

Францев М. Э., к. т. н.
тел.: 8-903-717-31-25
gepard629@yandex.ru

Проектный анализ водоизмещающих однокорпусных противоминных кораблей из композиционных материалов

В настоящей статье выполнен проектный анализ характеристик противоминных кораблей из композиционных материалов отечественной и зарубежной постройки в интервале наибольшей длины 25,0–61,6 м. Представлен архитектурно-конструктивный тип однокорпусного противоминного корабля из композиционных материалов. Проектные характеристики противоминных кораблей выполнены в виде двух таблиц. Выполнены расчеты методами регрессионного анализа следующих характеристик: полного водоизмещения, удлинения, мощности главных двигателей, энерговооруженности (без вспомогательных двигателей и дизель-генераторов), относительной скорости в виде числа Фруда по водоизмещению. Изложены принципы конструирования и формования судовых корпусных конструкций из композитов.



Рисунок 1. Слева — направо, сверху — вниз: базовый тральщик проекта 1252 «Изумруд», рейдовый тральщик проекта 1258 «Корунд», речной тральщик проекта 1259 «Малахит», рейдовый тральщик проекта 10750 «Сапфир», экспортное исполнение рейдового тральщика проекта 10750Э, базовый тральщик проекта 12700 «Александрит»

Введение

Ни в одной области знания невозможно рассчитывать на значительное продвижение вперед, если не существует сложившейся и постоянно развивающейся системы взглядов на ее перспективу. Это утверждение относится и к кораблестроению из композиционных материалов.

Композитное кораблестроение в нашей стране — Союзе Советских Социалистических Республик до 1991 года находилось по мировым меркам на лидирующих позициях. Приоритет постройки первого отечественного серийного стеклопластикового противоминного корабля относится к 1966 году. В последующие десятилетия военные противоминные корабли из композиционных материалов по различным проектам строились крупными сериями, в том числе на экспорт [1]. По известным причинам в развитии отечественного композитного кораблестроения наступил более чем десятилетний перерыв.

В результате накопившихся проблем в отечественном судостроении возникла непростая ситуация. Между отработанными техническими решениями, применяемыми в отечественных проектных организациях при разработке проектов судов из компози-

онных материалов, и достижениями отечественной и зарубежной науки образовался разрыв, приводящий к возрастающему отставанию отечественного судостроения от мирового уровня.

Несмотря на это, отечественное судостроение по-прежнему располагает огромным потенциалом в области науки и технологий. Тому подтверждение серийное строительство композитных тральщиков проекта 12700 «Александрит» на Средне-Невском судостроительном заводе, а также постройка этим же предприятием головного тральщика из композитов по проекту 10750Э на экспорт. Однако для развития проектирования современных кораблей из композиционных материалов требуются все новые знания о передовых образцах этой морской техники, созданных в различных странах мира.

Проектирование крупной судовой корпусной конструкции из композитов представляет собой триединую задачу. Она состоит из проектирования собственно конструкции, проектирования технологии ее изготовления, а также проектирования композиционного материала для этой конструкции на базе определенных исходных материалов, выбор которых определяется технической и экономической целесообразностью. При создании перспективных



Рисунок 2. Слева — направо, сверху — вниз: тральщик класса Wilton, тральщик класса Hunt, противоминный корабль класса Sandown, противоминный корабль класса Tripartite, противоминный корабль класса Lerici, противоминный корабль класса Landsort

типов судов, которые не имеют близких прототипов в практике отечественного судостроения, возникает необходимость в связующем звене между внешней и внутренней задачами проектирования. Таким звеном является исследовательское проектирование. Его применение в разработке нового типа судна позволяет проектанту преодолеть разрыв между имеющимся у него опытом проектирования и технической эксплуатации других судов и экономически и технологически обоснованными требованиями, предъявляемыми к новому проекту.

На протяжении последних десятилетий произошла эволюция применения композиционных материалов. Остались в прошлом стеклопластиковые конструкции, воспроизводящие корпуса достаточно тихоходных кораблей из традиционных материалов. В основе конструкций корпусов скоростных кораблей, спроектированных по технологии «stealth», используются легкие высокопрочные комбинации, сочетающие композиты на основе стеклянных, высокомодульных и углеродных волокон.

Большинство корпусов кораблей как в нашей стране, так и за рубежом было построено по классической технологии контактного формования. Замена контактного формования на технологию вакуумной

инфузии стала поистине революционным техническим решением при постройке военных кораблей из композиционных материалов. Это позволило существенно уменьшить количество сотрудников, занятых непосредственно формовкой корпуса на стапеле, и одновременно повысить качество и механические характеристики судовых корпусных конструкций из композитов. Переход к технологии вакуумной инфузии также потребовал применения новых исходных материалов для композита корпуса. Необходимо отметить, что наша страна в этой области находится на передовых рубежах в мире, продолжая серийную постройку корпусов противоминных кораблей проекта 12700 «Александрит» методом вакуумной инфузии.

Нельзя обойти вниманием те возможности, которые дает применение композиционных материалов в конструкции кораблей. Применение современных композиционных материалов для судовых корпусных конструкций позволяет существенно снизить уровень физических полей, что важно именно для противоминных судов. Кроме того, применение современных композитов для корпусных конструкций позволяет повысить полезную нагрузку, которую несет корабль. Применительно к противоминным кораблям это повышение полезной нагрузки обе-

Таблица 1. Проектные характеристики противоминных кораблей из композиционных материалов

Название	Номер проекта	Длина габаритная, м	Длина расчетная, м	Ширина габаритная, м	Ширина расчетная, м	L/B	Осадка, м
«Малахит-2»	12592	25,00	23,15	4,50	5,06	4,57	0,94
«Корунд»	1258	26,10	24,20	5,90	5,30	4,57	1,38
«Малахит»	1259	26,40	24,40	4,40	5,30	4,61	0,88
«Сапфир»	10750	31,50	28,80	6,50	6,00	4,80	1,53
«Экспорт»	10750Э	32,40	29,72	6,90	6,24	4,77	1,75
Styrsö	—	36,0	32,90	7,90	6,78	4,76	2,20
«Изумруд»	1252	42,90	39,00	8,25	7,86	4,97	2,14
Wilton	—	46,00	41,64	8,50	8,24	5,05	2,30
Landsort	—	47,50	42,95	9,60	8,46	5,06	2,30
Bedok	—	47,50	42,95	9,60	8,46	5,06	2,30
Lerici	—	50,00	45,12	9,00	8,82	5,12	2,60
Tripartite	—	51,60	46,51	8,90	9,04	5,15	3,80
Sandown	—	52,50	47,29	9,00	9,16	5,16	2,30
Huon	—	52,50	47,29	9,90	9,16	5,16	2,90
Osprey	—	57,30	51,45	11,00	9,84	5,23	3,00
Hunt	—	60,00	53,78	10,00	10,20	5,27	3,40
«Александрит»	12700	61,60	55,15	10,30	10,40	5,30	3,10

спечивает применение новых, более современных видов вооружений, расширяет функциональные возможности кораблей.

Одной из целей выполненного проектного анализа является исследование изменения проектных характеристик противоминных кораблей на протяжении нескольких десятилетий.

Постановка задачи

Если проанализировать проектные характеристики построенных в мире противоминных водоизмещающих однокорпусных кораблей из композиционных материалов, то можно заметить, что большинство серийно построенных сначала в Советском Союзе, а впоследствии в России кораблей из композитов имеет длину в интервале 25,0–32,4 м (таблица 1).

Исключение составляют базовый тральщик проекта 1252 «Изумруд», имеющий длину 42,9 м, и базовый тральщик проекта 12700 «Александрит», имеющий длину 61,6 м. Базовый тральщик проекта 1252 «Изумруд» был первым в мире противоминным кораблем из композиционных материалов. Его создание не обошлось без достаточно большого количества трудностей, обусловивших сложности его последующей эксплуатации. Базовый тральщик проекта 12700 «Александрит» только вступает в эксплуатацию, поэтому какие-либо выводы делать преждевременно. Таким образом, отечественный опыт охватывает достаточно большое количество противоминных кораблей из композиционных материалов, имеющих ограниченные районы плавания (рейдовые тральщики) и небольшие размеры.

В то же время в мире построено достаточно большое количество противоминных кораблей из композитов,

имеющих размеры в диапазоне 46–60 м, неограниченный район плавания и достаточно обширный опыт проведения реальных противоминных операций. Их проектные характеристики представляют интерес для анализа. В этой статье мы оставим за границами анализа вопросы примененного на кораблях вооружения. Для обеспечения единства анализа мы включим в базу данных также проектные характеристики отечественных противоминных кораблей из композиционных материалов.

Детальное описание водоизмещающих однокорпусных противоминных кораблей из композитов отечественной постройки за период с 1966 по 1991 годы выполнено в [1]. Детальное описание водоизмещающих однокорпусных противоминных кораблей из композитов зарубежной постройки за период с 1972 по 2004 годы выполнено в [2–3].

Выполнен проектный анализ характеристик отечественных противоминных кораблей из композиционных материалов следующих проектов: базового тральщика проекта 1252 «Изумруд», рейдового тральщика проекта 1258 «Корунд», речного тральщика проекта 1259 «Малахит», речного тральщика проекта 12592 «Малахит-2», рейдового тральщика проекта 10750 «Сапфир», экспортного исполнения рейдового тральщика проекта 10750Э, базового тральщика проекта 12700 «Александрит». Внешний вид кораблей представлен на рисунке 1 [1].

Выполнен проектный анализ характеристик противоминных кораблей из композиционных материалов зарубежной постройки следующих классов: Tripartite (Франция-Бельгия-Нидерланды), Lerici (Италия), Huon (Австралия), Osprey (США), Landsort (Швеция), Bedok (Сингапур), Styrsö (Швеция), — а также тральщика класса Wilton, тральщика класса Hunt, противомин-

Таблица 2. Проектные характеристики противоминных кораблей из композиционных материалов (продолжение)

Название	Водоизмещение полное D, т	КПВ γ	Мощность N, л.с.	N/D, л.с./т	Экипаж, чел.	Скорость, узлы	Число Фруда, FrV
«Малахит-2»	64	0,580	470	7,34	10	12	0,287
«Корунд»	96,5	0,545	600	6,22	10	12	0,268
«Малахит»	64	0,563	470	7,34	10	12	0,287
«Сапфир»	135	0,511	705	5,22	14	12	0,253
«Экспорт»	169	0,521	758	4,49	14	10	0,203
Styrsö	205	0,418	700	3,14	18	13	0,256
«Изумруд»	320	0,488	2400	7,5	37	13,5	0,247
Wilton	450	0,567	3000	6,67	37	16	0,276
Landsort	360	0,431	5760	16	33	15	0,269
Bedok	380	0,455	5760	15,16	33	15	0,266
Lerici	620	0,600	1985	3,20	40	14	0,229
Tripartite	605	0,379	1860	3,07	40	15	0,246
Sandown	484	0,486	3046	6,29	40	13	0,222
Huon	720	0,573	1986	2,76	40	15	0,239
Osprey	918	0,605	3200	3,49	40	16	0,245
Hunt	765	0,410	3600	4,71	45	17	0,269
«Александрит»	890	0,500	5000	5,62	44	16	0,247

ного корабля класса Sandown (все – Великобритания). Внешний вид кораблей представлен на рисунке 2 [2–13].

Проектные характеристики противоминных кораблей из композиционных материалов приведены в таблицах 1 и 2.

Решение задачи

Архитектурно-конструктивные типы противоминных кораблей из композиционных материалов различаются в зависимости от размеров. При габаритной длине в интервале 25–32 м противоминные корабли имеют прямую верхнюю палубу с седловатостью в носовой части корпуса и фальшборт, доходящий до надстройки. Надстройка с плавными или гранеными обводами расположена на носовой половине корпуса, как правило, ближе к миделю. Ходовая рубка, расположенная в носовой трети корпуса, обычно имеет большие панорамные окна, которые обеспечивают хороший обзор как впереди по курсу корабля, так и по траверзу левого и правого борта. Машинное отделение (МО) располагается в кормовой половине корпуса, начинаясь практически от миделя. При этом МО занимает, по сути, все пространство корпуса до ахтерпика. На надстройке в корму от ходовой рубки расположена мачта. За надстройкой располагается участок палубы, предназначенный для противоминного вооружения. Там же размещены грузоподъемные приспособления. Артиллерийское вооружение обычно располагается в носовой части палубы перед ходовой рубкой.

Противоминные корабли больших размеров при габаритной длине в интервале 33–62 м обычно имеют длинный полубак, простирающийся на 2/3 длины корпуса и более. За полубаком расположена тральная площадка в кормовой части корпуса, огражденная

фальшбортом. Надстройка сдвинута в нос от миделя. Ходовая рубка закрытого типа с крыльями мостика по бортам. Машинное отделение располагается в кормовой половине корпуса, начинаясь практически от миделя. При этом МО занимает несколько отсеков в средней части корпуса. На надстройке в корму от ходовой рубки расположена мачта. За ней расположена дымовая труба. В корму от трубы — антенны радиоэлектронного вооружения и грузовые стрелы. Далее до транца находятся ростры, предназначенные для хранения противоминного вооружения, полностью занимающего кормовую часть. Там же размещены грузоподъемные приспособления. Артиллерийское вооружение, как правило, располагается перед ходовой рубкой.

Методами регрессионного анализа выполнены расчеты некоторых проектных характеристик противоминных кораблей из композиционных материалов. Эти расчеты позволяют сделать выводы о динамике изменения этих величин в зависимости от изменения размеров корабля. В качестве изменяемого параметра выбрана наибольшая (габаритная) длина корабля [14].

Изменение полного водоизмещения противоминного корабля из композиционных материалов по интервалу его наибольшей (габаритной) длины представлено на рисунке 3. В аналитическом виде оно может быть представлено аппроксимирующей функцией:

$$D = 0,0061L_n^{2,9037}$$

где: D — полное водоизмещение, т;
 L_n — наибольшая (габаритная) длина, м.

Представляет интерес удлинение корпуса, то есть

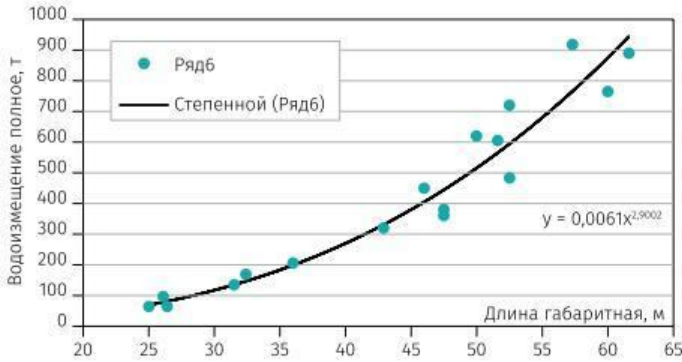


Рисунок 3. Изменение полного водоизмещения противоминного корабля из композиционных материалов по интервалу его наибольшей (габаритной) длины

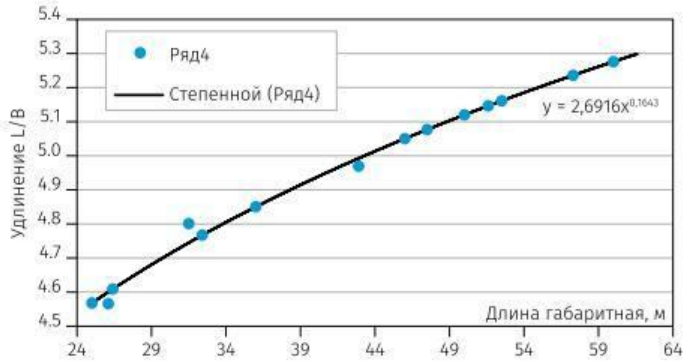


Рисунок 4. Изменение удлинения корпуса L/B противоминного корабля из композиционных материалов по интервалу его наибольшей (габаритной) длины

отношение его расчетной длины к расчетной ширине L/B . Оно представлено на рисунке 4.

В аналитическом виде оно может быть представлено аппроксимирующей функцией:

$$\frac{L}{B} = 2,6916L_n^{0,1643}$$

где: L/B — удлинение;

L_n — наибольшая (габаритная) длина, м.

Коэффициент полноты водоизмещения противоминных кораблей из композитов γ изменяется в достаточно широких пределах, и он практически не связан с геометрическими размерами корабля:

$$\gamma = 0,379 - 0,605$$

Устройство судовой энергетической установки противоминных судов имеет выраженную специфику, определяемую ходовыми режимами корабля при эксплуатации. Она, как правило, сочетает главные двигатели для обеспечения полного хода и вспомогательные двигатели для обеспечения движения с малыми скоростями при поиске и уничтожении мин. Скорость полного хода обычно составляет 10–17 узлов в зависимости от размеров корабля (у меньших кораблей скорость полного хода ниже). В режиме поиска и уничтожения мин корабли двигаются со скоростью 5–7 узлов. Поэтому судовой энергетической установка сочетает в себе один–четыре главных двигателя, предназначенных для полного хода. Кроме того, возможно использование еще одного вспомогательного двигателя, предназначенного для движения в режиме поиска мин. Также судовой энергетической установка включает три–четыре дизель-генератора для обеспечения энергоснабжением бортового электрооборудования. Необходимо иметь высокую маневренность на малых ходах обуславливает достаточное разнообразие движительно-рулевых комплексов. Здесь могут применяться винты изменяемого шага, активные рули, а также крыльчатые движители и подруливающие устройства.

Изменение мощности главных двигателей противоминного корабля из композиционных материалов по интервалу его наибольшей (габаритной) длины

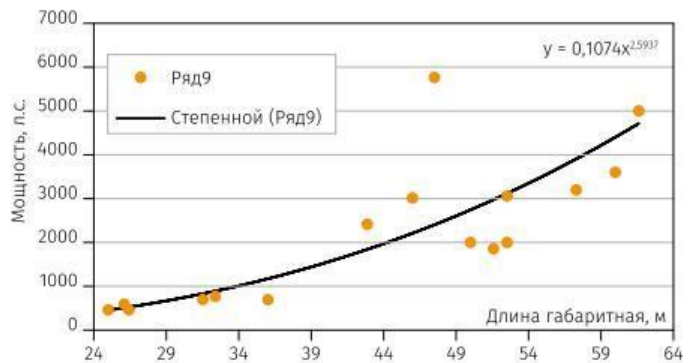


Рисунок 5. Изменение мощности главных двигателей противоминного корабля из композиционных материалов по интервалу его наибольшей (габаритной) длины

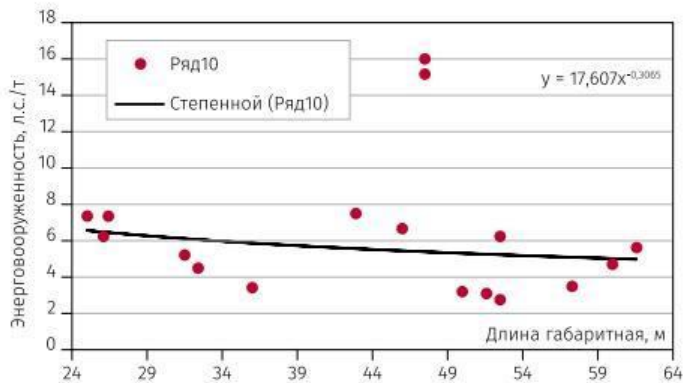


Рисунок 6. Изменение энерговооруженности противоминного корабля из композиционных материалов (без учета установленной мощности вспомогательных двигателей и дизель-генераторов) по интервалу его наибольшей (габаритной) длины

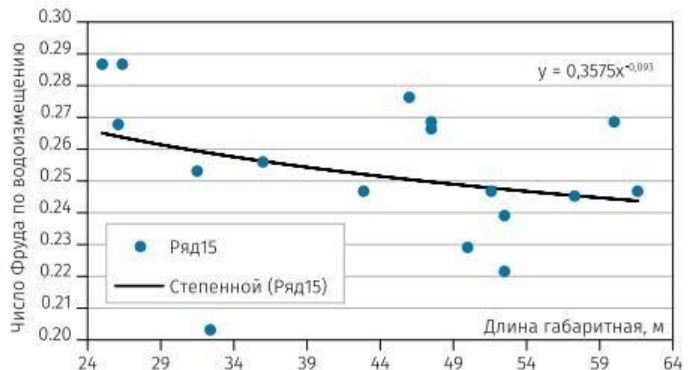


Рисунок 7. Изменение числа Фруда по водоизмещению противоминного корабля из композиционных материалов по интервалу его наибольшей (габаритной) длины



Рисунок 8.
Формование корпуса противоминного корабля из композиционных материалов на Средне-Невском судостроительном заводе

представлено на рисунке 5. В аналитическом виде оно может быть представлено аппроксимирующей функцией:

$$N = 0,1074L_n^{2,5937}$$

где: N — мощность, л.с.;
 L_n — наибольшая (габаритная) длина, м.

В этой связи представляет интерес изменение энерговооруженности противоминных кораблей из композиционных материалов (без учета установленной мощности вспомогательных двигателей и дизель-генераторов) по интервалу его наибольшей (габаритной) длины. Динамика изменения этой величины представлена на рисунке 6.

Несмотря на существенный разброс величин по отдельно взятым проектам кораблей, тем не менее просматривается тенденция к снижению энерговооруженности с ростом размеров и водоизмещения кораблей. В аналитическом виде оно может быть представлено аппроксимирующей функцией:

$$\frac{N}{D} = 17,607L_n^{-0,3065}$$

где: N/D — энерговооруженность, л.с./т;
 L_n — наибольшая (габаритная) длина, м.

Представляет интерес режим движения противоминного корабля из композиционных материалов с точки зрения волнообразования. Выполнен анализ скоростных проектных характеристик противоминных кораблей из композиционных материалов в виде числа Фруда по водоизмещению при скорости полного хода. Изменение числа Фруда по водоизмещению противоминного корабля из композиционных материалов по интервалу его наибольшей (габаритной) длины представлено на рисунке 7.

В аналитическом виде оно может быть представлено аппроксимирующей функцией:

$$Fr_V = 0,3575L_n^{-0,093}$$

где: Fr_V — число Фруда по водоизмещению;
 L_n — наибольшая (габаритная) длина, м.

Несмотря на существенный разброс величин по отдельно взятым проектам кораблей, тем не менее просматривается тенденция к снижению числа Фруда по водоизмещению с ростом размеров и водоизмещения кораблей.

Необходимо остановиться на некоторых проектных особенностях изготовления корпусов противоминных кораблей из композиционных материалов. Формование корпусов с самого начала выполнялось в металлической оснастке второго порядка. Первоначально композитные корпусные конструкции в основном воспроизводили корпусные конструкции из традиционных материалов (дерева, стали). В качестве армирующего материала корпуса была применена жгутовая стеклоткань — стеклорогожка. В качестве связующего применялась изофталеваая полиэфирная смола холодного отверждения. Наружная обшивка выполнялась сплошной, без вставок из вспененного материала. В отечественном композитном кораблестроении первоначально воспроизводились стальные Т-образные конструкции рамного продольного и поперечного набора. За рубежом набор изготавливался путём нанесения слоев стекловолокна на бруски полиуретанового пенопласта. До 1990-х годов корпуса противоминных кораблей изготавливались методом контактного формования. В дальнейшем все шире стала применяться вакуумная инфузия. Первоначально она применялась для изготовления отдельных корпусных конструкций. В настоящее время корпуса противоминных кораблей изготавливаются методом вакуумной инфузии целиком, включая наружную обшивку, толщина которой может достигать 50 мм. Кроме того, все шире стали применяться судовые корпусные конструкции в виде сэндвича [15].

Формование корпусов противоминных судов из композиционных материалов включает несколько основных этапов:

- формирование наружной обшивки;



Рисунок 9.
Формование корпуса противоминного корабля из композиционных материалов на Средне-Невском судостроительном заводе

- изготовление и установка в корпус продольных и поперечных переборок;
- изготовление и установка в корпус продольного и поперечного рамного набора;
- формирование палубы и установка ее на корпус;
- изготовление надстройки и установка ее на палубу корпуса.

Необходимо отметить, что композитное кораблестроение (то есть постройка военных кораблей из композиционных материалов) является высокотехнологичной, очень сложной в инженерном отношении отраслью судостроительной промышленности. В самых развитых судостроительных державах имеется ограниченное количество компаний, способных создавать военные корабли из композитов.

К числу таких компаний можно отнести Vosper Thornycroft (теперь VT Group, Великобритания), Kværner Mandal (теперь Umoe Mandal, Норвегия), Kockums AB (Швеция), Intermarine (Италия) и еще несколько подобных верфей. Среди этих центров компетенций вровень стоит отечественный Средне-Невский судостроительный завод совместно с ЦМКБ «Алмаз».

Заключение

В данной статье рассмотрены семнадцать проектов противоминных кораблей из композиционных материалов отечественной и зарубежной постройки, приведены их главные размеры и другие проектные характеристики. Выполнен расчет изменения в зависимости от размеров корабля следующих проектных характеристик противоминных кораблей из композитов:

- полное водоизмещение;
- коэффициент полноты водоизмещения;
- удлинение;
- мощность;
- энерговооруженность;
- число Фруда по водоизмещению.

Расчеты представлены в графической и аналитической форме. Описаны конструктивные элементы корпусов из композитов и основные технологические схемы их формирования. Приведены графические иллюстрации. **КМ**

Список использованных источников

1. Францев М. Э. Советские противоминные корабли из композиционных материалов // Compositebook. — 2019. — № 3. — С. 50–56.
2. Францев М. Э. Применение композиционных материалов в военном кораблестроении за рубежом. Часть I. Великобритания // Композитный Мир. — 2020. — № 1 (88). — С. 54–59.
3. Францев М. Э. Применение композиционных материалов в военном кораблестроении за рубежом. Часть 2. Континентальная Европа и Австралия // Композитный Мир. — 2020. — № 2 (89). — С. 32–35.
4. [en.wikipedia.org/wiki/HMS_Wilton_\(M1116\)](https://en.wikipedia.org/wiki/HMS_Wilton_(M1116))
5. www.naval-technology.com/projects/huntclass/
6. www.naval-technology.com/projects/sandown/
7. en.wikipedia.org/wiki/Tripartite-class_minehunter
8. en.wikipedia.org/wiki/Lerici-class_minehunter
9. [en.wikipedia.org/wiki/HMAS_Rushcutter_\(M_80\)](https://en.wikipedia.org/wiki/HMAS_Rushcutter_(M_80))
10. www.naval-technology.com/projects/landsort/
11. en.wikipedia.org/wiki/Landsort-class_mine_countermeasures_vessel
12. www.naval-technology.com/projects/styrso-classmine/attachment/styrso-classmine4/
13. [www.navalhistory.dk/English/TheShips/Classes/Holm_Class\(2006\).htm](http://www.navalhistory.dk/English/TheShips/Classes/Holm_Class(2006).htm)
14. Францев М. Э. Способ проектного обоснования главных элементов и других характеристик судов из композиционных материалов при помощи анализа баз данных // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия Морская техника и технология. — 2011. — № 3. — С. 37–46.
15. D. Hull and T. W. Clyne. An introduction to composite material. — Cambridge University Press, 1996. — 327 p.