
1986	ДЭПЛ 209/1500 (Германия)	450
1998	ДЭПЛ "Агоста-96" (Франция)	235

Особую роль играет и третий фактор — рост длительности инновационного периода, т.е. промежутка времени от появления технической идеи до ее воплощения в серийной продукции, — построенных и освоенных подводных лодках. От начала разработки технического предложения до сдачи корабля флоту проходит 8—10 лет, а в некоторых случаях, при создании принципиально новой техники, и значительно больше. Таким образом, корабли начинают морально уста-

решать уже на стадиях верфи и в процессе выбора варианта должна быть обязательно учтена устойчивость принятых решений к моральному износу, определяемому появлением новых технических решений как в отечественном, так и в зарубежном флотах.

Вследствие перечисленных причин многократно возрастает цена ошибки в принятом решении. В процессе разработки подводной лодки обычно выполняется многочисленных научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР). Ими создается база для применения в проекте новых технических решений. Поэтому ошибочно принятое решение связано не только с неоправданными затратами в процессе постройки и эксплуатации самой подводной лодки, но и с выбором ложного научного направления, т.е. с затратами на НИОКР и упущенным временем [11].

Предметом военно-экономического анализа является разработка и реализации методов распределения выделенной на оборону части совокупного общественного продукта, обеспечивающих достижение требуемого уровня национальной безопасности при наименьших затратах. Понятно, что решить эту задачу на высшем уровне — на уровне Вооруженных сил — полностью, т.е. установить не только численность каждого вида боевых систем (кораблей, ракет, танков и др.), но и выбрать их тактико-технические характеристики невозможно. Поэтому военно-экономический анализ проводится на нескольких уровнях.

На уровне Вооруженных сил с целью определения общей численности вида сил для решения одной или некоторой совокупности стратегических задач, с учетом взаимодействия между видами.

На уровне вида сил с целью установления сбалансированного его состава для решения некоторой совокупности оперативных задач, с учетом как взаимодействия с силами других видов, так и сил данного вида между собой. Такая задача в частности решается при определении сбалансированного состава ВМФ.

В процессе исследовательского проектирования боевых комплексов (например, ПЛ) с целью выбора оптимальных их вариантов, с учетом возможного их взаимодействия с другими силами.

В процессе исследовательского проектирования подсистем боевых комплексов (например, энергетической установки или радиоэлектронного комплекса ПЛ), обеспечивающих заданный уровень их функционирования.

Задача сравнения вариантов и выбора оптимального из множества доступных является основной задачей военно-экономического анализа в исследовательском проектировании, но не единственной.

Другими распространенными задачами ВЭА являются: определение в процессе проектирования предварительной и ориентировочной цены ПЛ для прогноза совокупной потребности в ресурсах для ее создания, сравнение проектируемого корабля с существующими лучшими зарубежными образцами, а также определение оптимального срока службы ПЛ, ожидаемого срока моральной долговечности проекта, целесообразного режима модернизаций.

Вместе с тем необходимо отметить, что военно-экономический анализ (в США он получил название «анализ стоимости — эффективности») не определяет решение. Он лишь дает ответственным лицам, например главному конструктору подводной лодки, дополнительную информацию, позволяющую лучше изучить и понять интересующие его технические решения (принем эта информация в принципе не может быть получена иным путем). Процесс же принятия решения остается прерогативой проектировщика, который делает свой выбор не только на основании результатов военно-экономического анализа, но и исходя из других, не рассмотренных в его ходе соображений.

В современных условиях было бы просто неразумно отказываться от использования дополнительной информации, получаемой в результате военно-экономического анализа проектных решений. Но столь же неразумно всецело полагаться на его результаты, используя их без критической оценки [58].

12.2. Основные понятия военно-экономического анализа

Военно-экономический анализ возник на стыке нескольких наук: теории боевой эффективности, теории проектирования, экономики и сравнительно молодой науки — исследования операций. Как и всякая научная дисциплина, ВЭА имеет свою систему понятий или, как говорят, свою терминологию [12]. [87]

Значительная роль в развитии военно-экономического анализа принадлежит доктору технических наук, профессору Л.Б.Бреславу. Он предложил функцию тактического старения, им были разработаны модели динамических задач военно-экономического анализа и построена матричная модель себестоимости (матрица Бреслава).

Основополагающими понятиями ВЭА служат понятие: операции, боевой и военно-экономической эффективности, тактико-технических элементов и параметров технических решений.

Под операцией будем понимать одно или некоторую совокупность мероприятий, объединенных общностью замысла и цели, которая должна быть достигнута в результате их проведения. Операция

понятие достаточно широкое, под ней может пониматься уничтожение объекта противника, высадка десанта, смена экипажей на ПЛ, замена активной зоны реактора и т.д. Операция всегда имеет какой-либо результат. Мера соответствия ожидаемого или достигнутого результата цели, ради которой проводится операция, называется ее эффективностью.

Подводные лодки строятся для боевого использования. Их важнейшей характеристикой является боевая эффективность, которая оценивается их способностью решать поставленные задачи, по операциям, которые могут проводиться с их участием. Таким образом, под боевой эффективностью подводной лодки понимают меру соответствия ожидаемых результатов ее использования, в процессе одной операции, поставленной цели.

Для того чтобы однозначно охарактеризовать боевую эффективность ПЛ, необходимо задать три величины:

- величину ущерба, наносимого или предотвращаемого в течение операции некоторым числом проектируемых кораблей;
- вероятность нанесения или предотвращения этого ущерба за одну операцию;
- количество кораблей, необходимых для нанесения или предотвращения заданного ущерба с требуемой вероятностью.

Эти величины называются показателями боевой эффективности. Совокупность первых двух характеризует уровень боевой эффективности. Сравнить различные варианты одного проекта или разные проекты ПЛ одного назначения при одновременном изменении всех трех показателей очевидно нельзя. Поэтому два из трех показателей фиксируют на определенных, одинаковых для всех разрабатываемых вариантов значениях, а сравнение проводят по третьему, который в этом случае преобразуется в критерий сравнения и выбора. По его величине и судят о боевой эффективности корабля, о его способности решать свойственные ему задачи.

Сравнение вариантов ПЛ только по боевой эффективности в некоторых случаях вполне приемлемо, однако далеко не всегда. Действительно, в трех показателях боевой эффективности уже в косвенном виде содержится экономическая мера — характеристика затраченных ресурсов. Она заключена в численности кораблей, решающих поставленную задачу. В тех случаях, когда корабли (их варианты) примерно одинаковы, т. е. близки по водоизмещению, по номенклатуре вооружения и технических средств, по численности экипажа, сравнение только по боевой эффективности допустимо. Однако, чаще всего сравниваются варианты проекта и корабля, находящиеся в эксплуа-

тации, с различным вооружением и оборудованием. Такие корабли требуют различного количества ресурсов для их создания и содержания, и поэтому сравнение их только по критерию боевой эффективности оказывается недостаточным.

Система показателей, учитывающих и боевую эффективность подводной лодки, и ресурсы, затраченные на ее создание и содержание, характеризует военно-экономическую эффективность корабля.

Под военно-экономической эффективностью понимают меру соответствия ожидаемых результатов использования корабля, поставленной перед операцией цели и затратам ресурсов на достижение этих результатов.

Военно-экономическая эффективность корабля характеризуется однозначно системой из трех показателей: величиной наносимого за операцию или предотвращенного ущерба, вероятностью его нанесения или предотвращения, а также показателем, характеризующим общие затраты ресурсов на достижение названных результатов с требуемой вероятностью.

Из сказанного ясно, что для того чтобы оценить и боевую, и военно-экономическую эффективность корабля, необходимо ясно представлять себе характер протекания операции — процесса боевого использования корабля. Кроме того, необходимо знать характер формирования затрат. Поскольку невозможно точно предположить, как будет когда-либо использоваться проектируемый корабль, эти задачи решаются с помощью моделей.

Под моделью понимается имитация или описание изучаемого процесса, содержание лишь главных его черты. В военно-экономическом анализе под моделью понимают совокупность допущений и построений с их учетом алгоритмов, позволяющих определить значение показателей военно-экономической эффективности в зависимости от варьируемых в процессе исследования параметров.

Военно-экономическая модель состоит из двух частей и разрабатывается в два этапа.

Первый этап — разработка описательной (дескриптивной) модели, в которой словесно описывается характер создания, эксплуатации и боевого использования корабля. В частности, указывается место постройки (определяет цену) и район базирования корабля (влияет на эксплуатационные расходы). В отношении к боевому использованию части дескриптивной модели описывается район предполагаемых боевых действий, характеристика вероятных сил противника, против которых будет использоваться проектируемая подводная лодка, способ ее боевого использования и т.д.

На основании дескриптивной модели разрабатывается вторая часть — формальная модель. В ней выводятся те соотношения, по которым будет определяться система показателей (критериев) боевой эффективности.

Уже отмечалось, что основной задачей ВЗА в исследовательском проектировании кораблей является выбор варианта, точнее говоря набора тактико-технических элементов (ТТЭ) и параметров технических решений (ПТР), определяющих облик корабля.

Под тактико-техническими элементами корабля понимается совокупность характеристик, определяющих его боевую эффективность. К ТТЭ подводных лодок относятся:

- количество единиц вооружения, боезапас и их характеристики;
- уровень физических полей;
- характеристики гидроакустического комплекса;
- скорости (полного хода, поисковая т.д.);
- водоизмещение;
- предельная глубина погружения и т.д.

Под параметрами технических решений понимают технические характеристики корабля в целом и его подсистем, которые при заданных ТТЭ определяют затраты на его создание и содержание. Для подводных лодок в важнейшем ПТР можно отнести:

- архитектурно-конструктивный тип;
- марку материала прочного корпуса и его физические и механические характеристики;
- тип энергетической установки ПЛ и параметры, характеризующие зависимость ее массы от мощности;
- степень автоматизации и др.

Нетрудно заметить, что при фиксированных ПТР задать все ТТЭ невозможно — их сочетание может оказаться несовместимым. Так, при заданной скорости полного хода, известном водоизмещении и характеристиках ходовых качеств корабля задать произвольно мощность установки невозможно; она однозначно определяется по заданным величинам известными соотношениями теории проектирования ПЛ [1].

Однако, оказывается возможным из множества ТТЭ выделить такте, совокупность которых будет необходима и достаточна для определения всех остальных. Элементы, принадлежащие к этой совокупности, называются базисными. Остальные ТТЭ могут быть определены в процессе проектирования по заданным базисным элементам и набору ПТР. Эти элементы называются проектными. Выбор системы

базисных ТТЭ неоднозначен. Так, если задается скорость, которая тем самым вносится в число базисных ТТЭ, то мощность энергетической установки определяется расчетом, то есть относится к числу проектных элементов и наборот.

В военно-экономической модели показатели военно-экономической эффективности рассматриваются как функции базисных ТТЭ и ПТР. ВЗА предполагает возможность решения оптимизационных задач. В тех случаях, когда два показателя военно-экономической эффективности фиксируются, третий превращается в критерий, функционально зависящий от набора базисных ТТЭ и ПТР. Оптимизационная задача заключается в отыскании такого набора значений базисных ТТЭ, которые доставляют экстремум критерию военно-экономической эффективности. Сказанное имеет важную геометрическую интерпретацию. Базисные ТТЭ линейно независимы. Поэтому каждый их набор может рассматриваться как n -мерный вектор, где n — число базисных ТТЭ. Поскольку каждый вариант корабля при заданном наборе значений ПТР однозначно характеризуется набором значений базисных ТТЭ, то и сам вариант удобно рассматривать как n -мерный вектор или точку в n -мерном векторном пространстве, а критерий военно-экономической эффективности как функцию вектора ТТЭ в $(n+1)$ -мерном пространстве.

Параду с ТТЭ и ПТР корабль имеют и некоторые экономические характеристики. Их называют технико-экономическими показателями, которые характеризуют затраты на создание и содержание кораблей в различные периоды их жизненного цикла. Из технико-экономических показателей формируется показатель военно-экономической эффективности, который характеризует общую ценность ресурсов, затрачиваемых для обеспечения заданного уровня боевой эффективности. Затраты ресурсов классифицируются по характеру (одновременные или капитальные, эксплуатационные или текущие) и по назначению (прямые, то есть непосредственно связанные с кораблем, и сопутствующие, связанные, в частности, с созданием системы базирования).

К основным технико-экономическим показателям относятся:

- стоимость разработки (проектирование и выполняемые в обеспечение проекта НИОКР), C_1 ;
- стоимость постройки, C_2 ;
- среднегодовая стоимость эксплуатации, C_3 ;
- стоимость призываемого на борт боекомплекта (стоимость первого боекомплекта включается в стоимость постройки), C_4 .

- долевая стоимость создания или развития для данного корабля системы берегового или плавучего базирования, C_1 ;
- долевая стоимость системы эксплуатации системы базирования, C_2 .

Каждый технико-экономический показатель корабля может рассматриваться как функция его ТТЗ и ПТР. Так, например, стоимость постройки или точнее твердая опорная цена корабля обычно рассматривается как функция основных проектных элементов: водонмещения, мощности энергетической установки и некоторых базисных ТТЗ, в частности, количества единиц ракетного оружия. С другой стороны, стоимость подводной лодки довольно существенно зависит от некоторых ПТР, например, от вида и механических характеристик материала прочного корпуса. В связи с разнохарактерностью технико-экономических показателей они различно входят и в показатель военно-экономической эффективности. При этом последний, являясь мерой затраченных на решение задачи ресурсов, по физическому смыслу должен быть линейен относительно технико-экономических показателей. Ресурсный показатель военно-экономической эффективности может быть представлен в виде

$$b = \sum_{i=1}^n \alpha_i C_i \quad (12.1)$$

где b — ресурсный показатель военно-экономической эффективности;

C_i — технико-экономический показатель корабля;

$\alpha_1, \dots, \alpha_n$ — весовые коэффициенты, определяющие структуру ресурсного показателя военно-экономической эффективности.

Весовые коэффициенты α_i определяются исходя из военно-экономической модели, т.е. из системы допущений. Поясним это на примере. Предположим, что серия, которой строится проект подводной лодки, n единиц, а количество кораблей, необходимых для решения задачи, M единиц. Тогда доля затрат на разработку этого проекта, относимая на решение задачи, будет определяться: доля затрат на разработку, приходящая на один корабль составит C_1/M , на n кораблей, используемых для решения боевой задачи, C_1/nM .

Отсюда, соотношение между весовыми коэффициентами α_1 и α_2 должно быть равно n/M . Из соображений аналогичного характера определяется соотношение между коэффициентами α_2 и α_3 . Затраты на постройку осуществляются одновременно, а затраты на эксплуатацию — в течение всего срока службы корабля — T . Поэтому соот-

ношение α_2 и α_3 должно быть равно $1/T$. Таким образом, соотношение указанных коэффициентов является аналогом нормы амортизационных отчислений.

Соотношения между остальными коэффициентами определяется аналогично исходя из физических соображений. Абсолютная величина коэффициентов связана с числом кораблей, решающих поставленную задачу.

12.3. Модель оценки военно-экономической эффективности

Как уже указывалось, под моделью понимается совокупность допущений и построений с их учетом алгоритмов, формально описывающих изучаемый процесс или систему и содержащих зависимость искомой величины от варьируемых параметров и ограничений, которые наложены на эти параметры.

Модели делятся на аналитические и статистические. Первые содержат зависимость искомой величины от аргументов в аналитической форме и наиболее удобны в силу простоты и удобства работы с ними. В частности, такие модели удобно использовать при исследовании влияния отдельных параметров на величину критерия военно-экономической эффективности. Существенным недостатком их является то, что простота аналитических зависимостей обеспечивается за счет упрощений, загромождений модели, неучета некоторых, возможно важных особенностей процесса.

Этого недостатка лишен второй класс моделей — статистические, идея которых сводится к следующему. Рассматривается один вариант развития процесса при некотором случайном наборе входящих параметров с целью получения некоторого результата. Таких вариантов рассчитывается достаточно много, причем все возможные внешне по отношению к проектируемому объекту параметры выдаются генератором случайных чисел в соответствии с их законом распределения. После этого подсчитывается средний за все реализации результат, который и принимается за математическое ожидание входного параметра.

Статистические модели сложнее аналитических, но это полностью окупается их большей достоверностью и отсутствием необходимости в чрезмерных упрощениях.

Разработка модели начинается со словесного описания процесса, в котором и содержится принятые допущения.

Военно-экономическая модель устанавливает зависимость принятого за критерий показателя военно-экономической эффективности от тактико-технических элементов подводной лодки и показателей,

характеризующих способ ее боевого использования. Введенная в предыдущем параграфе система понятий позволяет представить структуру военно-экономической модели (рис. 12.1) [11].



Рис. 12.1. Структура военно-экономической модели

Знак \rightarrow обозначает, что по левому от знака набору (вектору) параметров определяется правый.

Анализируя структуру военно-экономической модели, можно заметить, что она может быть разделена на четыре блока.

Технический, содержащий определение проектных ТТЭ по заданным базисным ТТЭ и ПТР. Решение этого блока модели и составляет традиционную задачу проектирования.

Тактический, содержащий определение показателя уровня боевой эффективности по полному набору известных ТТЭ и характеристике внешних условий. Он устанавливает соответствие между ТТЭ подводной лодки и уровнем ее эффективности, а его описанием включает описание оперативно-тактической обстановки, в которой будут действовать проектируемые ПЛ, в том числе:

- описание района предполагаемых боевых действий;

- характеристика сил противника, их состав, цели, которые он преследует, вероятные способы использования этих сил, ТТЭ его кораблей, основные данные оружия;

- предполагаемые способы использования своих сил.

Технико-экономический, в котором по известным ТТЭ и ПТР определяются технико-экономические показатели подводной лодки (стоимость разработки проекта, постройки и годовой эксплуатации). Описание технико-экономического блока модели должно содержать необходимые данные для определения указанных стоимостей.

Военно-экономический, в котором по известным технико-экономическим показателям и уровню боевой эффективности определяется ресурсный показатель эффективности — суммарные затраты на решение определенной задачи. Он, как правило, и принимается за критерий военно-экономической эффективности при заданном уровне боевой эффективности. Описание военно-экономического блока модели должно содержать необходимые данные для формирования критерия:

- ожидаемую длительность мирного периода;

- количество ПЛ, которые необходимо построить по данному проекту;

- ожидаемый срок службы корабля, а также ряд других данных, характеризующих эксплуатацию проектируемых ПЛ в мирное и военное время.

12.4. Модель боевого использования подводной лодки

Для формирования модели боевого использования подводной лодки (тактического блока) необходимо принять ряд допущений о характере боевых действий, с учетом этих допущений описать процесс их боевого использования и формализовать это описание.

Рассмотрим в качестве примера одну из возможных моделей боевого использования многоцелевой подводной лодки. Изложим модель обнаружения и слежения, следуя И. Я. Динеру [103]. Предположим, что перед ней поставлена задача: выход в район (в квадрат площадью S квкм), поиск в этом районе противника, слежение за ним и уничтожение с началом боевых действий, что передается специальным сигналом в какой-то условно принятый момент. Поскольку целью первой фазы боевых действий является обнаружение противника, то показателем эффективности поиска будет служить вероятность его обнаружения. Пусть многоцелевая ПЛ (в последующем изложении — оразведчик) обнаруживает противника (объект) за время t с вероятностью $P(t)$. При определении вероятности обнару-

жения будем считать поток объектов, попадающих в поле зрения разведчика, однородным. Это значит, что за бесконечно малый промежуток времени он не может обнаружить более одного объекта, т.е. возможны два варианта: число обнаружений за элементарный промежуток времени dt равно или 1 или 0. С учетом принятых допущений элементарная вероятность обнаружения $y(t)dt$ определится по зависимости:

$$y(t)dt = \frac{dP(t)}{1 - P(t)} \quad (12.2)$$

Интегрируя выражение (12.2) в предположении, что вероятность обнаружения в начале поиска равна 0, получим:

$$P = 1 - e^{-\int_0^t y(t)dt} \quad (12.3)$$

Показатель экспоненты в выражении (12.3) для вероятности обнаружения, представляющий математическое ожидание числа обнаружений за время поиска t , называется потенциалом поиска

$$u(t) = \int_0^t y(t)dt \quad (12.4)$$

В отличие от элементарной вероятности $y(t)dt$ вероятность $P(t)$ называется накопленной или интегральной вероятностью обнаружения.

В зависимости от того, завершается ли поиск при неограниченной его продолжительности обнаружением объекта или нет, процесс поиска называется сходящимся или расходящимся. Рассмотрим наиболее простой случай сходящегося процесса поиска — поиск с постоянной интенсивностью $y = \text{const}$. В этом случае поисковый потенциал является линейной функцией времени $u(t) = t$, а накопленная вероятность — экспоненциальной функцией времени

$$P(t) = 1 - e^{-t} \quad (12.5)$$

Определим математическое ожидание времени поиска:

$$T_n = \int_0^{\infty} e^{-t} = \frac{1}{y}(1 - 0) = \frac{1}{y} \quad (12.6)$$

Таким образом, при поиске с постоянной интенсивностью математическое ожидание времени поиска обратно пропорционально интенсивности поиска. Для определения интенсивности поиска предположим, что место нахождения объекта в районе подчинено

закону равномерной плотности, т.е. он может находиться в любой точке района с равной вероятностью. Будем считать объект неподвижным, хотя в дальнейшем движение объекта будет учтено. Предполагаем, что поиск осуществляется по хаотичной траектории, т.е. с одинаковой вероятностью просматриваются и необследованные и уже обследованные участки. При этих допущениях элементарная вероятность обнаружения объекта в единицу времени будет равна отношению этой площади к общей площади района [11].

В свою очередь, элементарная площадь, просматриваемая за единицу времени, равна произведению скорости движения разведчика на удвоенную дальность действия его средства обнаружения (рис.12.2).

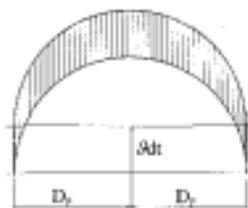


Рис.12.2. Элементарная площадь, обследуемая при поиске

$$y(t)dt = \frac{2D_0 \delta_0}{S_0} dt \cdot P_c \quad (12.7)$$

где P_c — вероятность контакта;
 D_0 — дальность действия средства обнаружения разведчика;
 δ_0 — поисковая скорость разведчика.

Теперь необходимо учесть движение объекта. Для этого достаточно рассмотреть не абсолютную скорость разведчика, а его относительную скорость (рис.12.3.).

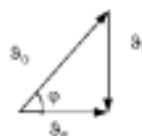


Рис. 12.3. К определению относительной скорости

Выражение для относительной скорости имеет вид:

$$\bar{S}_p = \sqrt{S_p^2 + S_p^2 - 2S_p S_p \cos \varphi} \quad (12.8.)$$

Однако поиск — только начальная фаза использования подводной лодки. Обнаружив противника до начала боевых действий, разведчик должен обеспечить за ним непрерывное слежение.

Рассмотрим процесс слежения, руководствуясь следующими соображениями. Процесс слежения начинается сразу же после обнаружения объекта. В процессе слежения, целью которого является поддержание контакта с объектом, контакт периодически теряется вследствие маневров объекта. В случае потери контакта производится вторичный поиск до его восстановления. Нетрудно себе представить, что чем меньше прошло времени с момента потери контакта, тем меньше площадь района, в которой может находиться оторвавшийся от слежения объект, тем легче восстановить контакт. Очевидно, что интенсивность вторичного поиска не может быть меньше интенсивности первичного поиска $\lambda > \gamma$. Вместе с тем, поскольку район поиска с течением времени достаточен расширяться, то интенсивность вторичного поиска — не возрастающая функция времени. Как правило, рассматриваются два случая слежения:

- а) при постоянном преимуществе вторичного поиска перед первичным — $\lambda > \gamma$. Это может иметь место в случае, когда объект слежения отрывается только в какую-то часть квадрата $S' \ll S_p$;
- б) при кратковременном преимуществе вторичного поиска перед первичным $\gamma = \lambda$, когда скорость увеличения площади района, в которой может оказаться объект возрастает достаточно быстро, до $S' = S_p$.

Рассмотрим первый случай. Исходя из сказанного выше, рассматриваемая система может находиться в одном из трех состояний (рис. 12.4.):



Рис. 12.4. Схема слежения с потерей и восстановлением контакта

первичный поиск — разведчик ищет объект во всем районе. Это состояние длится до обнаружения объекта;

слежение — в этом состоянии система «разведчик-объект» находится от момента обнаружения объекта в первичном поиске до поте-

ри контакта и от обнаружения объекта во вторичном поиске до потери контакта;

вторичный поиск — от потери контакта в процессе слежения до его восстановления в процессе вторичного поиска.

В соответствии со сказанным вероятность слежения определится в общем виде по формуле:

$$P_c(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \frac{\lambda - \gamma}{\mu + \lambda - \gamma} e^{-\gamma t} - \frac{\mu \gamma}{(\mu + \lambda)(\mu + \lambda - \gamma)} e^{-(\mu + \lambda)t}, \quad (12.9.)$$

где γ — интенсивность обнаружения в первичном поиске;

λ — интенсивность восстановления контакта;

μ — интенсивность потери контакта.

Рассмотрим некоторые представляющие интерес частные случаи:

1. Пусть $\gamma = 0$; очевидно, если первичное обнаружение невозможно, то невозможно и слежение. Действительно, подставляя в (12.9.) $\gamma = 0$, получим:

$$P_c(t) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \frac{\lambda}{\mu + \lambda} 1^{t^0} = 0. \quad (12.10.)$$

2. $\mu = 0$; потеря контакта нет. В этом случае вероятность слежения равна вероятности обнаружения:

$$P_c(t) = 1 - e^{-\gamma t}. \quad (12.11.)$$

3. Вторичный поиск не имеет преимущества перед первичным:

$$P_c(t) = \frac{\gamma}{\mu + \gamma} [1 - e^{-(\mu + \lambda)t}]. \quad (12.12.)$$

Приведенные соотношения позволяют, задавшись необходимыми исходными данными, определить вероятность слежения на любой момент остаточной автономности подводной лодки.

Следующая фаза боевых действий — дуэль, которая в данном случае носит упрощенный характер. При анализе этой фазы боевого использования ПЛ будем исходить из следующих представлений. После получения сигнала о начале боевых действий разведчик, изменив контакт с противником, применяет оружие с целью его уничтожения. В зале столько единиц оружия, сколько у разведчика торпедных аппаратов. Количество залпов, которое может дать разведчик, если он до этого не будет уничтожен, определяется по формуле:

$$n_i = \frac{N_i}{D_i}, \quad (12.13.)$$

где D_i — количество единиц боезапаса в залпе;

N_i — общий боезапас по данному виду боеприпасов.

Поскольку дуэль может быть начата не только разведчиком, но и противником, будем полагать, что вероятность начала (первого залпа) со стороны разведчика $P=1$. Вероятность поражения противника одним залпом находится по зависимости:

$$P=1-(1-P_i)^n, \quad (12.14)$$

где P_i — вероятность поражения противника одиночной торпедой.

Рассмотрим далее Дуэльную ситуацию: противники обмениваются залпами до истощения боезапаса у разведчика — будем для простоты полагать, что боезапас у противника неограничен, — это не изменит вероятности выполнения задачи. Вероятности поражения противника каждым залпом с учетом вероятности того, что сам разведчик не будет поражен ответным, будет иметь вид:

Номер залпа	Вероятность уничтожения объекта своим залпом	Вероятность уничтожения разведчика ответным залпом
1	P	$(1-P)q$
2	$(1-P)(1-q)P$	$(1-P)^2(1-q)q$
3	$(1-P)^2(1-q)^2P$	$(1-P)^3(1-q)^2q$
i -й	$[(1-P)(1-q)]^{i-1}P$	$[(1-P)(1-q)]^{i-1}(1-P)q$
n -й	$[(1-P)(1-q)]^{n-1}P$	$[(1-P)(1-q)]^{n-1}(1-P)q$

Нетрудно видеть, что общее выражение для вероятности поражения противника i -м залпом имеет вид:

в случае первого залпа со стороны разведчика:

$$P_i^{(1)} = [(1-P)(1-q)]^{i-1} \cdot P, \quad (12.15.)$$

в случае первого залпа со стороны противника:

$$P_i^{(2)} = [(1-P)(1-q)]^{i-1} \cdot (1-P)q, \quad (12.16.)$$

а полная вероятность поражений всеми залпами n_i допускаемыми нам имеемым боезапасом:

в случае первого залпа со стороны разведчика:

$$P_n^{(1)} = P \frac{1 - [(1-P)(1-q)]^n}{P+q-Pq}, \quad (12.17.)$$

в случае первого залпа со стороны противника:

$$P_n^{(2)} = P(1-q) \frac{1 - [(1-P)(1-q)]^n}{P+q-Pq}, \quad (12.18.)$$

С учетом того, что принято равновероятным начало боевых действий обеими сторонами, получим полную вероятность уничтожения противника:

$$P_n = 0,5 \left\{ (2P-Pq) \frac{1 - [(1-P)(1-q)]^n}{P+q-Pq} \right\}, \quad (12.19.)$$

Определив вероятность сближения за противником к моменту боевых действий и условную вероятность его уничтожения, вычисленную при условии, что к моменту начала боевых действий у разведчика был контакт противником, определим полную вероятность уничтожения противника с учетом и сближения и исхода дуэли:

$$P_n = P_c \cdot P_n, \quad (12.20.)$$

где P_c определяется по одной из формул (12.9—12.12).

12.5. Определение численности наряда подводных лодок.

Коэффициенты оперативного напряжения и оперативного использования

Одним из показателей боевой эффективности служит число кораблей, решающих поставленную задачу — наряд сил. Рассматриваются два вида наряда: polygonный и полный. Под polygonным нарядом понимается число кораблей, наличие которых в районе боевых действий необходимо для решения поставленной задачи. Однако, для обеспечения постоянной готовности к решению задачи, только polygonного наряда недостаточно. Действительно, когда часть подводных лодок будет находиться в районе предполагаемых боевых действий, другая будет находиться на переходе к этому району, чтобы сменить те, у которых кончится автономность, и часть из обратном переходе в базу. Кроме того, часть подводных лодок будет находиться в базе, проходя межлодочное обслуживание или находясь в одном из видов ремонта. Поэтому количество кораблей, которое надо иметь для того, чтобы в районе предполагаемых боевых действий мог постоянно находиться polygonный наряд, всегда значительно его превосходит.

Полный заряд, необходимый для выполнения задачи с заданной вероятностью с учетом норм оперативного использования, определяется из выражения:

$$N = \frac{N_0}{K_{оп}}, \quad (12.26)$$

где $K_{оп}$ — коэффициент оперативного использования.

12.6. Понятие о динамических задачах военно-экономического анализа

Корабли ВМФ, и в первую очередь современные подводные лодки, — сложные и весьма дорогостоящие сооружения с достаточно длительными сроками службы [75],[93]. В течение службы боевая эффективность корабля не остается постоянной, она изменяется под воздействием физического и особой формы морального износа — тактического старения. Рассматривая изменение боевой эффективности во времени как непрерывный процесс, можно записать следующее выражение:

$$\begin{aligned} \Delta E(t) &= \int_0^t \left[\frac{\partial E}{\partial x_1} \frac{dx_1}{dt} + \frac{\partial E}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dt} + \dots + \frac{\partial E}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dt} + \right. \\ &+ \left. \frac{\partial E}{\partial t_1} \frac{dt_1}{dt} + \frac{\partial E}{\partial t_2} \frac{dt_2}{dt} + \frac{\partial E}{\partial t_n} \frac{dt_n}{dt} \right] dt = \quad (12.27) \\ &= \int_0^t \text{grad}_x E \cdot \frac{d\bar{x}}{dt} dt + \int_0^t \text{grad}_t E \cdot \frac{d\bar{t}}{dt} dt \end{aligned}$$

где $\frac{\partial E}{\partial x_i}$ — частная производная от эффективности по ТТЭ корабля

(скорости, глубины погружения и т.д.), характеризующая изменение боевой эффективности при изменении этих элементов;

$\frac{dx_i}{dt}$ — изменение i -го ТТЭ во времени под влиянием физического износа;

$\frac{\partial E}{\partial t_j}$ — частная производная от боевой эффективности по j -му тактико-техническому элементу кораблей и других сил противника.

Смысл первого интеграла в выражении (12.27) прост — это физический износ. Действительно, с течением времени ТТЭ корабля, хотя и незначительно, но все-таки снижаются, и вследствие этого умень-

шается его боевая эффективность. Первый сомножитель в подынтегральном выражении — градиент по вектору ТТЭ, а второй — производная вектора ТТЭ по времени, которая характеризует скорость снижения ТТЭ рассматриваемого корабля.

Физический смысл второго интеграла сложнее. В течение службы рассматриваемого корабля противник не остается неизменным. Устаревшие элементы его противолодочных сил (корабли, самолеты и т.д.) заменяются новыми или модернизируются. Поэтому анализируемой подводной лодке, которая технически не изменяется (вопрос о модернизации является отдельной задачей), становится все труднее действовать против обновляемых сил противника. Иными словами, его боевая эффективность падает вследствие технического прогресса противника при неизменных собственных ТТЭ. Этот процесс представляет собой особую форму морального износа, характерную только для военой техники, получил название тактического старения. Первый сомножитель в подынтегральном выражении — градиент изменения боевой эффективности ПЛ при росте ТТЭ сил противника, а второй — скорость научно-технического прогресса противника.

Текущую боевую эффективность подводной лодки, т.е. ее величину на i -й год ее службы можно записать в виде

$$E(t) = E_0 - \Delta E(t) = E_0 \left[1 - \frac{\Delta E(t)}{E_0} \right] = E_0 k(t), \quad (12.28)$$

где E_0 — боевая эффективность подводной лодки в момент ее создания;

$k(t)$ — функция тактического старения (рис.12.6.)



Рис. 12.6. Характер функций тактического старения

Для описания функций тактического старения обычно используют одно из выражений, удовлетворяющих следующим условиям:

$$J(t) = 1 \text{ при } t = 0$$

$$J(t) = 0 \text{ при } t \rightarrow \infty$$

$$\frac{\partial J}{\partial a} \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow 0$$

$$\int_0^{\infty} J(t) dt < M, \quad (12.29)$$

где M — некоторое ограниченное положительное число.

Интеграл $\int_0^{\infty} J(t) dt$ имеет особый смысл. Вооруженные силы создаются для обеспечения безопасности государства, для обуздания потенциального агрессора, иными словами, для предотвращения войны.

Эффективность Вооруженных сил в этом смысле тем выше, чем выше в данный момент эффективности боевых комплексов их составляющих. Поэтому вклад каждого боевого комплекса, в том числе и каждой подводной лодки, в решение этой задачи определяется не только ее боевой эффективностью в момент ввода в строй. Этот вклад будет зависеть и от того, сколько лет будет служить ПЛ и какова будет ее эффективность в каждый год службы. Вклад в обеспечение национальной безопасности, выносимый подводной лодкой за срок ее службы и отнесенный к ее начальной эффективности, и описывается интегралом в выражении (12.29). В соответствии с его смыслом интеграл, умноженный на первоначальную боевую эффективность, называется боевым потенциалом.

$$P = E_0 \int_0^{\infty} J(t) dt. \quad (12.30)$$

Рассмотрим простейшую задачу, в которой не используется категория боевого потенциала, задачу о влиянии срока проектирования на показатель военно-экономической эффективности подводной лодки. Примем функцию тактического старения в форме экспоненты

$$J(t) = e^{-\nu t} \quad (12.31)$$

Определим параметр функции тактического старения ν из условия, что за 10 лет боевая эффективность корабля уменьшается на 25%. Тогда $e^{-10\nu} = 0,75$ и $\nu = 0,029$.

В соответствии с действительной картиной будем считать, что тактическое старение начинается с момента утверждения тактико-

технического задания, т.е. с того момента, когда утверждаются ТТЭ корабля. В дальнейшем они в процессе проектирования останутся неизменными и не улучшатся в процессе эксплуатации. Пусть плановый срок проектирования 4 года удалось сократить до 2 лет (рис.12.7.)

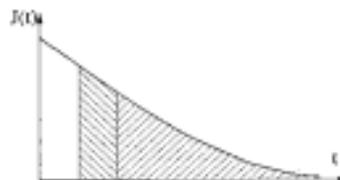


Рис.12.7. К расчету эффективности сокращения сроков проектирования

Относительный прирост боевого потенциала определится из выражения:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{E_0 \int_0^4 e^{-0,029t} dt}{E_0 \int_0^2 e^{-0,029t} dt} = 1,36. \quad (12.32)$$

Приняв допущение об одинаковости затрат на проектирование и остальных технико-экономических показателей, можно убедиться в том, что при принятых условиях сокращение сроков проектирования с 4-х до 2-х лет уменьшает стоимость равноэффективной службы подводной лодки на 36%.

Исходя из тех же представлений, решаются и более сложные задачи военно-экономического анализа:

- определение оптимального срока службы;
- определение оптимальных сроков проведения модернизационных работ и др.т.д.

12.7. Оценка технико-экономических показателей подводной лодки

В качестве основных технико-экономических показателей подводных лодок могут рассматриваться затраты на ее создание и содержание. Себестоимость создания корабля в общем случае складывается из себестоимости разработки и себестоимости постройки.

Под себестоимостью разработки понимаются затраты на разработку проекта основного разработчика и затраты организаций — контрагентов, а также себестоимость научно-исследовательских и конструкторских работ, выполняемых в обеспечение разработки проекта.

Под себестоимостью постройки понимаются затраты завода — строителя на ее постройку и реализацию, а также прибыль, получаемая заводом.

Себестоимость эксплуатации корабля складывается из основных составляющих, связанных с ремонтными и плановыми заменами оборудования, материально-техническим обеспечением и содержанием личного состава. Тогда общие затраты, связанные с достижением определенной эффективности, могут быть представлены следующей зависимостью:

$$C = a_1 C_D + a_2 C_E + a_3 C_C \quad (12-33)$$

где C — показатель затрат; C_D — себестоимость разработки; C_E — себестоимость постройки; C_C — себестоимость эксплуатации корабля; a_1, a_2, a_3 — весовые коэффициенты, соотносящие между собой разнородные затраты, определяются в соответствии с моделью предполагаемого характера постройки и использования.

По установившейся практике при определении себестоимости создания корабля в качестве базовой принимается себестоимость постройки. Это объясняется тем, что названная характеристика более стабильна чем себестоимость разработки, ее зависимость от основных ТТЭ легче выявить и проследить. Во-вторых тем, что себестоимость проектирования должна распределяться на всю серию ПЛ данного проекта, а на ранних стадиях проектирования объем серии обычно неизвестен [13]. С другой стороны, в процессе технико-экономического обоснования проектировщику важно не столько получить точную оценку себестоимости проектируемой ПЛ и ожидаемых эксплуатационных затрат, сколько необходимо иметь верное соотношение между технико-экономическими показателями различных вариантов проекта и знать зависимость этих показателей от ТТЭ проектируемого корабля. [4].

Поэтому в процессе технико-экономического обоснования наиболее часто применяются нормативно-параметрические методы определения затрат. В основе этих методов лежит принцип установления зависимости технико-экономических показателей проектируемой подводной лодки, и в первую очередь ее себестоимости, от технико-эксплуатационных элементов и влияющих по отношению к кораблю

параметров, характеризующих условия постройки и эксплуатации. Такие зависимости строятся либо на базе опытно-статистических данных по уже построенным кораблям, либо на базе имеющихся нормативных материалов. При этом необходимо иметь в виду, что статистические методики отвечают на вопрос — какова будет себестоимость проектируемой ПЛ, если характер производства не претерпит существенных изменений; нормативные методики отвечают на вопрос, какова должна быть себестоимость, если производственный процесс будет организован наилучшим образом.

Себестоимость постройки корабля может быть определена по следующей зависимости:

$$C = (1 + k)(C_{01} + C_{02} + C_{03} + C_{04}) \quad (12-34)$$

где C — себестоимость постройки подводной лодки; $C_{01}, C_{02}, C_{03}, C_{04}$ — себестоимость работ судостроительной верфи, стоимости материалов, контрагентских поставок и прочих прямых расходов; k — коэффициент, учитывающий коммерческие расходы. [87]

Себестоимость подводной лодки целесообразно разбить на составляющие, используя одновременно и экономическую классификацию по калькуляционным статьям, и разделение проектируемой ПЛ по подсистемам (элементам). Такая ополементация модель себестоимости корабля позволяет использовать сравнительно простые зависимости при ее определении и делают модель более живой, т. е. при изменении какого-либо элемента требуется замена только одной зависимости, а не всей модели в целом. Слагаемые себестоимости в данном случае представляются матрицей, где строки соответствуют подсистемам, а столбцы — калькуляционным статьям. Такую модель себестоимости называют матричной (табл. 12.2).

Величина $C = \sum \Sigma$ выражает производственную себестоимость ПЛ. В статью "работы верфи" включаются следующие калькуляционные статьи: основная и дополнительная заработная плата производственных рабочих; иловые и заводские косвенные расходы, расходы на подготовку производства и прочие прямые расходы. Основой для расчета этой величины служит технологическая трудоемкость по каждой подсистеме. Для установления вида зависимостей трудоемкости работ используются данные прототипа или статистической информации.

Матричная модель себестоимости подводной лодки
(матрица Бреслава)

Подсистема	Работы верфи	Материалы	Контрагентские поставки	Себестоимость подсистемы
Прочный корпус и причалы конструкций	C_{01}	C_{02}	C_{03}	\sum_1
Легкий корпус	C_{04}	C_{05}	C_{06}	\sum_2
Устройства	C_{07}	C_{08}	C_{09}	\sum_3
Энергетическая установка	C_{10}	C_{11}	C_{12}	\sum_4
Электрооборудование	C_{13}	C_{14}	C_{15}	\sum_5
Оборудование помещений	C_{16}	C_{17}	C_{18}	\sum_6
Вооружения	C_{19}	C_{20}	C_{21}	\sum_7
Радиоэлектронное оборудование	C_{22}	C_{23}	C_{24}	\sum_8
Обеспечение высадки и дифферентовки	C_{25}	C_{26}	C_{27}	\sum_9
Элементы затрат	\sum_1	\sum_2	\sum_3	$\Sigma\Sigma$

Тогда себестоимость работ верфи

$$C_{0i} = C_{0i0}T(1 + k_{0i} + k_{0i1}(1 + k_{0i2})(1 + k_{0i3})), \quad (12.35.)$$

где C_{0i0} — среднечасовая тарифная ставка; T — трудоемкость работ по подсистеме; k_{0i} , k_{0i1} — коэффициенты всех косвенных расходов; k_{0i2} — коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату; k_{0i3} — коэффициент специальных расходов [11].

Стоимость материалов, необходимых для постройки подводной лодки вычисляется для каждой подсистемы отдельно. В качестве определяющего параметра по статье "материалы" используются массовые коэффициенты:

$$C_{0i} = \frac{C_{0i} P_{0i}}{k_{0i} k_{0i3}}, \quad (12.36.)$$

где P_{0i} — масса подсистемы; C_{0i} — удельная стоимость материалов; k_{0i} — коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы; k_{0i3} — коэффициент использования материала.

Наиболее сложным на ранних стадиях проектирования является определение стоимости контрагентских поставок, которая составляет существенную часть стоимости постройки ПЛ. Это объясняется тем, что в создании подводной лодки принимают участие многие отрасли промышленности, каждая из которых имеет свои особенности, обусловленные спецификой создаваемых изделий и производства. Эти особенности не всегда известны конструкторам ПЛ или не могут быть учтены достаточно качественно. В этих условиях может быть рекомендован способ определения стоимости по массовым показателям. Тогда стоимость контрагентских поставок и работ для рассматриваемой подсистемы определяется из выражения:

$$C_{0i0} = \sum_1 C_{0i} P_{0i}, \quad (12.37.)$$

где P_{0i} — масса контрагентского изделия или подсистемы; C_{0i} — удельная стоимость (стоимость единицы массы) изделия.

Значения находят по данным прототипов с учетом особенностей изделий. Например, стоимость различных типов энергетических установок (атомных, дизельных, анзобных) может быть определена отдельно пропорционально их мощности, а не массе.

$$C_{0i0} = k_{0i} \cdot N_{0i}, \quad (12.38.)$$

где k_{0i} — коэффициент, определяемый в зависимости от типа установки; N_{0i} — мощность установки.

Ориентировочное представление о стоимости контрагентских поставок и работ можно получить на основании данных по атомным подводным лодкам США (табл. 12.3.)

Таблица 12.3.

Составляющие (%) стоимости атомных подводных лодок США
(по данным [16], [87])

Тип лодки	Работы верфи	Материалы	Контрагентские поставки и работы
Торпедная	43—46	14—15	40—42
Ракетная	33—38	15—16	48—50

Определив себестоимость постройки подводной лодки C , можно определить и себестоимость серии подводных лодок, предполагаемой к постройке по данному проекту:

$$C_{\text{ср}} = [aN + b(\ln N + \varepsilon)] \cdot C, \quad (12.39)$$

где N — полный наряд, необходимый для решения задачи с заданной вероятностью; $\varepsilon = 0.577$ — постоянная Эйлера.

Показатель среднегодовых затрат на эксплуатацию подводной лодки имеет весьма существенное значение для оценки боевой эффективности ПЛ, поскольку данные затраты за срок службы соизмеримы со стоимостью постройки корабля, а в ряде случаев значительно превышают ее. Как уже упоминалось, все годовые затраты на эксплуатацию подводной лодки разбивают на несколько составляемых в соответствии с их назначением:

$$C_{\text{ж}} = C_{\text{лс}} + C_{\text{мтс}} + C_{\text{р}}, \quad (12.40)$$

где $C_{\text{лс}}$ — затраты на содержание личного состава;

$C_{\text{мтс}}$ — затраты на материально-техническое снабжение;

$C_{\text{р}}$ — затраты на ремонты и плановые замены оборудования.

Стоимость содержания личного состава определяется следующим образом численностью экипажей и описывается зависимостью:

$$C_{\text{лс}} = n_{\text{ж}} C_1 m_1 + n_{\text{лс}} C_2 m_2, \quad (12.41)$$

где C_1 и C_2 — среднегодовая стоимость содержания одного члена экипажа ПЛ и берегового технического экипажа;

$n_{\text{ж}}$ и $n_{\text{лс}}$ — численность личного состава ПЛ и берегового технического экипажа;

m_1 — количество экипажей на один корабль;

m_2 — количество кораблей, приходящихся на один технический экипаж.

Стоимость материально-технического снабжения в основном определяется водоизмещением подводной лодки:

$$C_{\text{мт}} = \left(kD^{\beta} + \frac{C_{\text{мт}}}{T_{\text{мт}}} \cdot 10^4 \right), \quad (12.42)$$

где D — нормальное водоизмещение;

$C_{\text{мт}}$ — стоимость аккумуляторных батарей;

$T_{\text{мт}}$ — срок службы аккумуляторных батарей;

k — численный коэффициент.

Стоимость ремонтов и плановых замен включает затраты на ремонты корпуса, электромеханического оборудования и связанные с ремонтами плановые замены оборудования

$$C_{\text{р}} = \frac{1}{T_{\text{р}}} \left(\left[n_1 (D \cdot 10^{-4}) + n_2 (D \cdot 10^{-4}) \right] \sum_{i=1}^k t_{\text{р}i} C_i + [C_{\text{лс}} + t_{\text{лс}} \cdot C'] n_{\text{лс}} \right) \cdot 10^4, \quad (12.43)$$

где t_i — длительность i -го ремонта;

C — средняя стоимость нормо-часа при заводском ремонте;

n_i — число ремонтов i -го вида;

C — стоимость одного нормо-часа при замене активной зоны;

$C_{\text{лс}}$ — стоимость активной зоны;

$t_{\text{лс}}$ — длительность замены активной зоны;

После выполнения всех указанных выше расчетов формируется критерий военно-экономической эффективности — стоимость полного наряда и его содержания в течение 10 лет, по которому как указывалось выше и сравниваются различные варианты проектируемых кораблей.

$$C = C_{\text{ср}}^{(N)} + C_1 \cdot 10N. \quad (12.43)$$

В заключение в качестве примера рассмотрим сопоставительные оценки боевой и военно-экономической эффективности применения атомных, традиционных дизель-электрических и неатомных ПЛ с анаэробными энергетическими установками, на различных морских театрах. Так, например, результаты исследований потенциальных возможностей группировок рассматриваемых типов ПЛ по критерию «эффективность — стоимость», приведенные в работе [57], показывают, что в океанской и дальней морской зоне бесспорное преимущество имеют атомные подводные лодки. Это объясняется тем, что за счет большой скорости полного подводного хода и автономности, условий работы гидроакустического комплекса и других показателей, влияющих на эффективность ПЛ, атомные подводные лодки имеют в 5—15 раз большую по сравнению с неатомными боевую эффективность при решении противолодочных и противокорабельных задач в дальней морской и океанской зонах.

Вместе с тем, стоимость создания и эксплуатации атомных ПЛ всего в 2,5—5,0 раз превышает этот показатель для неатомных подводных лодок (рис. 12.4). Следует, однако, оговорить, что показатель $W = \Delta C$ носит ориентировочный характер.

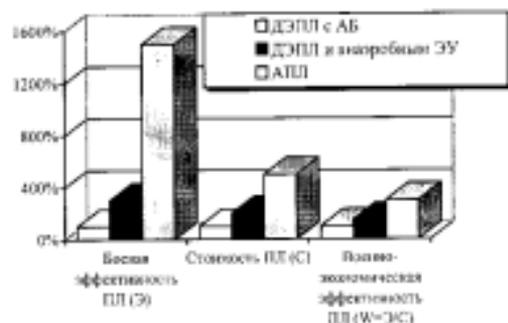


Рис. 12.8. Военно-экономическая эффективность ПЛ в ованской зоне

Оценивая военно-экономическую эффективность рассматриваемых ПЛ в ближней морской зоне, когда характер и условия решения возлагаемых на подводные лодки задач, а, следовательно, и их боевая эффективность, изменяется (в основном из-за присутствия сил обеспечения и гидрологических особенностей мелководья), преимущественно перед атомными ПЛ имеют неатомные корабли с анаэробными энергетическими установками (рис. 12.9).

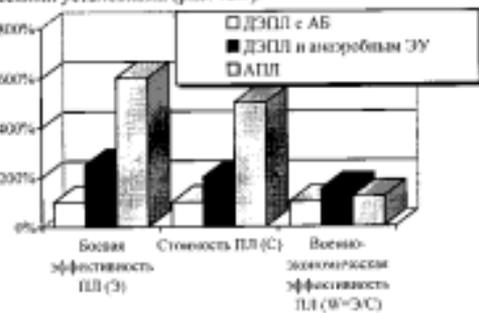


Рис. 12.9. Военно-экономическая эффективность ПЛ в ближней морской зоне

Это объясняется тем, что в условиях ближней морской зоны характеристиками атомных ПЛ становятся как бы избыточными, а возможности неатомных ПЛ со вспомогательными анаэробными установками по скрытности и поисковому потенциалу приближаются к характеристикам атомных ПЛ. Аналогичные результаты получены американскими специалистами [102].

Однако сделанные в работах [57], [102] выводы, на наш взгляд, могут существенно измениться, если учесть стоимость утилизации атомных подводных лодок и стоимость эксплуатации анаэробных установок, которые требуют создания дорогостоящей береговой инфраструктуры.

Примером анализа на совместимость требований ОТЗ может быть, в частности, исследование о предпочтительности улучшения характеристик гидроакустического комплекса (как за счет установки более мощного ГАК, так и за счет проектных решений, обеспечивающих оптимальный режим работы гидроакустических средств), (рис. 12.10) либо увеличение количества торпедных аппаратов и количества и номенклатуры боезапаса [2].

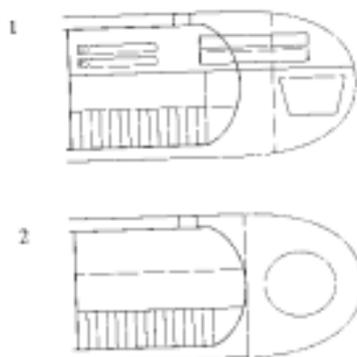


Рис. 12.10. Варианты компоновки носовой оконечности
1 – оптимизация характеристик ГАК
2 – оптимальные характеристики ГАК

Приоритет того или иного решения оценивается по эффективности действия ПЛ с различными вариантами сочетаний ГАК, числа ТА и боезапаса в соответствующих тактических ситуациях.

1. Александров В.Л., Гитман М.К., Ростовец Д.М., Сивер Н.Л. Проектирование конструкции основного корпуса подводных аппаратов. СПб.: Изд. СПбГМТУ, 1994.
2. Александров Ю.Н., Шевченко П.П., Харченко В.И. Интегрированная система обоснования облика ПЛ предназначенных на экспорт. СПб.: Моринтех -96.
3. Алексеев Г.И., Мурулов В.С. Морские подводные двигатели. М.: "Транспорт", 1964.
4. Анисченко В.В., Жеминек М.М., Пет А.В. Развитие методологии прогноз затрат на перспективные корабли и суда. СПб.: Моринтех - 96.
5. Антонов А.М., Дронов Б.Ф., А.В.Кутейников, Баранцев В.И., В.П.Виноградов. Архитектура подводной лодки: Учебное пособие, часть 2. СПб.: Изд.СПМБМ "Малахит", 1997.
6. Амик В.В. Проектирование судов. Л.: Судостроение, 1985.
7. Амик В.В., Богданов А.А., Мараева И.Б., Шебалин А.Н. Методы построения и согласования судовой поверхности с помощью ЭВМ. Л.: Судостроение, 1978.
8. Бабаков В.В. Проектирование поверхностей кривыми второго порядка. М.: Машиностроение, 1969.
9. Базилевский С.А. Проектирование подводных лодок: Конспект лекций. Л.: ВМАКВ им. А.Н.Крылова, 1954.
10. Батыров А.И., Ковыринов В.Д., Лейкин О.Ю. Корабельные ядерные энергетические установки зарубежных стран. СПб.: Судостроение, 1994.
11. Бреслав Л.Б. Технично-экономическое обоснование средств освоения мирового океана. Л.: Судостроение, 1982.
12. Бреслав Л.Б., Хатисов О.А. Военно-экономическое обоснование проектов подводных лодок. Методическое пособие. Л.: ЛКИ, 1978.
13. Бреслав Л.Б., Зарубин Э.П., Хатисов О.А. Оценка стоимости подводных аппаратов при проектировании. Методическое пособие. Л.: ЛКИ, 1982.
14. Бронников А.В. Проектирование судов. Л.: Судостроение, 1991.
15. Бубнов И.Г. Об одном методе определения главных размеров пил проектируемого судна. Ежегодник союза морских инженеров, т.1, 1916.
16. Букалов В.М., Нарусбаев А.А. Проектирование атомных подводных лодок. Л.: Судостроение, 1968.
17. Буров В.И. Отечественное военное кораблестроение в третьем столетии нашей истории. СПб.: Судостроение, 1995.
18. Быловский И.А. Атомные подводные лодки. Л.: Судпромгиз, 1963.
19. Быстров А.И., Лево А.Ф. Корабельные дизельные энергетические установки. Л.: 1989.
20. Векслар В.Я. Методология проектирования корабельных обводов и выступающих частей. СПб.: Вторая международная конференция по судостроению, Судостроение, 1998.
21. Власов В.Г. "Статика корабля". М., Воениздат, 1948.
22. Власов В.Г. Собрание трудов т.1., 2., 3. Л.: Судпромгиз, 1959-1966.
23. Геллер Т.К. Проектирование современного корабля. Л.: Судостроение, 1974.
24. Дасоли М.А., Азуф И.А. Современная теория свинцового аккумулятора. М.: Энергия, 1975.
25. Джордж Ч. Маннинг Теория и техника проектирования кораблей. М.: Воениздат, 1960.
26. Долгов В.И. Оптимизация параметров судовых ядерных энергетических установок. Л.: Судостроение, 1980.
27. Дронов Б.Ф., Кутейников А.В., Червоусов В.В. О коэффициенте Нормана для подводных лодок: Учебное пособие. СПб.: Изд.СПМБМ "Малахит", 1997.
28. Дронов Б.Ф., Антонов А.М., Кутейников А.В. и др. Архитектура подводной лодки: Учебное пособие, часть 1. Изд.СПМБМ "Малахит", 1997.
29. Дроботкин, А.И.Ермолов, Н.П.Муру и др. Справочник по теории корабля. М.: Воениздат, 1984.
30. Ефимьев Н.И. Основы теории подводных лодок. М.: Воениздат, 1965.
31. Ефремов К.П. Проектирование подводных лодок. Л.: ВВМИОЛУ им. Ф.Э.Дерявинского, 1959.
32. Забав А.В. Торжественное оружие. М.: Воениздат, 1984.
33. Классификатор ЕСКД класс 36 (Суда, судовое оборудование). Организация и правила контроля нагрузки. Положение 1988.

34. Карпенко А.В. Российское ракетное оружие 1943—1993 гг. Справочник. СПб.: Пиис, 1993.
35. Косячков В.Н., Сопельев М.В. Основы проектирования подводных лодок: Учеб. пособие. Л.: Изд. ЛКИ, 1954.
36. Косячков В.Н., Хатисев О.А. Проектирование подводных лодок. Вып. 4. Учеб. пособие. Л.: Изд. ЛКИ, 1983.
37. Киминин Д.С. Радиолографический метод проектирования и аналитического расчета сложных криволинейных поверхностей. Изд. Ростовского НИИПМ, 1962.
38. Корнилицын Ю.Н. Российский опыт создания подводных лодок с анзотробными энергетическими установками. // Военный парад. 1997.
39. Корнилицын Ю.Н., Бартоло Н.Л. Автоматизация проектирования, конструирования и технологической подготовки производства судов. // Технология судостроения. 1970. №4.
40. Корнилицын Ю.Н. Подводная лодка проекта 877. // Военный парад, июль—август, 1994.
41. Корнилицын Ю.Н. Подводная лодка проекта 636. // Военный парад, октябрь—ноябрь, 1994.
42. Корнилицын Ю.Н. Подводные лодки семейства "Амур". // Военный парад, январь—февраль, 1995.
43. Корнилицын Ю.Н. Состояние и перспективы развития неатомных подводных лодок России. // Вопросы проектирования ПЛ. Вып. 10, СПб.: ЦКБМТ «Рубин», 1996.
44. Корнилицын Ю.Н. Kilo Class Optimum performance for all naval scenarios. // Naval Forces. №6. ФРГ, 1995.
45. Корнилицын Ю.Н. Подводные лодки класса "Kilo". // African Defence №2, ЮАР, 1996.
46. Корнилицын Ю.Н. Experience of Russia in the guation of submarines with AIP. // Asian Defence Journal, май, 1997.
47. Корнилицын Ю.Н. "Схемы расположения и порядок размещения переменных грузов на зарубежных и советских ПЛ". Л.: ЦКБМТ "Рубин", 1977.
48. Корнилицын Ю.Н. Подводная лодка проекта 877, "Военный парад" июль-август, 1996.
49. Корнилицын Ю.Н., Пинегин А.Н., Хатисев О.А. Методы построения теоретического чертежа подводной лодки. Учебное пособие. СПбГМТУ. 1999.
50. Корнилицын Ю.Н., Хатисев О.А. Проектирование подводных лодок. Учебное пособие. Часть 1, СПбГМТУ, 1998.
51. Корнилицын Ю.Н., Хатисев О.А. Проектирование подводных лодок. Учебное пособие. Часть 2, СПбГМТУ, 1999.
52. Корнилов Ю.Л., Строганов А.А. Торпеды ВМФ СССР. СПб.: Гангут, 1994.
53. Кутам В.П., Никольский В.И. Военно-Морской Флот СССР 1945—1991. СПб.: Избранное Морское общество, 1996.
54. Кузин Р. Торпедные подводные лодки. М.: Воениздат, 1970.
55. Матвиенко Б.М. Современные тенденции развития ПЛ. Л. 1947.
56. Машков А.А., Павлов А.И. Опыт решения проблемных вопросов теории корабля при создании 2 и 3 поколений подводных лодок. Вопросы проектирования подводных лодок. СПб.: ЦКБМТ "Рубин", 1996.
57. Мурадян В.А., Прохман В.И., Селяков С.И. Неатомные подводные лодки с анзотробными энергетическими установками - новый этап в подводном кораблестроении. СПб.: Морвентех - 96.
58. Нарусов А.А. Введение в теорию обоснованных технических решений. Л.: Судостроение, 1976.
59. Нойзд Л.М. Теория проектирования судов. Л.: Судпромгиз, 1955.
60. Нойзд Л.М. Проектирование формы судна и построение теоретического чертежа. Л.: Судпромгиз, 1962.
61. Пашич В.М. Оптимизация судов. Л.: Судостроение, 1983.
62. Перловский В. Статика подводной лодки. Л.: ЛКИ, 1938.
63. Пинегин А.Н. Современные проблемы оптимизации формы наружного корпуса. СПб.: ЦКБМТ "Рубин", 1998.
64. Прудан А.А. Конструкции подводных лодок. М., Оборонгиз, 1947.
65. Прасолов С.Н., Ашман М.В. Устройство подводных лодок. М.: Воениздат, 1973.
66. Попов Г.И., Захаров И.Г. Теория и методы проектирования корабля. Л.: Изд. ВМА им. А.А.Греко, 1985.
67. Подводные лодки. Теория проектирования судов. Л.: Изд. ЛКИ, 1938, ч.1, 1939, ч.2.
68. Подводные лодки и их вооружение. Л.: Судостроение, 1983.
69. Подводные лодки зарубежных ВМС. Л.: Изд. ЦНИИ "Рубин", 1984.
70. Прохман В.А. Атомные подводные лодки XXI века СПб.: Морвентех - 96.
71. Ракин В.В. Судовые ядерные энергетические установки. Л.: Судостроение, 1976.

72. *Рождественский В.В.* Динамика подводной лодки. Л.: Судостроение, 1970.
73. *Рубенко В.М., Горбунов Н.М., Соловьев И.П.* Энергетические установки подводных лодок. М.: Воениздат, 1962.
74. *Савельев М.В.* Проектирование подводных лодок: Учеб. пособие. Вып.3. Л.: Изд. ЛКИ, 1981.
75. *Савельев М.В., Халилов О.А.* Военно-экономический анализ и его роль в проектировании подводных лодок. Учебное пособие. Л.: ЛКИ, 1980.
76. *Салайдаков Ф.Р., Чекалов Ю.Н., Чернецова Н.А.* Состояние и перспективы развития мирового рынка подводных лодок с неавтономными энергетическими установками. СПб.: Морнитех-98.
77. *Соловьев И.С., Рубенков Ю.Н.* Строительная механика подводных лодок. Л.: Изд. ВВМНОЛУ им. Ф.Э.Дзержинского, 1962.
78. *Спасский И. Д.* От "Дельфина" до "Гайфуна". // Военный парад, май-июль 1996.
79. *Спасский И. Д.* Подводные лодки XXI века. // Военный парад, сентябрь-октябрь, 1998.
80. Справочник конструктора подводных лодок. / Под ред. Б. М. Малахова. Т. 1. Л.: Судпромгиз, 1949.
81. *Томашевский В.Т., Асламханов О.Г., Ятсков В.С.* Прочность подводной лодки. СПб.: Изд. ВМА им.А.А.Гришко, 1994.
82. *Халилов О.А., Кисельников В.Н.* Проектирование подводных лодок. Вып.7. Учеб. пособие. Л.: Изд. ЛКИ, 1986.
83. *Халилов О.А., Кисельников В.Н.* Проектирование оперения подводных лодок: Учебное пособие. Л.: ЛКИ, 1984.
84. *Халилов О.А., Кисельников В.Н.* Замещение переменных грузов. Учебное пособие. Л.: ЛКИ, 1985.
85. *Халилов Л.П.* Развитие зарубежных подводных лодок и их тактик. М.: Воениздат, 1988.
86. *Халилов И.Н., Кисельников В.А.* и др. Подводные лодки России: история и современность. Владивосток: Уссури, 1996.
87. *Худяков Л.Ю.* Исследовательское проектирование кораблей. Л.: Судостроение, 1980.
88. *Худяков Л.Ю.* Подводные лодки XXI века. СПб.: Изд. СПМБМ "Машмет", 1994.
89. *Худяков Л.Ю.* Особенности надводной неоптоплаваемости бескингтовых подводных лодок. СПб.: Эльмор, 1994.
90. *Шляхтинский Ю.А.* Строительная механика подводных лодок. Л., Судпромгиз, 1948.
91. *Шароград А.Б.* Советские подводные лодки послевоенной постройки. М.: "Арсенал прессы", 1997.
92. *Щеголов А.Н.* Проектирование подводных лодок. Л., Судпромгиз, 1940.
93. *Яковлевский Л.Н.* Концепция модернизационного процесса в жизненном цикле подводных лодок. СПб.: Морнитех 97. Том 1, стр.193-195
94. *Polwar N., Noor J.* Submarines of the Russian and Soviet Navies 1718-1990. Naval Institute Press, Annapolis, 1991.
95. *Jane's Fighting Ships, 1945-1994.*
96. *Freidman N.* Submarine. Design and Development. London. Conway Maritime Ltd, 1983.
97. *Comey, Arnold* The development of a Computerized Conceptual Submarine Design Evaluation Tool. Auburn University, Alabama, 1973.
98. *Poy Barker and Louis Rydell.* Concepts in Submarine design. Cambridge University Press, 1994.
99. *Warship'88 international symposium-conventional naval submarines-London-may 1988.*
100. *Warship 91 international symposium on naval submarines 5, 13-15 May 1991 London, vol.1.*
101. *Warship'93 international symposium- naval submarines-London-may 1993.*
102. *Deon A. Rainis, Kenneth A. Mitchell* "Nuclear vs. Non-Nuclear Attack Submarine Powerplants", *Naval Engineers Journal*, May 1993, pp 224-231.
103. *Дивер И. Я.* Исследование операций. Л.: ВМА, 1969.
104. *Гольдман М. К.* Технологичность конструкций корпуса морских судов. Л.: Судостроение, 1984.
105. *Томашков А.А.* Подводные транспортные суда. Л.: Судостроение, 1965.
106. *Тяговые батареи для подводных лодок. Рекламный проспект фирмы "The Standard Batteries Limited".* Индия, 1996.
107. *Сердюков Г. Д.* Российские ПЛ IV поколения "Амур 1650". "Defence International", август 1998.
108. *Бодомин В. А.* Подводные лодки с единым двигателем. СПб.: "Тангут", 1998.
109. *Brajton Harris Edited by Water N Bojns.* The navy mimes book of submarines a political, social and military history. Berkley Books, New York, 1997.



Кормалитин Юрий Николаевич родился 1 июля 1932 г. в г. Хабаровске. Вырос в г. Владивостоке, где поступил на кораблестроительный факультет Дальневосточного Политехнического института, затем перевелся на второй курс Ленинградского Кораблестроительного института, который окончил 1956 г.

Работая с 1956 г. в ЦКБ МТ «Рубин», прошел трудовой путь от конструктора проектного отдела до Генерального конструктора подводных лодок и глубоководных технических средств с неограниченными энергетическими установками. Лауреат Государственных премий (1984 г. и 1998 г.). Кандидат технических наук (1988 г.). Академик Санкт-Петербургской Инженерной Академии (1995 г.). Главный конструктор дизель-электрических подводных лодок четырех поколений проектов 641, 641Б, 877, 877 и их модификаций.

Разработал и реализовал концепцию создания серии подводных лодок на основе единых принципов архитектурно-компоновочного исполнения с постоянно высокой боеспособностью при использовании модификаций комплектующего оборудования и радиоэлектронного вооружения при минимально возможном водоизмещении и низком акустическом поле. Автор многочисленных инженерно-конструкторских разработок, научных работ и изобретений. Доцент кафедры проектирования судов Санкт-Петербургского Государственного морского технического университета.



Хализов Олег Анатольевич родился 18 ноября 1944 г. в г. Казани. Вырос в г. Ленинграде. Окончил в 1970 г. кораблестроительный факультет Ленинградского Кораблестроительного института.

Работая с 1970 года на кафедре проектирования судов кораблестроительного факультета Ленинградского Кораблестроительного института, прошел путь от инженера научно-исследовательского сектора до доцента кафедры проектирования судов. Кандидат технических наук (1980 г.). С 1974 г. читает курсы лекций по проектированию подводных лодок и глубоководных аппаратов для студентов основных специальностей университета. С 1987 г. руководит специализацией «Подводное кораблестроение» на факультете «Кораблестроение и океанотехника».

Научные интересы связаны с вопросами проектирования и теории подводных лодок и аппаратов. Под его руководством выполнен ряд научно-исследовательских работ в обеспечение проектирования подводных лодок.

Автор более ста научных работ и изобретений, 19 учебных и учебно-методических пособий.