



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Малинецкий Г.Г., Смолин В.С.

Подводные транспортные суда для транзитного коридора ЮВА – Европа в Северном Ледовитом океане

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Малинецкий Г.Г., Смолин В.С. Подводные транспортные суда для транзитного коридора ЮВА – Европа в Северном Ледовитом океане // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 242. 46 с. doi:[10.20948/prepr-2018-242](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-242)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-242>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

Г.Г. Малинецкий, В.С. Смолин

**Подводные транспортные суда
для транзитного коридора ЮВА–Европа
в Северном Ледовитом океане**

Москва — 2018

Г.Г. Малинецкий, В.С. Смолин

Подводные транспортные суда для транзитного коридора ЮВА–Европа в Северном Ледовитом океане

Освоение акватории Северного Ледовитого океана в качестве круглогодичного транспортного коридора из Юго-Восточной Азии в Западную Европу обеспечит экономические преимущества для России, сравнимые по значимости с каналами между океанами – Суэцким и Панамским. Экономически эффективная круглогодичная навигация на северном транспортном коридоре возможна при подводной схеме доставки грузов. Для снижения стоимости проекта предлагается постройка подводных судов из армированного бетона и железобетона, значительно более дешёвых и технологичных материалов по сравнению со сталью. Погрузку-разгрузку предлагается производить в лихтеры, надводные суда, а загрузку лихтеров в подводные транспортные суда осуществлять перед границей льдов. Открытие тяжёлых (более 10000 т) люков для погрузки лихтеров возможно в подводном положении транспортного судна, когда вес люков компенсируется силой Архимеда. В работе представлен системный анализ проекта, его экономическое обоснование, а также простые математические модели, необходимые для демонстрации эффективности подводного транспортного флота.

Ключевые слова: подводные транспортные суда, железобетон, армобетон, математическое моделирование, системный анализ, экономическое обоснование.

G.G. Malinetskiy, V.S. Smolin

Submarine transport vessels for the transit corridor Southeast Asia–Europe in the Arctic Ocean

The use of the Arctic Ocean as a year-round transport corridor from Southeast Asia to Western Europe can provide economic advantages for Russia, comparable to the exploitation of canals between the oceans – the Suez and Panama. Economically efficient year-round navigation along the northern transport corridor is possible with an underwater delivery of goods scheme. To reduce the cost of the project, it is proposed to build transport submarine from fiber and armature concrete, much more cheap and technological materials in comparison to steel. Load-unloading is proposed to be made in lighters, and loading of lighters into underwater transport ships is carried out before the ice border. Opening heavy (more than 10,000 tons) hatches for lighters loading is possible in the transport ship underwater position, when the weight of the hatches is compensated by Archimedes' force. The paper presents a system analysis of the project, its economic background, as well as the simple mathematical models needed to demonstrate the effectiveness of the submarine transport fleet.

Key words: underwater transport vessels, reinforced concrete, mathematical modeling, system analysis, economic background.

Оглавление

1	Введение.....	5
2	Перевозка грузов в чистой воде подо льдами	6
3	Новые идеи, направленные на достижение экономической эффективности коммерческих перевозок грузов подо льдами Северного Ледовитого океана.....	7
4	Лихтерная схема движения	7
	4.1 Маршрут Роттердам–Шанхай.....	7
	4.2 Проблемы, которые решает лихтерная схема перевозок.....	10
	4.3 Подводные транспортные суда для лихтерных перевозок	11
5	Выполнение корпусов подводных транспортных судов из армо- и железобетона.....	11
	5.1 Сила Архимеда	12
	5.2 Принципиальное отличие подводных транспортных судов от остальных транспортных средств.....	13
	5.3 Прочность. Элементарные представления.	13
	5.4 Преднапряжённый железобетон	16
	5.5 Армобетон.....	18
	5.6 Наномодифицированный бетон.....	19
6	Погрузка в подводные транспортные суда.....	20
7	Формирование составов подводных транспортных судов	21
	7.1 Размер имеет значение.....	21
	7.1 Конкурентоспособные подводные суда.....	22
8	Особенности движения судов под водой.....	24
	8.1 Навигация и связь.....	24
	8.2 Средства спасения.....	26
	8.3 Волновое сопротивление.....	28
	8.4 Высокое давление	29
	8.5 Высокотехнологичные решения.....	31
	Подводные средства навигации и связи	31
	Робототехнические решения.....	32
	Электротехнические решения на основе сверхпроводников	33
	МГД-двигатели	33

9	Приблизительные оценки экономической эффективности реализации проекта строительства и эксплуатации подводного транспортного флота	40
9.1	Оценка состава флота	40
9.2	Цена строительства отдельных судов	41
9.3	Общая сумма затрат на реализацию проекта	41
9.4	Сравнение стоимости проекта с аналогами	42
9.5	Оценка стоимости перевозок	42
9.6	Статьи эксплуатационных расходов	43
9.7	Оценка времени окупаемости проекта	44
9.8	Потери от задержки с началом проекта	45
10	Перспективы развития проекта	45
	Список литературы	46

1 Введение

Развитие Арктического региона входит в число приоритетных экономических задач РФ, что регулярно подчёркивается в выступлениях первых лиц государства (например, [1]). Освоение Северного морского пути и других маршрутов в акватории Северного Ледовитого океана является одной из важнейших составляющих этой задачи.

Круглогодичное использование акватории Северного Ледовитого океана в качестве транспортного коридора из Юго-Восточной Азии в Западную Европу сулит немалые экономические преимущества для России, сравнимые по значимости с эксплуатацией каналов между океанами – Суэцкого и Панамского, поскольку обеспечит коммерчески выгодный короткий северный путь между Атлантическим и Тихим океанами.

В настоящее время относительно свободное плавание судов осуществляется только на участке Северного морского пути (СМП) в течение летней навигации – с июня по октябрь. Ледовая обстановка в межнавигационный период требует дорогой ледокольной проводки с обременяющими ее низкими скоростями движения. Северный транзитный коридор в это время проигрывает более длинным южным морским путям как по срокам, так и по стоимости доставки.

Экономически эффективная круглогодичная навигация на северном транспортном коридоре возможна при подводной схеме доставки грузов. Идея неоднократно возникала с 50-х годов прошлого века, но реализовать её пока не удалось. Основные причины – очень дорого и имеется ряд технических проблем.

В качестве пути снижения стоимости проекта рассматривается построение подводных судов из армированного бетона и железобетона, значительно более дешёвых и технологичных конструкционных материалов по сравнению со сталью.

Технические проблемы, связанные с погрузкой-разгрузкой подводных транспортных судов, предлагается решать путём использования лихтерной схемы перевозок, когда в порт заходят лихтеры, надводные суда, соответствующие стандартам погрузки/разгрузки в портах. Загрузка лихтеров в подводные транспортные суда осуществляется на специально оборудованных пунктах в акватории с глубиной не менее 35-40 метров. Открытие очень больших и тяжёлых (10000 т и более) люков для погрузки лихтеров может быть осуществлено в подводном положении транспортного судна. За счёт регулирования наполнения балластных цистерн люкам можно обеспечить нулевую плавучесть, что делает их невесомыми в воде и позволяет осуществлять их перемещения с относительно небольшими усилиями.

Обсуждаются вопросы не только конструкции бетонных подводных транспортных судов, но и схемы организации перевозок. Описывается необходимая инфраструктура для круглогодичных бесперебойных перевозок

подо льдами Северного Ледовитого океана на рабочих глубинах от 50 до 200 м. Проводится экономический анализ затрат и сроков окупаемости проекта в целом.

Предварительные результаты экономического анализа (рассматривающего только вариант захвата 10% рынка контейнерных перевозок на маршруте ЮВА–Северная Европа) показывают, что при вложениях в 150-200 млрд руб. окупаемость проекта может составить 5-10 лет, и в дальнейшем он может приносить прибыль на уровне 20-50 млрд руб./год.

Если опыт реализации проекта окажется успешным, то захват большей доли рынка перевозок потребует в 1,5-2 раза меньших удельных вложений и затрат на эксплуатацию, что позволит в 2-3 раза сократить срок окупаемости и на 30-80% увеличит величину прибыли, получаемой на единицу вложений.

2 Перевозка грузов в чистой воде подо льдами

Идея создания подводных транспортных судов не нова и развивается уже более 150 лет. Затруднения судоходства в Северном Ледовитом океане связаны с наличием постоянного ледового покрова. Лёд у берегов Сибири и Америки ненадолго тает в конце лета – начале осени, но в остальное время года сковывает всю поверхность Северного Ледовитого океана, не подверженную влиянию Гольфстрима. При этом в центральной части Северного Ледовитого океана толщина многолетних льдов может составлять 10-15 м.

В этих условиях подводные суда могут быть эффективнее надводных: отсутствие льда и стабильная температура (в районе 0° С) на глубинах 50-100 м позволяет осуществлять перевозки вне зависимости от климатических условий на поверхности. В то время как ледокольная проводка сильно зависит от сезона и текущих погодных условий, требует использования транспортных судов высоких ледовых классов (Arc6-Arc8) и большую часть года проигрывает южным маршрутам как по стоимости, так и по времени перевозок.

Эксперименты с коммерческими перевозками грузов подо льдами Северного Ледовитого океана неоднократно проводились с использованием военных субмарин. С одной стороны, эти эксперименты продемонстрировали возможность таких перевозок, с другой стороны – их экономическую неэффективность, которая была обусловлена несколькими факторами, основные из которых таковы:

- низкая грузоподъёмность военных субмарин;
- сложность процесса погрузки-разгрузки, отсутствие его механизации;
- непригодность к заходу в мелководные порты.

Имеющиеся возможности для переоборудования военных субмарин в транспортные суда позволяют лишь несколько уменьшить влияние этих факторов, но не обеспечивают достижения экономической эффективности перевозок.

3 Новые идеи, направленные на достижение экономической эффективности коммерческих перевозок грузов подо льдами Северного Ледовитого океана

Для устранения факторов, препятствующих получению коммерческой выгоды от подводных перевозок, необходимо строительство специализированных транспортных подводных судов, что потребует больших затрат. Обеспечить экономическую эффективность этих затрат возможно при использовании следующих новых идей:

- использования лихтерной схемы с перевозкой лихтеров под водой только на ледовом участке маршрута;
- выполнение корпусов подводных транспортных судов из армо- и железобетона;
- открытие-закрытие люков для загрузки лихтеров в подводном положении;
- формирование составов подводных транспортных судов.

Каждая из перечисленных идей будет несколько подробнее описана ниже, хотя для реализации проекта все они требуют дополнительных научных исследований и опытно-конструкторских работ, но в случае успешного выполнения исследований и осуществления проекта позволят в полной мере использовать географические преимущества расположения России на берегу Северного Ледовитого океана, сравнимые по экономической значимости с эксплуатацией каналов между океанами – Суэцкого и Панамского.

4 Лихтерная схема движения

4.1 Маршрут Роттердам–Шанхай

Длина маршрута Роттердам–Шанхай через Северный Ледовитый океан составляет около 13100 км, из них покрыто льдом, в зависимости от сезона, от 3500 до 7500 км (рис. 1).

Это на 6,3 тысячи километров короче маршрута через Суэцкий канал, на 11,6 тысячи километров короче маршрута через Панамский канал и на 12 тысяч километров короче маршрута вокруг Африки (которым вынуждены следовать крупные контейнеровозы, не проходящие по размерам через каналы). Но в случае ледокольной проводки скорость движения по ледовым участкам замедляется в 3-5 раз, что не позволяет достичь выигрыша во времени перевозок более коротким северным маршрутом.

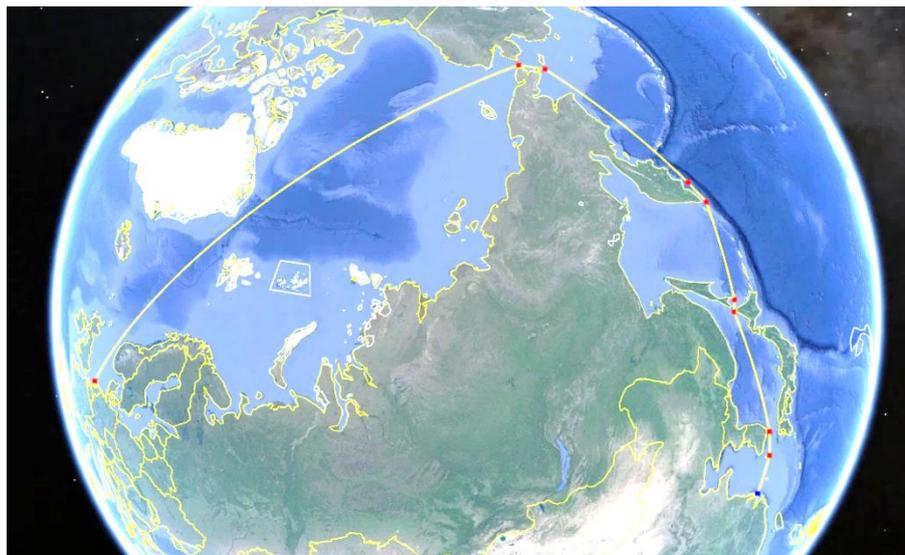


Рис. 1. Маршрут Роттердам–Шанхай.

Не любой маршрут по Северному Ледовитому океану (рис. 2) является Северным морским путём (СМП). Поскольку лёд в центральной части океана никогда не тает, сложилось несколько маршрутов вдоль его берегов. При возможности перевозок подо льдами естественно выбрать маршрут движения кратчайшим путём между Северной Европой и Беринговым проливом, по транзитному коридору.

Более короткий северный маршрут (не только транзитный коридор, но и СМП) даёт возможность экономить на расходах на топливо. И в конце лета–начале осени такая возможность реализуется. В остальное время года движению мешают льды, которые могут быть преодолены только с использованием ледокольной проводки.

Если бы ледоколы осуществляли проводку торговых караванов бесплатно, то экономия топлива на более коротких маршрутах была бы круглогодичной. Но высокая стоимость ледокольной проводки превосходит величину экономии на сокращении потребления топлива, что не позволяет говорить о снижении стоимости перевозок (по сравнению с южными маршрутами) большую часть года.

Даже более важным, чем стоимость, преимуществом перевозок более коротким северным маршрутом является сокращение времени доставки. И в период года, когда маршрут свободен ото льда, это преимущество реализуется. Но большую часть года необходима ледокольная проводка, которая характеризуется не только высокой стоимостью, но и относительно низкими скоростями движения ледоколов во льдах. Скорость движения крупных современных контейнеровозов составляет 45-50 км/час (24-27 узлов) и превосходит скорость осуществления ледовой проводки в 3-5 и более раз.

Ведутся исследования по увеличению скорости ледовой проводки [2], но пока что в экспериментах удаётся достичь скоростей не выше 6-9 узлов, практические скорости движения еще ниже.



Рис. 2. Морские пути в Арктике:

- **Арктический мост**
- **Северный морской путь**
- **Северо-Западный проход**
- **Транзитный коридор**

Учитывая, что протяжённость ледового участка СМП в зимнее время составляет более 7000 км (что составляет более трети длины южных маршрутов), только на преодоление льдов уходит больше времени, чем на весь южный маршрут. А ведь для того, чтобы доплыть до границы льдов, тоже требуется время.

Высокая стоимость и низкая скорость движения при ледокольной проводке торговых караванов судов заставляют выбирать пути с минимальными затратами на ледокольную проводку. В конце лета–начале осени вдоль побережий много участков открытой воды, а в остальное время на этих участках образуется однолетний лёд, который заметно тоньше многолетнего льда в центральной части Северного Ледовитого океана. Это приводит к тому, что в район северного полюса ходят только в спортивно-научных и туристических целях, а коммерческие перевозки осуществляют вдоль побережий.

Обеспечение возможности осуществления перевозок подо льдом позволит двигаться по транзитному коридору, который на 1,5-2 тысячи километров короче СМП. Но на участках маршрута, не покрытых льдом, (а они будут значительны в любой сезон) выгоднее перевозить грузы по поверхности. Это должно определить наиболее выгодную схему движения.

4.2 Проблемы, которые решает лихтерная схема перевозок

Важным вопросом для подводных транспортных судов является погрузка–разгрузка в портах. Основные причины нежелательности заходов подводных транспортных судов в грузовые порты:

- подводное судно имеет примерно вдвое худшее соотношение дедвейт/водоизмещение, что вдвое повышает удельные портовые сборы на единицу груза;
- большие габариты и осадка (по сравнению с надводными судами с аналогичным дедвейтом) затрудняют швартование и погрузочные работы;
- ядерная энергетическая установка и средства обеспечения её безопасности не соответствуют требованиям большинства грузовых портов.

Основным способом решения проблемы погрузки–разгрузки в портах должно стать использование лихтерной схемы перевозок, когда на погрузку в



Рис. 3. Схема движения по маршруту

порт заходят надводные лихтеры, а загрузка лихтеров в подводные суда осуществляется в открытом море (с применением свободноплавающих погрузчиков или подводных погрузочных станций).

Надводные лихтеры могут полностью соответствовать погрузочно-разгрузочным стандартам надводных судов.

В порты на загрузку–разгрузку заходят лихтеры на 1000-2000 контейнеров и по поверхности следуют в сторону зоны льдов.

Перед началом зоны льдов лихтеры загружаются в подводные транспортные суда и перевозятся подо льдами до свободной воды по другую сторону от зоны льдов (рис. 3).

Лихтеры проектируются и строятся согласно требованиям морских портов, предъявляемым к надводным судам, для обеспечения возможности эффективной механизированной погрузки–разгрузки.

Основная техническая проблема использования лихтеров – их загрузка в подводное судно для преодоления ледового участка маршрута.

4.3 Подводные транспортные суда для лихтерных перевозок

Требования к подводным судам состоят:

1. в обеспечении возможности подводной транспортировки лихтеров;
2. в создании системы эффективной погрузки–разгрузки лихтеров на подводные суда.

Выполнение этих требований, учитывая значительные размеры лихтеров, ставит сложные инженерные задачи. Но высказанные выше новые идеи:

- выполнение корпусов подводных транспортных судов из армо- и железобетона;
- открытие–закрытие люков для загрузки лихтеров в подводном положении;
- формирование составов подводных транспортных судов

– позволяют их решить.

5 Выполнение корпусов подводных транспортных судов из армо- и железобетона

Сложность в обеспечении возможности подводной транспортировки лихтеров состоит в том, что согласно требованиям морского реестра судоходства лихтеры должны обладать большой положительной плавучестью, более того – непотопляемостью...

Тем не менее, лихтер – надводное судно с положительной плавучестью в несколько десятков тысяч тонн – необходимо не только погрузить на борт подводного транспортного судна, но и обеспечить после этого нулевую плавучесть системы для режима подводного плавания.

Начнём с рассмотрения вопроса обеспечения нулевой плавучести.

5.1 Сила Архимеда

На тело, погружённое в жидкость, действуют две силы: сила Архимеда F_A и сила тяжести F_T . Если обозначить ρ_w, V_w и ρ_T, V_T плотность и объём вытесненной телом жидкости (воды) и тела соответственно, то

$$F_A = \rho_w * V_w; \quad F_T = \rho_T * V_T.$$

В зависимости от соотношения величин сил Архимеда F_A и тяжести F_T плавучесть может быть различной:

$F_A - F_T > 0$ — положительная плавучесть;

$F_A - F_T = 0$ — нулевая плавучесть;

$F_A - F_T < 0$ — отрицательная плавучесть.

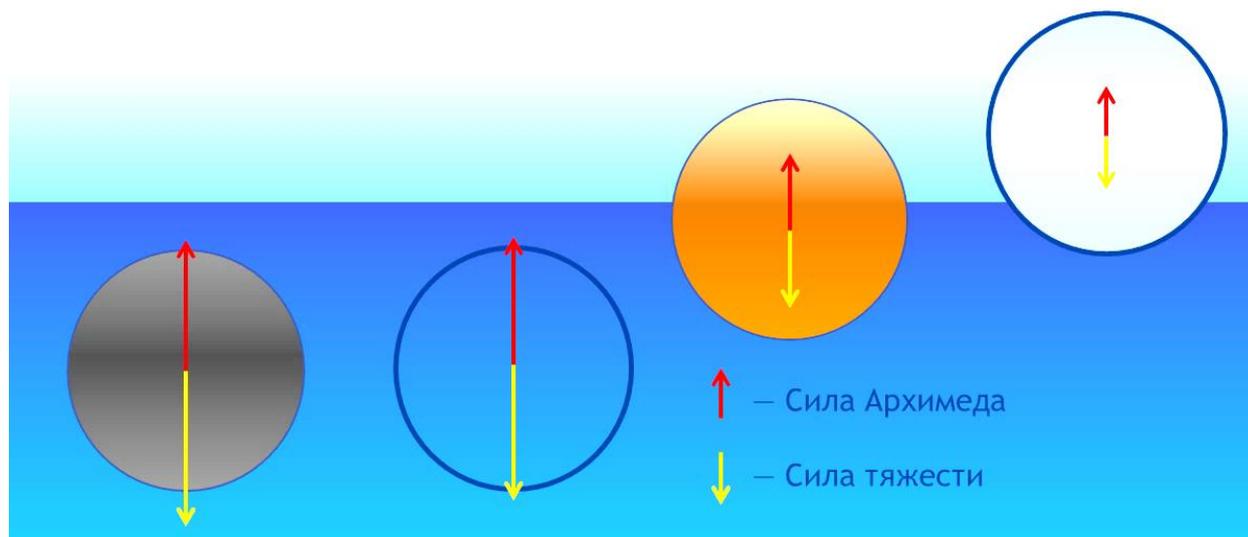


Рис. 4. Плавучесть тел

При положительной плавучести тело частично всплывает, так, чтобы объём тела, вытесняющего жидкость, создавал Архимедову силу, равную силе тяжести. При отрицательной плавучести тело идёт на дно. Для нейтрального нахождения тела в толще жидкости необходима нулевая плавучесть (рис. 4).

Для создания нулевой плавучести необходимо использовать два тела с противоположно направленной плавучестью, тяжёлое (с плотностью, превосходящей плотность жидкости) с отрицательной плавучестью и лёгкое, с положительной плавучестью. Сама жидкость (по определению силы Архимеда) обладает нулевой плавучестью и не может быть использована для достижения равновесия сил.

В контейнерных перевозках лёгким телом является груз, вес которого в одном контейнере не должен превышать 20 тонн при объёме стандартного контейнера (TEU) в 36 м³. Тяжёлым телом должен быть корпус подводного транспортного судна. Балластные цистерны необходимы для обеспечения надводного режима плавания судна – когда в них закачивается воздух, плавучесть корпуса повышается. Но когда в балластных цистернах вода, то уравновесить положительную плавучесть груза можно только за счёт отрицательной плавучести корпуса подводного судна.

И чем меньше средняя плотность груза, тем большей отрицательной плавучестью должен обладать корпус судна. Поскольку плотность материала, из которого изготавливается корпус, ограничена, для большого объёма груза с положительной плавучестью требуется использовать пропорционально большой объём материала с отрицательной плавучестью для изготовления корпуса.

5.2 Принципиальное отличие подводных транспортных судов от остальных транспортных средств

В грузоперевозках используются различные виды транспорта. При доставке груза в точку назначения приходит не только груз, но и средство его доставки. Затраты на перемещение транспортных средств относятся к расходам, которые желательно уменьшать – клиенты платят только за доставку груза.

Как правило, массу транспортных средств выбирают из соображений её минимальности при условии обеспечения прочностных и прочих эксплуатационных требований.

Редкое исключение из этого правила составляют подводные транспортные суда. Для них минимальная масса определяется требованиями достижения нулевой плавучести. В этом состоит принципиальное отличие от других видов транспорта – подводные транспортные суда нельзя делать лёгкими!

Это позволяет, вместо добавления балласта в корпус из стали, обеспечивающий необходимую прочность, выполнить корпус из менее прочного, но заметно более дешёвого железо- или армобетона с использованием более толстых элементов конструкции. При этом минимально необходимая масса будет набрана не балластом, а экономически эффективной по стоимости материала и технологичности изготовления конструкцией.

5.3 Прочность. Элементарные представления

Различают прочность на сжатие, разрыв и другие.

Прочность измеряется в единицах, аналогичных давлению, мегапаскалях, 1 МПа = 1000000 Па (Н/м²) \cong 10 атм. Сжатие корпуса судна производится за счёт давления воды, 1 МПа избыточного давления достигается на глубине в 100 м. Но поскольку давление воспринимается стенками судна, которые занимают

не весь объём судна, то силы сжатия, действующие на стенки, превосходят внешнее давление как отношение общей площади сечения к части этой площади, занятой стенками.

Для радиального и продольного давлений величина сжатия получается разной (рис. 5):

$$\sigma_{\text{прод}} = P_{\text{внеш}} \pi R_1^2 / 2\pi R_1 H = P_{\text{внеш}} R_1 / 2H;$$

$$\sigma_{\text{рад}} = P_{\text{внеш}} 2R_1 L / 2HL = P_{\text{внеш}} R_1 / H.$$

Если толщина стенки H составляет 10% от R_1 , то предел прочности на сжатие (для бетона строительных марок (М600 и выше) составляет 60 МПа) будет достигнут на глубине 600 м за счёт радиального сжатия (продольное сжатие меньше в 2 раза).

Даже такие элементарные представления о прочности позволяют рассчитать для простейшей цилиндрической конструкции корпуса глубину,

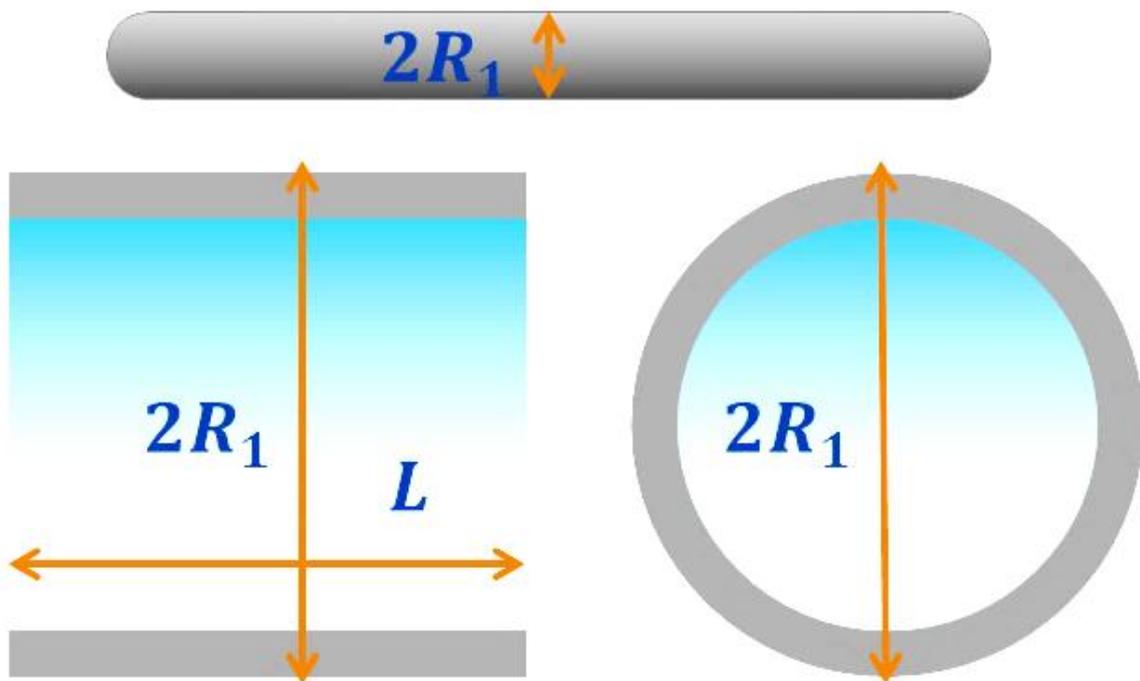


Рис. 5. Радиальное и продольное сечение цилиндра

давление на которой будет приводить к разрушению корпуса для различных сортов бетона в сравнении со сталью при различных плотностях перевозимых грузов.

Зависимость глубины разрушения корпуса от плотности груза определяется тем, что чем ниже плотность груза, тем толще должны быть стенки цилиндра для достижения нулевой плавучести судна. А чем толще стенки, тем выше прочность корпуса.

Таблица 1.

Глубина разрушения корпуса	Прочность на сжатие, мПа	Глубина при плотности груза 300 кг/м ³	Глубина при плотности груза 500 кг/м ³	Глубина при плотности груза 800 кг/м ³
Сталь	600	3221 м	2354 м	976 м
Особо тяжёлый железобетон	40	398 м	297 м	127 м
Особо прочный железобетон	180	2850 м	2177 м	973 м
Тяжёлый железобетон	60	996 м	763 м	343 м

Для обеспечения запаса прочности плавание допустимо на меньших глубинах, причём если, например, выбирать коэффициент запаса равным 3, то и допустимые глубины плавания будут в 3 раза меньше указанных в Таблице 1.

Подсчёт проводился для стали и бетона по отдельности. Использование железобетона и более рациональных, чем простой цилиндр конструкций способны заметно увеличить глубину, при достижении которой начинается разрушение судна.

Конструкционные материалы отличаются не только прочностью, но и другими характеристиками, такими как плотность и цена. Плотность учитывалась при расчёте необходимой толщины стенок цилиндра для достижения нулевой плавучести судна. Стоимость материала, необходимого для строительства судна на 1000 стандартных контейнеров (TEU), приведена в таблице 2.

Следует отметить, что бетон – не только более дешёвый, но и значительно более технологичный конструкционный материал. Стоимость изготовления корпуса судна, как правило, превосходит стоимость материала, из которого судно изготавливается. Затраты на изготовление корпуса судна из бетона значительно ниже, чем при строительстве стальных корпусов. Если только на стоимости материала при использовании бетона вместо стали при строительстве одного подводного судна для лихтера, перевозящего 1000 TEU экономия составит порядка 1 млрд руб., то экономия за счёт упрощения технологии производства корпусов будет в 2-3 раза выше. Если экономия 2-4 млрд руб. на строительстве одного подводного судна не кажется значительной, то при строительстве флота из 50 транспортных судов для обеспечения регулярности перевозок 100-200 млрд руб. уже составит заметную сумму, сильно влияющую на сроки окупаемости проекта и его коммерческую привлекательность в целом.

Таблица 2.

Стоимость материала конструкции	Плотность кг/м ³ и цена р/т конструкции	Стоимость при плотности груза 300 кг/м ³	Стоимость при плотности груза 500 кг/м ³	Стоимость при плотности груза 800 кг/м ³
Сталь	7000 кг/м ³ 40000 р/т	1143 млн руб.	817 млн руб.	327 млн руб.
Особо тяжёлый железобетон	4000 кг/м ³ 3000 р/т	98 млн руб.	70 млн руб.	28 млн руб.
Особо прочный железобетон	2700 кг/м ³ 7000 р/т	272 млн руб.	195 млн руб.	78 млн руб.
Тяжёлый железобетон	2600 кг/м ³ 2000 р/т	80 млн руб.	57 млн руб.	23 млн руб.

5.4 Преднапряжённый железобетон

Технология создания бетонных конструкций постоянно развивается, и современные железобетонные конструкции заметно превосходят по своим свойствам первые железобетонные сооружения. Кроме улучшения состава бетонной смеси, наиболее широко используемыми прогрессивными решениями являются преднапряжённый железобетон и армобетон.

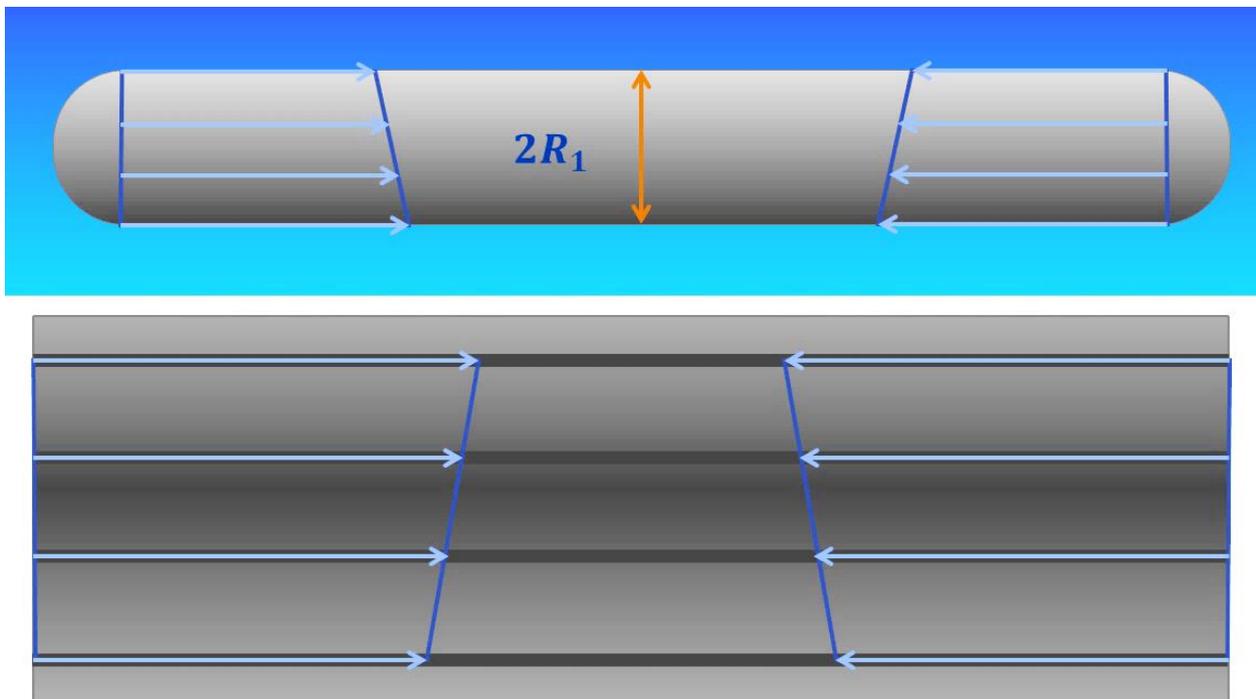


Рис. 6. Компенсация внешних моментов продольным преднапряжением

Хорошо известно, что прочность бетона на сжатие в 3-4 раза превосходит прочность на разрыв. Особенно опасно образование трещин при разрывных нагрузках для бетонного корпуса подводного судна.

Хотя корпус подводного судна испытывает в основном нагрузки на сжатие, тем не менее внешние силы могут создавать изгибающие воздействия, которые могут вызвать появление растягивающих нагрузок (рис. 6).

Преднапряжение железобетона переводит растягивающую нагрузку в уменьшение напряжения. При этом нагрузка сжатия суммируется с преднапряжением. Преднапряжением можно создавать моменты сил, противоположные внешним моментам, которые будут воздействовать на конструкцию. Продольное преднапряжение не ухудшит прочностных свойств судна, поскольку продольное сжатие давлением в 2 раза меньше радиального.

Железобетон уже более 150 лет применяется в судостроении ([3], [4]).

В РФ также существуют организации, занимающиеся разработкой и строительством бетонных судов. Одной из ведущих является ЦКБ «Монолит» [5], которое занимается проектированием композитных и металлических плавучих причалов, доков (рис. 7), судов технического флота, судов



Рис. 7. Продукция ЦКБ «Монолит»

рекреационного назначения, переоборудованием и модернизацией бывших в эксплуатации судов, проектированием и разработкой технологии строительства морских сооружений из железобетона для освоения континентального шельфа, выполнением научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области железобетонного судостроения и судоремонта в собственной аккредитованной лаборатории.

Значительное место в деятельности ЦКБ «Монолит» занимает решение вопросов создания железобетонных технических средств в условиях северных морей. Основные работы в данной области направлены на создание средств освоения континентального шельфа, таких как морские платформы,

искусственные острова, объекты для хранения и переработки углеводов и прочие.

5.5 Армобетон

Армобетон – это материал сродни железобетону. Изготавливается он из цементно-песочного раствора с использованием армирующих волокон. Это придаёт ему повышенную прочность на разрыв, а главное – значительно уменьшает вероятность появления микротрещин.

Можно выделить два основных вида армирования бетона — при помощи непрерывных нитей, то есть сеток или тканей, и при помощи небольших отрезков волокон, так называемых фибр. Фибробетон более прогрессивен, прежде всего потому, что традиционная арматура обеспечивает двухмерное укрепление бетона, а введение в цемент фибр даёт трехмерное укрепление.

Для получения фибробетона используется металлическая фибра (проволока), стекловолокно, синтетическое волокно (нейлоновое, полиэтиленовое, полипропиленовое). Для ряда задач наиболее эффективным считается применения минеральных волокон – базальтового и асбестового. Кроме низкой стоимости, эти волокна обладают и другим важным качеством – устойчивостью к высоким температурам. Это делает фибробетон на основе минеральных волокон более пожароустойчивым даже по сравнению с традиционным железобетоном.

Введение в бетон фибр позволяет преодолеть один из главных недостатков бетона — низкую прочность на растяжение и изгиб. Армирующие волокна принимают на себя растягивающее напряжение, и сопротивление растяжению возрастает до 250%. Фиброволокно способствует равномерному распределению влаги в бетоне, вследствие чего снижаются внутренние напряжения, в два раза повышается трещиностойкость и до 12 раз — ударная прочность бетона. В фибробетоне образуется гораздо меньше водных каналов и капилляров, чем в обычном бетоне. Этим обуславливается его высокая морозостойкость. Также нужно отметить устойчивость фибробетона к воздействию агрессивных сред.

Фибробетон на сегодняшнее время получил широкое распространение. Он используется практически повсеместно, в том числе и при строительстве промышленных кровель, для усиления плавучих конструкций. Наибольшее применение фибробетон нашёл при создании подводных газопроводов.

Диаметр подводных газопроводов 1153 мм, а для защиты его наружных стен используется обетонирующий слой до 11 сантиметров (рис. 8). Именно фибробетон и выступает не только утяжелением, но и защитой подводных трубопроводов, так как его прочность на разрыв значительно выше обычного железобетона.

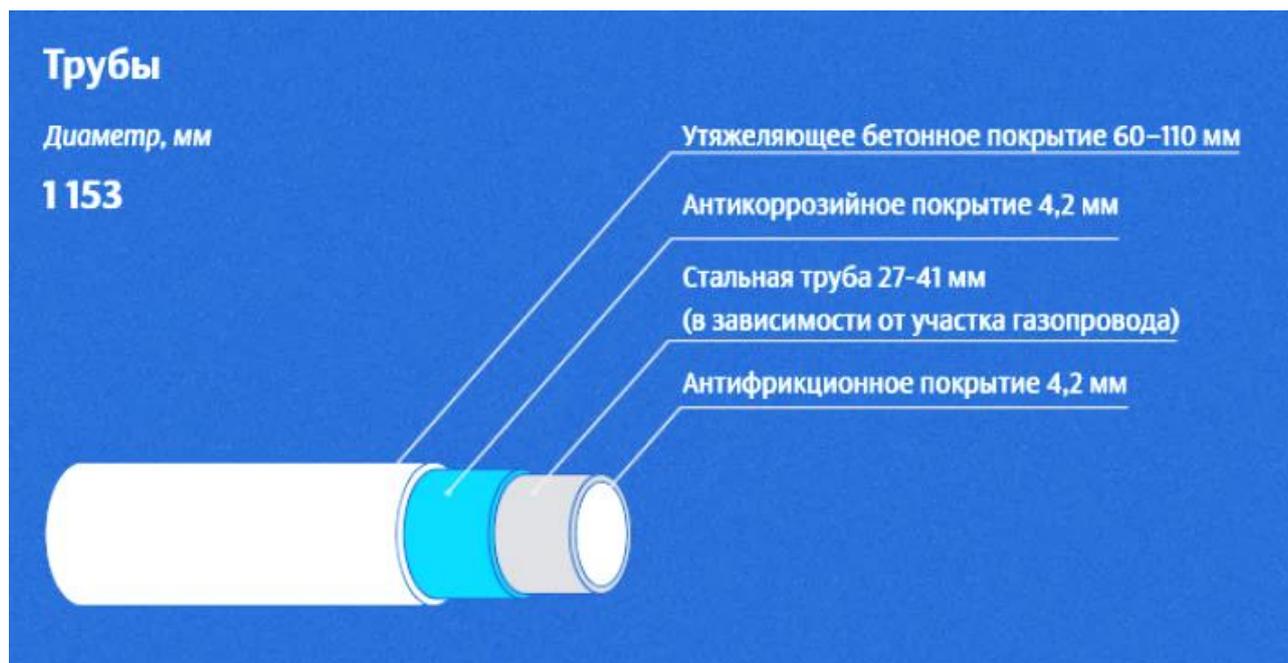


Рис. 8. Структура трубы подводных газопроводов [6]

5.6 Наномодифицированный бетон

Наномодифицированный бетон представляет собой широкую гамму композитных материалов на основе бетонов новых поколений с выдающимися характеристиками за счёт использования эффектов управления параметрами этих композитов, задаваемых на наноразмерном уровне. В настоящее время основными направлениями развития технологий нанобетонов могут быть следующие [7, 8, 9]:

- повышение параметров минеральных вяжущих за счет управления их дисперсностью и структурой на наноразмерном уровне;
- оптимизация в сочетании наполнителей различной дисперсности, в том числе нанодисперсных;
- применение активных наноразмерных наполнителей;
- введение наноразмерных элементов-зародышей направленной кристаллизации цементного камня;
- динамическое дисперсное армирование;
- управление подвижностью и водоредуцированием бетонных смесей за счет модификации пластификаторов бетонных смесей;
- создание нанокompозитной некорродирующей, огнестойкой и высокопрочной арматуры;
- использование возможностей ряда специализированных наноматериалов, в том числе фуллероидных, для повышения эксплуатационного ресурса различных защитных покрытий, в том числе базальтопластов и элементоорганических гидрофобизаторов отделочных материалов.

6 Погрузка в подводные транспортные суда

При анализе эффективности использования лихтерной схемы подводных перевозок не менее важным вопросом, чем обеспечение нулевой плавучести системы лихтер–подводное судно, является организация погрузки лихтеров в подводные транспортные суда.

Одной из основных причин невозможности использования подводных лодок ВМФ для транспортных перевозок без переделок является отсутствие у них средств механизации погрузки/разгрузки. Прочный корпус военных субмарин просто не имеет достаточно больших люков, которые могли бы позволить механизировать процесс погрузки, не говоря уже о возможности загружать в прочный корпус груз в стандартных контейнерах.

Открытие больших створок в надводном положении крайне проблематично. Поскольку для обеспечения тройного запаса прочности на глубинах 200-300 м они должны быть способны выдерживать давление в 60-100 атмосфер (что составляет 60-100 кг/см² или 600-1000 т/м²), их вес для обеспечения противодействия такому давлению будет очень велик.

В подводные суда для лихтерной схемы перевозок необходимо загружать даже не контейнеры, а лихтеры на 1000-2000 стандартных контейнеров (грузоподъемностью в 20-40 тысяч тонн). Линейные размеры сечения таких лихтеров будут составлять десятки метров, а вес люков для их погрузки (соответствующих размеров) будет составлять даже не тысячи, а десятки тысяч тонн.

Единственная возможность открывать и закрывать большие створки есть в подводном положении. При расположении в объеме створок балластных цистерн им может быть обеспечена нулевая плавучесть, что эквивалентно компенсации силы тяжести силой Архимеда.

Ещё одна проблема состоит в том, что если подводному судну обеспечить нулевую плавучесть, то лихтер оно под воду не утащит, а если лихтер над водой – створки закрыть невозможно.

Необходимо использовать расположенные на небольшой глубине (30-100м) станции для затягивания системы под воду, где подводное судно с нулевой плавучестью сможет закрыть створки, а уже затем заполнить балластные цистерны и своей отрицательной плавучестью компенсировать положительную плавучесть лихтера.

Тогда процедура выгрузки лихтера из судна должна выглядеть следующим образом (рис. 9):

- подводное судно крепится к подводной базе;
- прокачкой балластных цистерн судно обеспечивает свою нулевую плавучесть;
- раскрывает невесомые в воде створки;

- подводная база стравливает тросы, позволяя судну всплыть;
- судно отцепляет лихтер, и он уплывает.

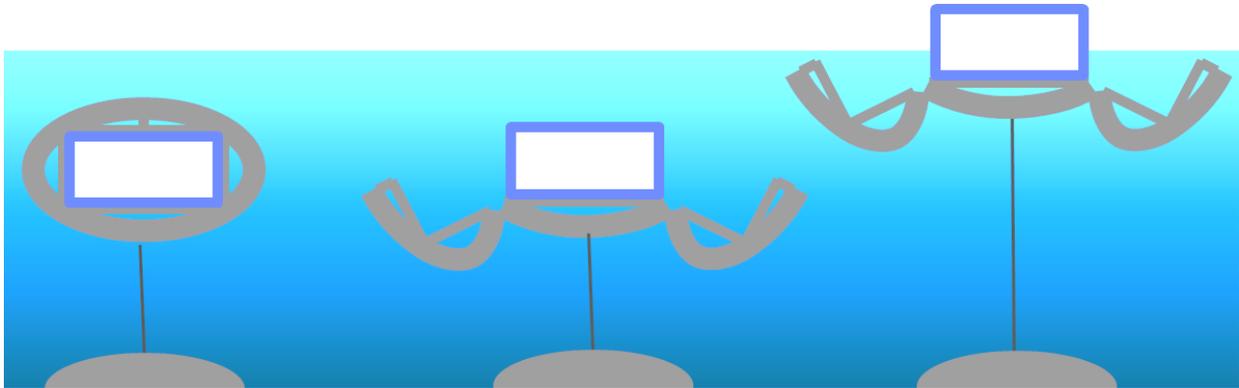


Рис. 9. Процедура выгрузки лихтера из судна

Процедура погрузки лихтера в судно проходит в обратном порядке:

- подводное судно зацепляет приплывший лихтер;
- подводная база наматывает тросы, погружая судно с лихтером;
- судно закрывает невесомые в воде створки;
- закачкой балластных цистерн обеспечивается нулевая плавучесть судна с лихтером на борту;
- подводное судно открепляется от подводной базы и уплывает.

7 Формирование составов подводных транспортных судов

7.1 Размер имеет значение

Рост линейных размеров судов ограничен, в первую очередь, осадкой, позволяющей заходить в порты и проходить проливы и каналы.

При росте линейных размеров судна его площадь сечения растёт по квадрату, а объём растёт по кубу от линейных размеров. Значит, если для 30-метрового судна сделать аналог длиной 300 м, то сопротивление движению аналога возрастёт в 100 раз (по сравнению с оригиналом), а грузоподъёмность – в 1000 раз. То есть затраты на перевозку груза обратно пропорциональны размерам судна.

Более крупные суда также менее восприимчивы к волнению на море (рис. 10), при наличии автоматизации им требуется меньший экипаж на единицу груза, и в целом крупнооптовые перевозки экономичнее по целому ряду затрат.

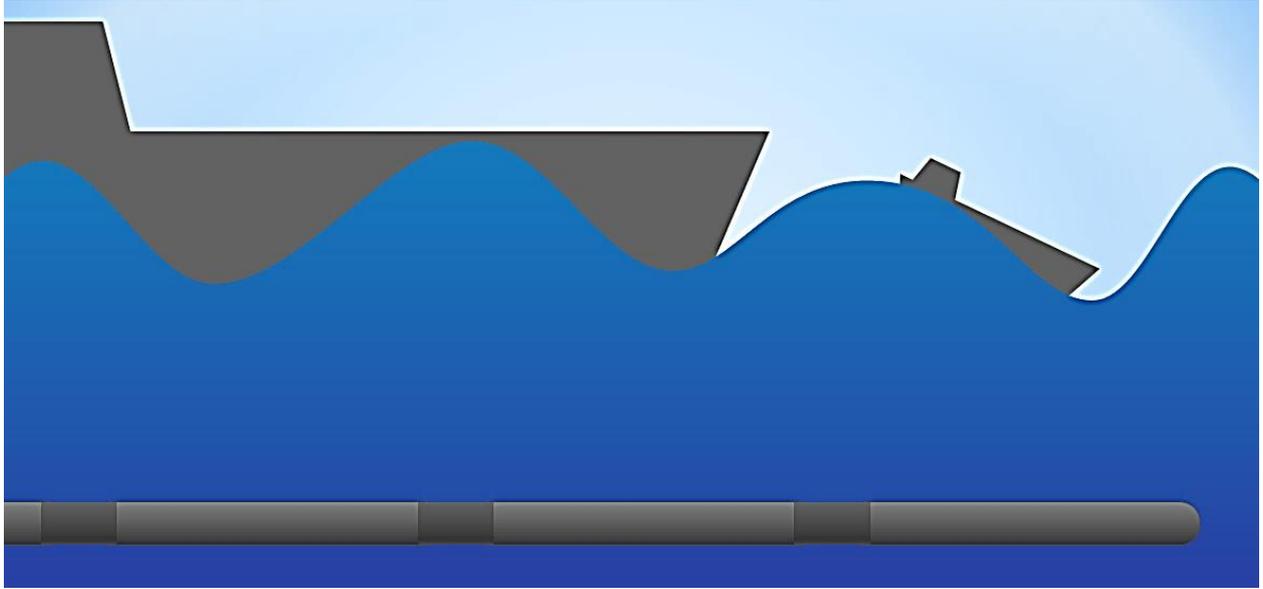


Рис. 10. Крупные и мелкие суда в штормовом море.

Всё вместе это приводит к общемировой тенденции к увеличению размеров транспортных судов. С подводными судами всё несколько сложнее. У них большая относительная осадка и для хорошего сопротивления высоким давлениям необходимо использовать форму корпуса, близкую к цилиндрической. Это позволяет говорить о том, что размеры подводных транспортных судов всегда будут уступать размерам надводных гигантов.

7.1 Конкурентоспособные подводные суда

Реальными можно считать следующие размеры подводного судна цилиндрической формы: длина 100-200 м, диаметр цилиндра 20-25 м. На других маршрутах диаметр может быть немного больше, но необходимость прохождения Берингова пролива, глубина фарватера которого составляет 35 м, не позволяет рассчитывать на большие вертикальные размеры. В подводное судно приведённых выше размеров можно поместить порядка 1-2 тысяч

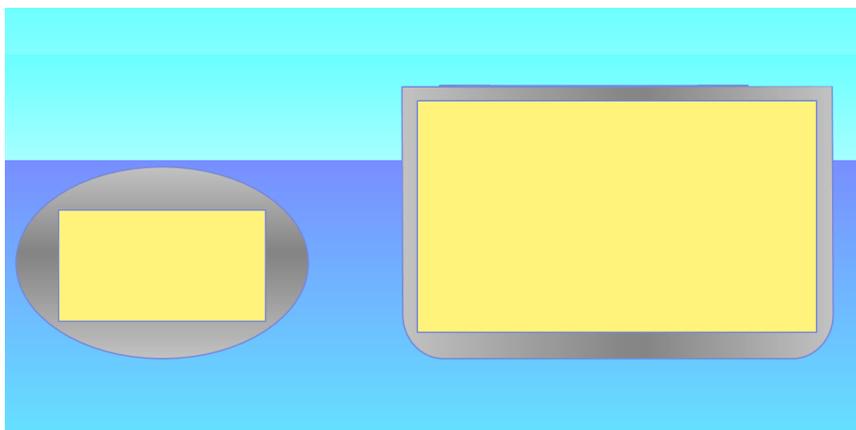


Рис. 11. Сечение грузовых отсеков надводного и подводного судов.

стандартных контейнеров (TEU). Такой объём перевозимого груза недостаточен для конкуренции с контейнеровозами на 15-19 тыс. TEU (рис. 11).

Для обеспечения возможности перевозки большего количества контейнеров за один рейс необходимо формировать составы из нескольких подводных судов («вагонов»), управление движением которых осуществляет «локомотив» (рис. 12).

Создание подводных составов – сложная техническая задача, но её успешное решение позволит получить дополнительные преимущества при перевозках.

В первую очередь, это распараллеливание погрузки/разгрузки относительно небольших «вагонов», что позволит осуществлять её быстрее, чем сосредоточенную в одном месте обработку грузов огромных надводных судов.

Во-вторых, состав может одним рейсом доставлять «вагоны» не в единственный порт назначения, а в несколько расположенных по соседству портов. Аналогично и формироваться состав может из нескольких терминалов. Более того, как это принято на ж/д транспорте, «вагоны» могут достигать

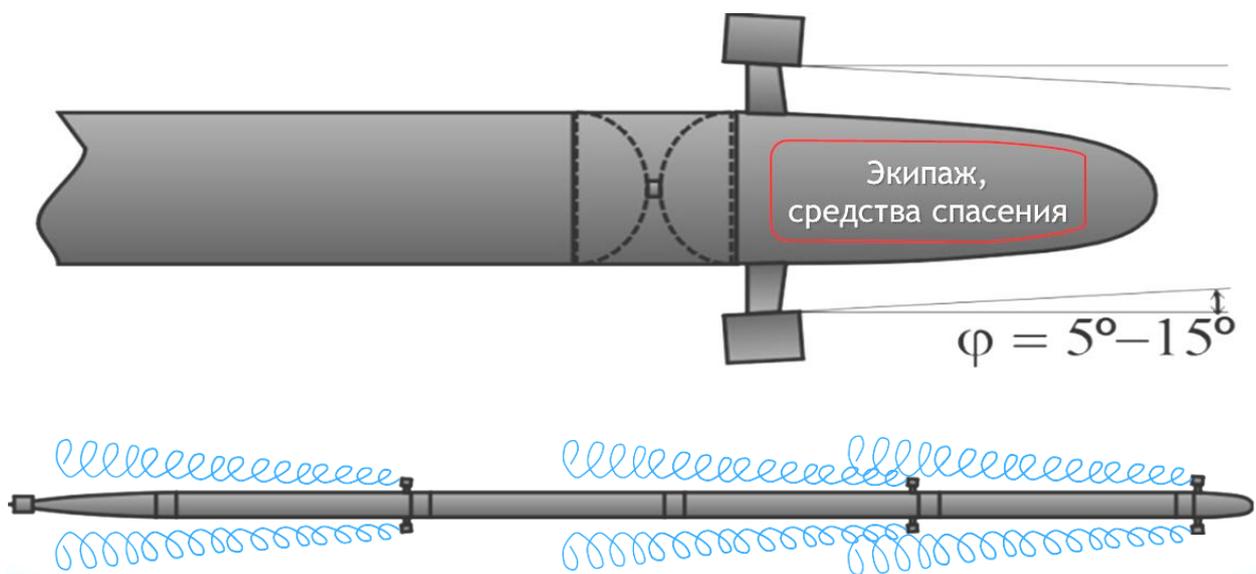


Рис. 12. Состав из нескольких подводных судов

своего назначения, передвигаясь последовательно в нескольких составах.

Кроме перечисленных логистических преимуществ, организация подводных судов в состав позволит заметно снизить лобовое сопротивление, что выльется в значительные повышение скорости движения и экономию топлива.

Управление движением подводных транспортных судов может осуществляться различными средствами. Это и регулировка плавучести, и управляющие поверхности, и силовые приводы сочленений (рис. 13).

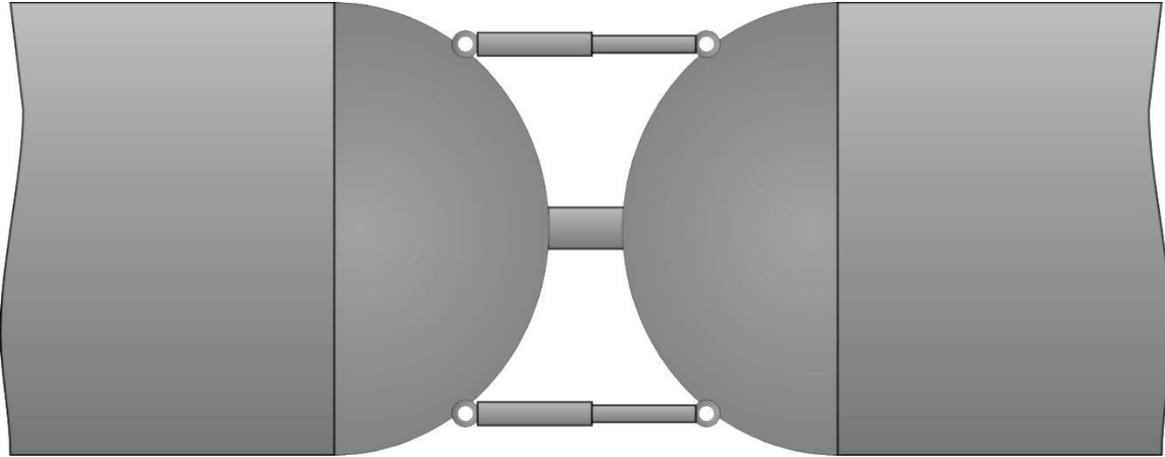


Рис. 13. Гидроприводы управления движением состава между вагонами – силовые приводы сочленений

8 Особенности движения судов под водой

Обеспечение надёжной эксплуатации подводных судов в целом является заметно более сложной технической задачей по сравнению с надводным движением. Подводное перемещение грузов создаёт как дополнительные трудности, которые у надводных судов отсутствуют, так и имеет некоторые преимущества. И связаны они не только с круглогодичным отсутствием ледовых полей на глубинах свыше 50-100 м.

К выше рассмотренным трудностям следует добавить сложности навигации под водой. Также большую опасность представляет возникновение внештатных ситуаций, особенно при движении подо льдами, что предполагает использование более развитого, по сравнению с надводными судами, комплекса средств спасения.

Преимущества подводного плавания связаны с движением в однородной среде (в отличие от движения по границе двух сред для надводных судов) и более высоким давлением воды (увеличивающимся с ростом глубины). Оба этих фактора улучшают гидродинамику обтекания корпуса судна и повышают эффективность работы движителей – гребного винта или МГД-двигателя.

8.1 Навигация и связь

Хорошо известно, что традиционные средства навигации и связи, основанные на радиообмене, под водой не работают, поскольку радиоволны в пусть слабо, но проводящей среде быстро затухают.

Значительно лучше распространяются в водной среде акустические волны. Они сильно проигрывают радиоволнам по информационной ёмкости и

скорости распространения, зато могут передавать сигналы на десятки и даже сотни километров в водной среде. При дальности передачи навигационных сигналов порядка 150 км на маршрут подо льдами в 7,5 тысяч км необходимо около 120 ультразвуковых маяков (для обеспечения зон перекрытия сигналов на случай выхода из строя отдельных маяков). Также никто не отменял традиционно используемые в подводных судах инерционные средства навигации и определения положения на основе эхолокации рельефа дна.

Все вместе средства навигации позволят надёжно двигаться вдоль маршрута даже при выходе из строя нескольких последовательно расположенных ультразвуковых маяков. Но такая ситуация уже должна рассматриваться как аварийная и инициировать ремонт и приведение в рабочее состояние автономных ультразвуковых маяков.

Ультразвуковой обмен позволяет не только передавать навигационные сигналы, но и обмениваться короткими (по объёму передаваемой информации) сообщениями. Основным назначением такого канала связи может стать передача аварийных сообщений о характере и месте происшествия.

Современные средства связи (со скоростями передачи 10-100 Мб/с) могут быть основаны на использовании лазерных лучей. Такие лучи также имеют хорошую дальность распространения в морской воде, сравнимую с дальностью ультразвуковой связи. После установления контакта с очередным ультразвуковым маяком появляется возможность направить лазерные лучи судна и маяка на приёмники лазерного луча маяка и судна и осуществлять информационный обмен на современных скоростях, включая выход в интернет.

Естественно, что для обеспечения связи маяки должны иметь постоянный выход на информационные сети. Распространение информации по цепочке маяков может быть задублировано с двух сторон цепочки, но всё равно не решает общей проблемы надёжности в случае обрыва цепочки в двух местах. Повышение стабильности и отказоустойчивости высокоскоростной связи может быть основано на использовании радиомаяков, расположенных на поверхности и имеющих радиосвязь с континентом и ультразвуковую и лазерную связь с 2-3 подводными маяками. Необязательно каждый подводный маяк должен иметь прямую связь с надводным, но использование даже 3-5 дополнительных информационных входов в подводную цепочку маяков позволит заметно повысить отказоустойчивость подводной связи и навигации в целом.

Поверхностные маяки, расположенные подо льдом, должны при этом иметь средства бурения льда и вывода антенны над его поверхностью. Кроме того, все поверхностные маяки (как расположенные подо льдом, так и свободноплавающие) должны быть самоходными и в случае сноса за счёт собственного дрейфа или движения льдов иметь возможность вернуться в требуемую позицию относительно подводных маяков, которые могут быть заякорены на дне.

Более дорогим, но и значительно более надёжным решением проблемы навигации и связи является прокладка 2-3 цепочек ультразвуковых маяков на расстоянии 50-100 км между цепочками и формирование из них сети.

8.2 Средства спасения

Средства спасения можно разделить на 2 группы: спасения экипажа и спасения груза.

Средства спасения экипажа должны быть направлены на безопасный подъем людей на поверхность, при необходимости – преодоление поверхностного слоя льда (например, путём бурения, как в поверхностных маяках), предоставление связи с аварийными службами и обеспечение выживания экипажа в условиях крайнего Севера до прибытия авиационных средств эвакуации. В случае наличия на небольшом удалении ледокольных судов можно рассчитывать на их прибытие для спасения экипажа. По морским правилам спасение экипажа производится бесплатно, спасение груза – за деньги. При этом следует отметить, что спасение вышедшего на поверхность малочисленного экипажа является значительно более простой технической задачей, чем спасение груза в десятки и сотни тысяч тонн.

Современные средства навигации и управления, в принципе, позволяют совсем отказаться от экипажа и передать управление подводными судами автопилотам. Аналогично авиационным автопилотам уже более 30 лет вполне по силам полностью самостоятельно проводить полёт начиная от рулётки от посадочного рукава в аэропорту отбытия до рулётки к рукаву в аэропорту прибытия. Но от экипажей никто отказываться не стремится, поскольку ответственность за грузы и пассажиров перевозчик передаёт пилоту, как субъекту права, что сделать с автопилотом пока невозможно. Если развитие искусственного интеллекта продвинется настолько далеко, что машинный интеллект станет субъектом права, тогда станет возможным исключить экипаж из управления как самолётами, так и автомобилями и судами, в том числе подводными.

Но, вероятно, на подводных судах этот переход произойдёт в последнюю очередь, поскольку стоимость груза в одном контейнере в среднем составляет \$150 тыс. и при перевозке в составе подводных судов 10000 TEU общая стоимость груза будет порядка \$1,5 трлн. Отправить в далёкий путь подо льды груз на \$1,5 трлн без человеческого присмотра перевозчики не скоро решатся. И одной из причин является относительная простота спасения экипажа подводного судна современными средствами обеспечения выживания и эвакуации.

Спасение груза в общем случае представляет собой более сложную задачу. Эвакуация груза авиационными или ледокольными средствами в условиях Северного Ледовитого океана является крайне дорогостоящей операцией, не только из-за стоимости перевозки, но и из-за сложности выгрузки контейнеров

из подводных судов в условиях Северного Ледовитого океана. И штатные средства спасения груза должны быть направлены не только на исключение затопления, но и на избегание необходимости эвакуации груза внешними средствами.

Аварийные ситуации отличаются от катастроф тем, что они не приводят к гибели судна, а от мелких неполадок – тем, что не позволяют продолжать движение без устранения аварии.

Основными причинами аварийных ситуаций являются:

- нарушение герметичности корпуса;
- неработоспособность движителей;
- отказ системы управления.

Далеко не все аварийные ситуации должны приводить к эвакуации грузов внешними средствами. Как правило, реакцией на возникновение аварийной ситуации должно быть всплытие под нижний край льда и обеспечение положительной плавучести всех «вагонов» и «локомотива» состава, а также бурение льда для выдвижения антенны аварийной связи и возможности эвакуации экипажа.

Если нарушения в работе системы управления привели к погружению ниже предельно разрешённой для регулярного плавания глубины, то это тоже должно приводить к автоматическому (не зависящему от работы основной системы управления) всплытию и всем сопутствующим действиям.

Если аварийная ситуация вызвана нарушением герметичности прочного корпуса одного или нескольких подводных судов состава, то всплытие позволит избежать воздействия сильного давления на лихтеры (а на воздействия избыточного давления 2-3 атмосферы, соответствующего глубинам в 20-30 м, они должны быть рассчитаны) и сбереечь груз.

Основным действием по спасению груза является ремонт – устранение причины (нескольких причин), вызвавшей аварийную ситуацию. Если экипаж не может справиться с ремонтом своими силами (после всплытия), то вызывается ремонтная бригада с необходимыми средствами, которые могут доставляться как авиацией, так и подводными судами.

Устранение течи бетонного корпуса подводного судна возможно в подводном (подлёдном) положении и является одной из наиболее простых ремонтных операций, которой должен быть обучен экипаж и иметь на борту необходимые для неё инструменты, средства (водолазные костюмы) и материалы. В перспективе операция может быть роботизирована.

При невозможности ремонта на месте системы двигатель-движитель и системы управления (которые распределены по составу) вагоны с неисправными компонентами перецепляются в хвост состава или к составу прибывшей ремонтной бригады, а недостающие компоненты, заменяются

пришедшими с ремонтниками исправными вагонами, которые содержат требуемые компоненты (двигатель, движители, элементы системы управления).

Готовность к устранению аварийных ситуаций – необходимая составляющая бесперебойной работы транспортной системы. Но основным средством борьбы с авариями является использование надёжных компонентов, их двух-, трёх- и более кратное дублирование и использование всего имеющегося арсенала методов обеспечения безаварийной работы.

8.3 Волновое сопротивление

При движении по поверхности водоизмещающих судов значительная часть расходуемой энергии приходится на волновое сопротивление, при скоростях порядка 40-50 км/ч (22-27 узлов) эта часть доходит до 50-60%. Энергия создаваемой при движении судна поверхностной волны расходуется вместе с волной по поверхности океана и теряется.

В ряде источников, например [10], указывается, что «подводная ходкость отличается тем, что волновое сопротивление отсутствует, $X_v = 0$ (начиная с глубины, равной половине длины лодки)». Данное утверждение верно только для приближенных оценок, более точные исследования [11] показывают, что волновое сопротивление с увеличением глубины движения подводной лодки значительно снижается, но не исчезает совсем. Причём движение подо льдом даже немного увеличивает значение волнового сопротивления. Движение под поверхностью воды (и льда) не полностью исключает формирование волн, но с удалением от раздела сред амплитуда волн уменьшается обратно пропорционально глубине согласно отношению:

$$A \approx R^2 / 2H,$$

где A – амплитуда волны, R – радиус поперечного сечения подводного судна, а H – глубина погружения, $H > R$, точная величина амплитуды волны зависит также от формы корпуса и скорости движения.

Важно, что при характерном радиусе поперечного сечения корпуса в 10 м при движении на глубине в 100 м амплитуда волны будет в 10 раз меньше, чем при движении непосредственно под поверхностью. При этом каплеобразный бульб (характерный для формы носовой части подводных судов) сейчас широко применяется и на надводных судах как раз для снижения величины волнового сопротивления и сопротивления движению в целом. Но если надводные суда не могут достичь дальнейшего уменьшения волнового сопротивления увеличением глубины движения, то для подводных судов таким путём доступно сокращение величины волнового сопротивления в 10 и более раз. Это (на скоростях движения 40-50 км/ч (22-27 узлов)) позволяет уменьшить общее сопротивление движению практически в 2 раза. Что, в свою очередь, даёт возможность или вдвое уменьшить мощность двигателя для достижения скоростей как на поверхности или, при сохранении той же мощности, немного повысить скорость.

При квадратичном законе роста силы сопротивления от скорости рост требуемой мощности происходит кубически от скорости. Следовательно, приращение скорости (в случае сохранения исходной мощности двигателя) будет небольшим, чуть больше 25% (поскольку $1,26 = \sqrt[3]{2}$). То есть вместо 50 км/ч на поверхности на глубине можно с теми же затратами мощности развивать скорость 63 км/ч.

Что интересно, не только увеличивается скорость движения, но и снижаются энергозатраты на преодоление единицы расстояния. Поскольку мощность та же, а скорость выше, расход энергии на 1 км пути будет на 26% ниже (при описанных выше условиях движения на глубине со скоростью 63 км/ч вместо движения по поверхности со скоростью 50 км/ч).

Если сохранять не мощность двигателя, а энергозатраты на единицу пути, то мощность надо увеличить в $1,41 = \sqrt[2]{2}$ (по сравнению с затрачиваемой на поддержание движения по поверхности со скоростью 50 км/час). Скорость движения на глубине при увеличенной в $\sqrt[2]{2}$ мощности двигателя составит 70,7 км/ч ($= 50 * \sqrt[2]{2}$), а расход энергии на километр пути будет совпадать с затратами при движении по поверхности воды со скоростью 50 км/ч.

8.4 Высокое давление

Вода является плохо сжимаемой жидкостью. Но это в сравнении с газами. Если сравнивать со сталью, то при приложении одинакового давления уменьшение объёма воды в 100 раз больше чем уменьшение объёма стали. Тем

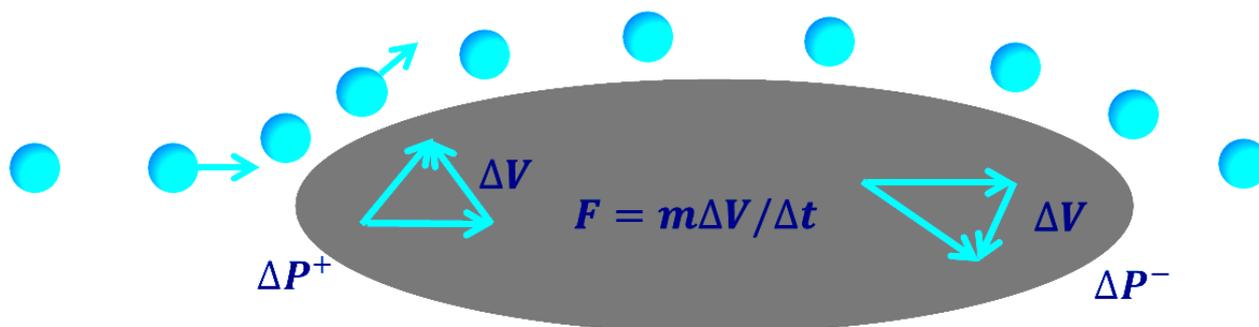


Рис. 14. Изменения скорости жидкости при обтекании тела

не менее, модуль упругости воды при 0° Цельсия и давлении 20 МПа составляет 1920 МПа. Сжимаемость является величиной, обратной модулю упругости, соответственно плотность воды на глубине 200 м всего на 1% превосходит плотность воды на поверхности, что несущественно влияет на условия обтекания движущегося подводного судна.

Наличие же высокого давления положительно сказывается на обтекаемости. Если на поверхности значительная часть изменения скорости

обтекающего потока на носу судна идёт на формирование волн, энергия которых рассеивается, то на глубине энергия, потраченная на изменение скорости потока, в большей мере возвращается давлением среды. Это приводит к уменьшению разности положительного прироста давления на носу судна ΔP^+ и отрицательного в районе кормы ΔP^- (рис. 14).

Тем не менее, с ростом скорости разность $\Delta P^+ - \Delta P^-$ возрастает. При этом если ΔP^+ может расти практически неограниченно, то ΔP^- не может быть по модулю больше давления спокойной воды на данной глубине. Нарушение данного условия приводит к возникновению кавитации и связанных с ней гидроударов.

Ещё хуже ситуация с изменениями давлений до и после прохождения гребного винта. Здесь всё происходит наоборот: перед винтом давление падает,

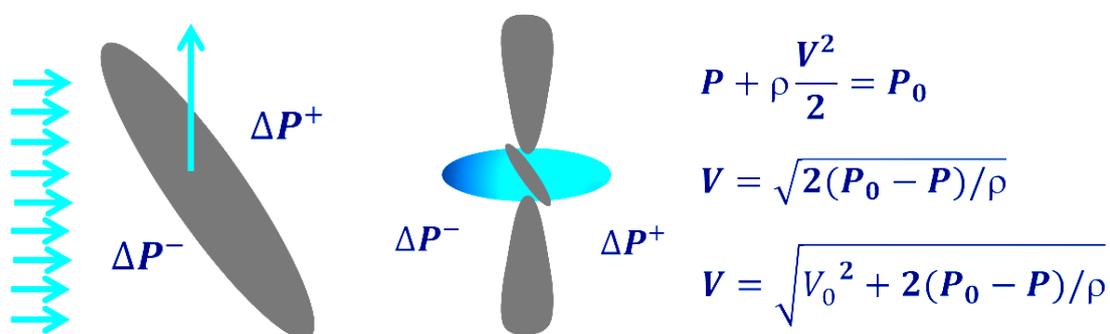


Рис. 15. Движение лопасти винта в потоке жидкости и скорость набегающей воды

а за винтом – возрастает. И если в случае обтекания тела переднее давление может возрасти неограниченно, то у гребного винта давление за ним может возрасти только до тех пор, пока давление перед винтом не упало до нуля (рис. 15).

Откуда следует, что максимальная скорость прохождения воды через винт зависит от величины давления P_0 и не может превосходить $V = \sqrt{2P_0/\rho}$. Соответственно ограничено и максимальное усилие тяги, развиваемое винтом:

$$F = ma = \frac{mV}{\Delta t} = \frac{\rho S V \Delta t V}{\Delta t} = \rho S V^2 = 2P_0 S \quad (\text{при } V = \sqrt{2P_0/\rho}),$$

где ρ – плотность воды, m – масса прогоняемой винтом воды за время Δt , a – ускорение воды, S – площадь винта, P_0 – давление воды. Результат вполне очевидный: тяга винта не может превосходить максимальную разность давлений до и после винта (равную $2P_0$), умноженную на площадь винта S .

С увеличением глубины движения повышается давление воды $P_0 = \rho gh$ (g – ускорение свободного падения, h – глубина), возрастает как максимально возможная скорость потока через винт, так и максимальная тяга. При этом если скорость потока растёт по корню от глубины, то тяга – пропорционально

глубине движения. Речь не об уменьшении затрачиваемой мощности, а об увеличении величины тяги, которую можно получить от винта заданной площади S при движении на глубине h , то есть об увеличении полезной мощности, которую винт может преобразовать в движение.

Совершенно необязательно достигать предельных режимов, когда за кормой или перед винтом давление воды приближается к нулю, что приводит к образованию кавитационных пузырьков. Они не только ухудшают гидродинамику обтекания, но и (при схлопывании) приводят к разрушительным для материалов корпуса судна и винта гидродинамическим ударам. Вполне достаточно задавать снижение давления до некоторых разумных величин, при которых кавитация не возникает.

Важно, что с увеличением глубины процент снижения величины давления может быть выше и достигается он при больших скоростях движения.

8.5 Высокотехнологичные решения

Ни в коем случае не следует рассматривать переход к созданию железобетонных судов как шаг назад по сравнению с технологией производства стальных плавсредств. Наоборот, именно успехи в развитии технологии бетонов и композитных материалов делают возможным заменить сложные энергозатратные технологии стального производства значительно более дешёвыми и менее трудоёмкими технологиями, основанными на использовании современных сортов бетона и получаемых на его основе композитных материалов.

Движение под водой наиболее эффективно при использовании ядерных энергетических установок (ЯЭУ). В России имеется большой опыт производства судовых ЯЭУ, можно сказать, что Россия – мировой лидер в данной области. Но до сих пор ЯЭУ в транспортных судах практически не использовались. В значительной мере это связано с возможными ограничениями на заход судов с ЯЭУ в гражданские грузовые порты. Лихтерная схема перевозок снимает данное ограничение и открывает простор для создания более надёжных и долговечных ЯЭУ (что особенно важно для условий Северного Ледовитого океана) для гражданского флота.

Но высокотехнологичные решения в проекте подводных транспортных судов для Северного Ледовитого океана не ограничиваются только новыми композитными материалами на основе бетона и совершенствованием ЯЭУ. Ряд других возникающих проблем требует высокотехнологичных решений, которые могут оказаться полезными и в других областях.

Подводные средства навигации и связи

Для субмарин ВМФ важнейшим качеством является скрытность перемещений, основанная на автономности плавания. Современные требования к гражданским транспортным судам, наоборот, состоят в использовании

нескольких альтернативных средств навигации (обеспечивающих дублирование их функций и повышенную надёжность) и каналов связи, позволяющих постоянно находиться в контакте не только с диспетчерами движения, но и с владельцами перевозимого коммерческого груза.

Разработка и внедрение надёжных средств навигации и связи для гражданских подводных судов выведет исследование и освоение мирового океана на новый уровень, поскольку данные средства необходимы для выполнения большинства подводных работ. Использование подводных средств навигации и связи в транспортных задачах также не должно ограничиваться акваторией Северного Ледовитого океана. Есть ещё антарктические области, которые тоже могут, при развитии технологий, быть использованы для перевозок грузов. Кроме того, ряд преимуществ движения под водой даёт основания полагать, что подводные суда могут приносить пользу не только в условиях, когда судоходство ограничено наличием ледового покрова.

Это позволяет надеяться, что подводные средства навигации и связи будут широко востребованы и современные технологии достаточно развиты, чтобы их разработать. В пункте 8.1 были рассмотрены некоторые варианты обеспечения надёжной навигации и связи для подводных транспортных судов. Но их разработка и внедрение возможны только в рамках достаточно крупных проектов, к которым можно отнести создание транспортного коридора в Северном Ледовитом океане.

Робототехнические решения

Общая современная тенденция состоит в постепенной передаче всё большего числа выполняемых человеком операций автоматическим системам и роботам. Это не только снижает стоимость выполняемых действий, но и повышает качество их выполнения, снижает процент возникновения аварийных ситуаций. Человеку же во всё большей степени отводится функция контроля за выполнением операций и, при необходимости, корректировки их выполнения.

Предполагаемая организация движения подводных судов в составе рассчитана на отсутствие экипажа на борту большинства «вагонов». Человеческое присутствие предполагается только в «локомотиве» и, возможно, в «вагоне» с ЯЭУ.

В отсутствие экипажа выполнение различных операций с «вагонами» возможно средствами телеуправления. Но для обеспечения надёжного и эффективного выполнения рутинных операций необходимо развитие робототехнических средств.

Одними из важнейших операций для всего проекта являются погрузка лихтеров на борт подводных судов и их выгрузка. Большое число параметров, которые необходимо согласовывать в процессе выполнения данных операций потребуют, как минимум, автоматизации процесса, для снятия чрезмерной

нагрузки с операторов. Но ещё лучше сделать процесс полностью автоматическим, доверив его робототехническим системам.

При этом достигается не только снижение численности экипажа, но и перевод его деятельности с выполнения рутинных операций на контроль качества их осуществления, что тоже служит улучшению показателей безаварийной работы.

Электротехнические решения на основе сверхпроводников

Одним из важнейших современных технологических достижений является всё более широкое внедрение сверхпроводящих устройств в электротехнические решения. Движение подводных судов в составе предполагает выработку силовой установкой электроэнергии и передачу её распределённым по длине вдоль состава движителям (рис. 16).



Рис. 16. Доставка энергии от силовой установки к движителям состава

Все этапы преобразования и передачи энергии целесообразно осуществлять с использованием сверхпроводящих устройств. Это связано как с большой мощностью (десятки МВт) силовой установки, так и со значительными расстояниями её передачи (от сотен метров до 2-3 километров). Экономия даже нескольких процентов потерь в каждом из устройств за счёт использования сверхпроводимости выльется в мегаваттные приращения энергии, используемой для движения состава.

МГД-двигатели

Несколько особняком от перечисленных выше высокотехнологичных решений стоит магнитогидродинамический (МГД) движитель. Если упоминавшиеся выше технологии в той или иной степени уже неоднократно использовались при решении различных коммерческих задач, то использование МГД-двигателей для транспортных судов пока дальше экспериментов (причём не вполне удачных) не пошло.

Работоспособность МГД-двигателя неоднократно была продемонстрирована, в том числе и в качестве судового движителя. Но его коммерческому внедрению мешает то, что пока что достигнутая эффективность МГД-двигателя в разы проигрывает гребному винту. Основные причины низкой эффективности – плохая проводимость морской воды и относительная дороговизна создания сильного магнитного поля (с индукцией в несколько единиц тесла).

МГД-двигатель перспективно более надёжное устройство, чем гребной винт. Особенно привлекательно в МГД двигателе отсутствие движущихся механических частей. В экстремальных условиях Северного Ледовитого океана, когда выполнение любых ремонтных работ сопряжено со значительно большими трудностями, чем в тёплых морях, это может быть поводом закрыть глаза на несколько меньшую эффективность МГД-двигателя по сравнению с гребным винтом.

Кроме того, за последние годы наметился определённый прогресс в создании источников магнитного поля: получили распространение мощные неодимовые магниты, есть существенные продвижения в создании сверхпроводящих соленоидов, в том числе и на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП).

Но главной причиной рассматривать возможность применения МГД-двигателя на подводных транспортных судах являются результаты анализа параметров, которые необходимо достичь для повышения его эффективности.

Работа МГД-двигателя основана на получении силы Ампера при протекании тока в магнитном поле: $d\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} dV = I d\vec{l} \times \vec{B}$, где F – сила Ампера [Н], I – сила тока [А] (\vec{j} – плотность тока), l – длина проводника с током [м], B – индукция магнитного поля [Тл], v – объём [м³]. Если в однородном поле ток перпендикулярен индукции поля, то $F = IlB$ (рис. 17).

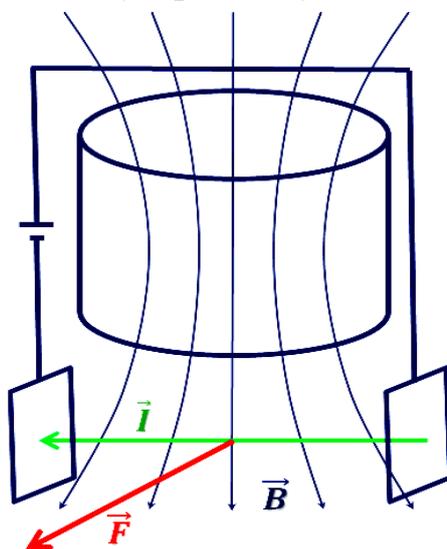


Рис. 17. Сила Ампера

Для поддержания движения крупных судов (в том числе и подводных составов) необходимо прилагать усилие (компенсирующее сопротивление

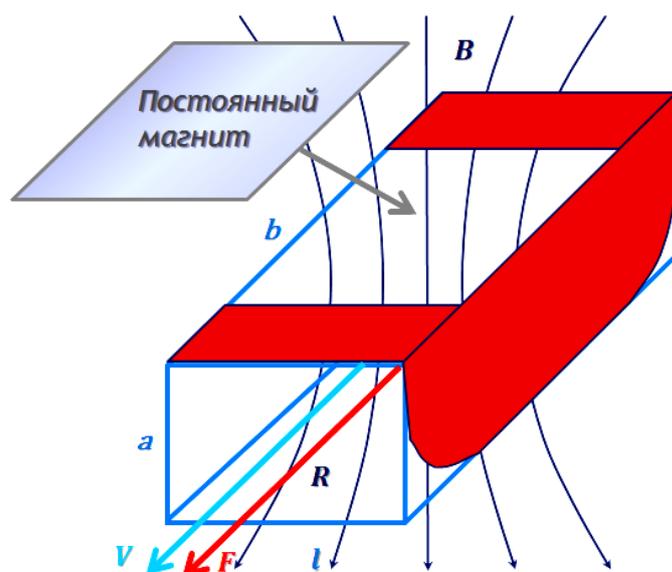


Рис. 18. Источники поля: соленоид с током и постоянный магнит

движению) в несколько сотен тонн силы. Например, $300 \text{ тс} = 3 \cdot 10^6 \text{ Н}$. Если расстояние между электродами 10 м, а индукция магнитного поля составляет 3 Тл, то для получения требуемого усилия в 300 тс необходимо пропускать через воду ток силой 100000 А. При характерных мощностях $W = UI$ силовых установок крупных судов в 50 МВт напряжение U между электродами может составлять 500 В.

Естественно, что ток следует пропускать не вдали от соленоида, где индукция магнитного поля слабая, а там, где индукция максимальна. Для этого надо использовать соленоиды отличной от тора формы и/или постоянные магниты (рис. 18).

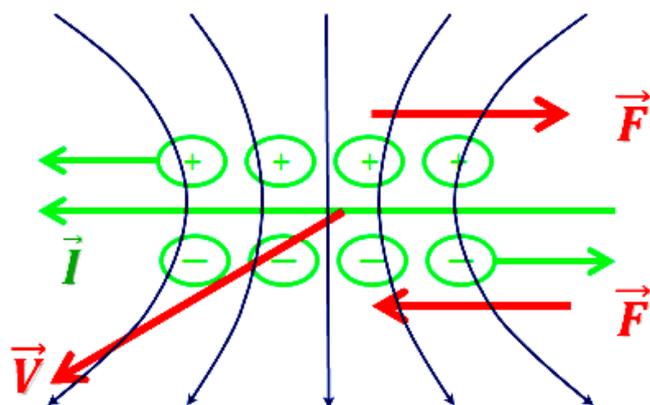


Рис. 19. Сила Лоренца действует против движения зарядов

Когда МГД-двигатель разгоняет поток воды до скорости V , то на движущиеся в магнитном поле заряды начинает действовать сила Лоренца $\vec{F} = q\vec{V} \times \vec{B}$, направленная против направления электрического тока. На расстоянии

между электродами l сила Лоренца (рис. 19) создаёт электродвижущую силу ε [В] (A – работа по перемещению заряда [Дж], q – величина заряда [Кл], F – сила [Н], V – скорость движения [м/с], B – индукция магнитного поля [Тл], l – длина пути [м]):

$$\varepsilon = \frac{A}{q} = \frac{\vec{F}l}{q} = \vec{V} \times \vec{B} \times \vec{l},$$

которая также направлена против направления тока. Приложение к электродам напряжения U позволяет направить электрический ток против ЭДС, создаваемой силой Лоренца, и совершать полезную работу в виде получения силы Ампера.

Таким образом, протекающий через воду ток в МГД-двигателе расходует энергию приложенного напряжения $U_{\text{вн}}$ на две составляющие: нагрев воды (за счёт преодоления её омического сопротивления) и полезную работу (создание силы Ампера при преодолении ЭДС, создаваемого силой Лоренца):

$$U_{\text{вн}} = U_{\text{ом}} + \varepsilon = IR + VBl$$

(здесь R – электрическое сопротивление воды [Ом]).

Зависимость скорости потока воды в МГД-двигателе является функцией не только приложенных напряжения и созданной силы тока, но и ряда гидродинамических параметров как самого МГД-двигателя, так и судна, на котором он установлен. Это не позволяет посчитать скорость потока V при поданном напряжении $U_{\text{вн}}$ по электрическим и магнитным параметрам МГД-двигателя. Можно только для любого $U_{\text{вн}}$ рассчитать скорость потока V_0 , при превышении которой двигатель превращается в генератор тока (ток потечет в направлении, противоположном приложенному напряжению $U_{\text{вн}}$).

Зато можно оценить КПД МГД-двигателя η , если все его параметры известны, включая силу тяги F , которая определяет необходимую силу тока I (по закону Ампера $F = IlB$):

$$\eta = \frac{\varepsilon}{U_{\text{ом}} + \varepsilon} = \frac{VBl}{IR + VBl} = \frac{VBl}{RF/Bl + VBl} = \frac{Vl^2B^2}{RF + Vl^2B^2}.$$

Выражение явной зависимости КПД η позволяет указать причины, по которым установка МГД-двигателя на подводном судне является более эффективной, чем на судах, ходящих по поверхности. Таковых причин не менее шести, и они сведены в таблицу 3.

Немного более подробно расскажем о преимуществах подводных судов как транспортных средств для установки МГД-двигателей.

1. Одним из основных ограничений на создание магнитных полей с высокой индукцией является прочность соленоидов. В лабораторных опытах без разрушения соленоидов удалось создать поля не выше 100 Тл, тогда как если позволить магнитному полю разорвать

соленоид, то импульсное значение индукции может превышать 2000 Тл. В целом, увеличение прочности соленоида связано с увеличением его массы. Поскольку для подводных судов увеличение массы (в том числе соленоидов МГД-двигателей) является желательным свойством (в отличие от надводных судов), это создаёт условия для создания источников магнитного поля с более высокой индукцией.

Таблица 3.

Использование МГД-двигателя в составах из подводных транспортных судов позволяет повысить его эффективность:

1	Увеличивать индукцию магнитного поля	Практически нет ограничений на вес источников магнитной индукции, что позволяет делать их особо прочными
2	Уменьшать электрическое сопротивление	Отказ от плавания в поверхностных слоях воды с низкой солёностью Меньше ограничений на размер электродов
3	Увеличивать скорость движения	Подводный состав уменьшает удельную площадь поперечного сечения, подводное плавание снижает волновое сопротивление
4	Увеличивать скорость потока воды в канале МГД-двигателя	Высокое давление на глубине позволяет сильнее разгонять воду на входе в канал МГД-двигателя
5	Увеличивать поперечный размер МГД-двигателя	Меньше ограничений на размер МГД-двигателя в целом
6	Уменьшать удельную силу тяги	Требования прочности и устойчивости движения состава предполагают использование нескольких двигателей

2. Электрическое сопротивление воды является её свойством, которое изменить нельзя. Но можно выбирать маршруты с повышенной солёностью, которая уменьшает сопротивление воды (и избегать маршрутов с пониженной солёностью). Как правило, пониженная солёность морей и океанов вызвана стоком рек и таянием льдов, при этом менее плотная почти пресная вода находится на поверхности и плохо перемешивается с нижними, более солёными и плотными слоями. Если движение происходит не по поверхности, а на глубине 100 м, то солёность воды заведомо выше поверхностной, значит, и омическое сопротивление воды ниже.

Если свойства воды менять нельзя, то можно формировать параметры канала, по которому течёт ток. С ростом поперечного сечения проводника тока его электрическое сопротивление падает. Но сечение проводника тока определяет и размеры МГД-двигателя, которые не могут быть бесконечными. Ограничения на размеры МГД-двигателя связаны, в числе прочего, с удобствами швартовки судна в порту. Подводные суда, работающие по лихтерной схеме и не предназначенные для регулярных заходов в порты, от этого ограничения свободны.

3. Движение на глубине позволяет сформировать из подводных судов состав (поскольку там мало влияние поверхностных волн), чем существенно уменьшить удельное лобовое сопротивление на одно судно. Одновременно движение на глубине позволяет значительно сократить волновое сопротивление. Оба этих фактора служат повышению скорости движения по сравнению с надводными судами.
4. Скорость потока воды в МГД-двигателе всегда выше скорости потока, в котором осуществляется движение. А чем выше скорость потока, тем выше КПД МГД-двигателя. Но, как рассматривалось в случае с гребным винтом, закон Бернулли не позволяет бесконечно увеличивать скорость жидкости в канале МГД-двигателя. Максимальная скорость V в канале определяется скоростью встречного потока V_0 и его давлением P_0 по формуле:

$$V = \sqrt{V_0^2 + 2P_0/\rho},$$

где ρ – плотность воды. С увеличением глубины растёт давление. Если у поверхности воды (где давление близко к атмосферному) приращение скорости невелико, то при движении на глубине 100-150 метров приращение скорости больше в 3-4 раза. Например, при движении судна со скоростью 15 м/с и расположении МГД-двигателя на глубине 10 м (где давление 2 Атм) максимально возможное приращение скорости в канале не может превышать 10 м/с. На практике это делает реальными приращения в 5-7 м/с. Если осуществлять движение с той же скоростью 15 м/с на глубине 130 м (где давление 14 Атм), то максимально возможное приращение скорости в канале теоретически не может превышать уже 40 м/с, а практически может составлять 35-37 м/с, что даёт выигрыш в приращении скорости в 5-7 раз (и порядка 2,5 раз по скорости потока в канале МГД-двигателя).

5. Так же, как и размер электродов, поперечное сечение МГД-двигателя (определяющее длину проводника с током в формуле

силы Ампера) не ограничено требованиями удобства швартовки, что даёт некоторые преимущества при выборе оптимальных параметров.

6. Выше, в пункте 7.2, обосновывалась необходимость иметь несколько движителей для устойчивости движения состава и снижения силовых нагрузок на «вагоны». Наличие нескольких движителей означает, что каждый отдельный движитель развивает только часть от необходимой для движения состава тягу. Поскольку движителей в составе планируется порядка 10 и более, то уменьшение силы тяги в 10 и более раз даст заметный прирост КПД.

Ещё раз проанализируем формулу для КПД МГД-двигателя:

$$\eta = \frac{Vl^2B^2}{RF + Vl^2B^2},$$

но уже с экономической стороны. Для увеличения КПД надо увеличивать Vl^2B^2 и снижать RF . Изменение всех параметров в требуемую сторону связано с увеличением затрат. Большие линейные размеры (увеличивающие l и уменьшающие R), более сильное магнитное поле B , меньшая тяга на один движитель F связаны с созданием более крупных движителей с более дорогими источниками магнитного поля и в большем числе. Даже увеличение скорости V в канале МГД-двигателя тоже требует больших затрат – нужны более мощные силовые установки, будет более высокий расход энергии на передвижение судна.

Но, в отличие от остальных параметров, увеличение скорости потока воды V в канале МГД-двигателя не требует дополнительного расхода дорогих материалов источников магнитного поля. Кроме того, рост эксплуатационных расходов на перевозки с большей скоростью в значительной степени оправдывается их повышенной коммерческой привлекательностью. И, если остальные параметры в той или иной степени могут быть улучшены и на надводных судах, то существенное увеличение скорости потока воды V в канале МГД-двигателя возможно только при движении на глубине 100 и более метров.

И особенно перспективно использование не имеющих подвижных частей МГД-двигателей (что заметно повышает их надёжность) подо льдами Северного Ледовитого океана, когда устранения любых проблем с винтомоторной группой является существенно более сложной задачей, чем аналогичная операция на поверхности тёплых морей.

9 Приблизительные оценки экономической эффективности реализации проекта строительства и эксплуатации подводного транспортного флота

В данном пункте рассматриваются оценки возможных затрат при строительстве флота подводных судов для решения конкретной задачи коммерческих перевозок. В качестве такой задачи выбран захват 5-10% рынка евро-азиатских контейнерных перевозок. По разным оценкам за год по маршруту ЮВА–Европа ежегодно перевозится порядка 10-20 млн TEU. Соответственно, для захвата 5-10% рынка необходимо иметь флот, способный по данному маршруту за год перевезти 1 млн TEU – круглая цифра, удобная для проведения оценочных расчётов.

9.1 Оценка состава флота

10 составов по 10 "вагонов" на 1000 контейнеров:

Время в пути по транзитному коридору — порядка 2 недель, оборачиваемость — 1 месяц (путь туда-обратно). Будем считать (для простоты!), что 1 состав за год успеет сделать 10 рейсов туда-сюда.

Если планировать регулярные перевозки (для захвата устойчивой доли рынка), то необходимо хотя бы раз в три дня отправлять очередной состав. В месяц — 10 разных составов, потом вернётся первый отправленный.

Чтобы за год (10 месяцев!) перевезти 1 млн TEU, каждый месяц необходимо перевозить 100 тысяч контейнеров и каждые три дня отправлять по 10000 контейнеров с одним составом. Это может быть 5 лихтеров на 2000 TEU или 10 лихтеров на 1000 TEU. Второй вариант удобнее для проведения оценочных расчётов.

10 лихтеров могут стоять в порту под загрузкой/разгрузкой. Необязательно всем лихтерам всё время находиться в акватории, можно разгрузиться, погрузиться и выйти на рейд в ожидании локомотива, который появится с прибытием очередного состава. Прибывший состав (из 10 лихтеров) уйдёт на разгрузку/погрузку, а загруженные лихтеры можно отправлять в рейс. Поскольку локомотив с ДВС тоже требует время на заправку и обслуживание, возможно, будет необходимо иметь для каждого состава свой локомотив.

Перед началом ледового участка маршрута лихтеры необходимо загрузить на подводные транспортные суда (по одному на судно), и подводный локомотив с ядерной энергетической установкой (ЯЭУ) осуществит их транспортировку на другую сторону от ледового участка маршрута.

Итого нужно иметь 100 лихтеров в движении, 20 лихтеров под загрузкой, 50 подводных транспортных судов и 12 локомотивов, 7 на двигателе

внутреннего сгорания (ДВС), для движения по поверхности, и 5 с ядерной энергетической установкой (ЯЭУ), для движения под водой.

И следует предусмотреть расходы на станции загрузки/разгрузки подводных транспортных судов (стационарные или плавучие) и организацию навигации и служб спасения вдоль транзитного коридора.

9.2 Цена строительства отдельных судов

Расходы на одно подводное транспортное судно (в Таблице 4 – вагон):

- на бетон - 80 млн руб.,
- на металл - 160 млн руб.,
- работы по строительству корпуса судна - 200 млн руб.,
- движители, аккумуляторы, средства управления и связи с монтажом - 220 млн руб.

Итого 660 млн руб.

- Ещё 140 млн руб. на непрямые расходы.

В сумме — 0,8 млрд руб.

Дополнительные расходы на ДВС с обвязкой 0,8 млрд руб., если с атомным реактором — 4,2 млрд руб. (для локомотивов).

Есть ещё стоимость лихтеров. Их стоимость в 3-4 раза ниже стоимости подводного судна, примерно на уровне 250 млн руб.

Кроме того, будут затраты на станции загрузки/разгрузки подводных транспортных судов (стационарные или плавучие), обозначенные в Таблице 3 как «Подводные станции», и на организацию навигации и служб спасения вдоль транзитного коридора, обозначенные в Таблице 3 как «Навигации, средства». Все вышеперечисленные расходы сведены в Таблицу 3 и составляют порядка 135 млрд руб. Поскольку все цифры оценочные, правильнее говорить о порядке стоимости проекта, в пределах 100-200 млрд руб.

9.3 Общая сумма затрат на реализацию проекта

Все предполагаемые затраты на реализацию проекта сведены в таблицу 4. Весь флот составляют 182 судна, из которых 55 являются подводными.

Кроме строительства флота, в расчёт расходов вошло строительство подводных станций для обеспечения погрузки–разгрузки лихтеров и средства навигации и связи. Остальные связанные с проектом расходы, такие как НИР и ОКР, создание аварийной ремонтной службы, средств спасения, организация медицинского обслуживания экипажей и прочие отнесены к непрямым расходам, на которые предполагается потратить более 15 млрд руб.

Цифры в таблице выделены различными цветами: синие цифры – штуки, зелёные – миллионы рублей, красные – миллиарды.

Таблица 4.

	Сталь (млн руб.)	Бе- тон	Ра- бота	Обору- дование	Силовая установка	Непрямые расходы	Цена	Шт.	Сумма (млрд руб.)
Вагон	160	80	200	220	-	140	800	50	40
Лихтер	40	20	50	100	-	40	250	120	30
Локомотив ДВС	50	20	250	270	800	210	1600	7	11,2
Локомотив ЯЭУ	170	80	300	310	4000	140	5000	5	25
Всего, флот								182	106,2
Подводные станции	80	80	300	300	800	240	1800	6	10,8
Навигации, средства									18
Итого (млрд руб.)	14,48	7,42	21,05	28,24	30,40	15,41		188	135

9.4 Сравнение стоимости проекта с аналогами

Расходы на одно судно (вагон) по предварительным оценкам составят 0,8 млрд руб., на 50 подводных судов – всего 40 млрд руб. Но без реализации остального проекта подводные суда ходить не смогут. Следовательно, следует оценивать стоимость одного подводного судна как общую стоимость проекта, делённую на число подводных судов. При таких расчётах расходы на 1 подводное судно составят 2,7 млрд руб.

300-квартирный жилой дом имеет сравнимые размеры и тоже из бетона.

Но цена бетона – не главный компонент цены квартиры. Больше стоит земля и удобство месторасположения. Есть и другие расходы: в стоимость квартир включают и лестницы-лифты-коридоры, и инженерные коммуникации, и улично-дворовую дорожную сеть, и детсады-школы-поликлиники. И всевозможные согласования и прочее...

Квартира (100 квадратов) в Москве на окраине стоит ~10 млн руб.

Стоимость 300 квартир — 3 млрд руб., что вполне сравнимо с затратами на одно подводное судно — 2,7 млрд руб. (с учётом затрат на остальную структуру перевозок).

9.5 Оценка стоимости перевозок

Цена перевозки одного контейнера по маршруту ЮВА–Западная Европа в последние 2 года колеблется в пределах \$600-\$1000. В последние месяцы стоимость перевозки стандартного контейнера (TEU) Шанхай–Северная Европа находилась в пределах \$700-\$900 [12] (рис. 20).

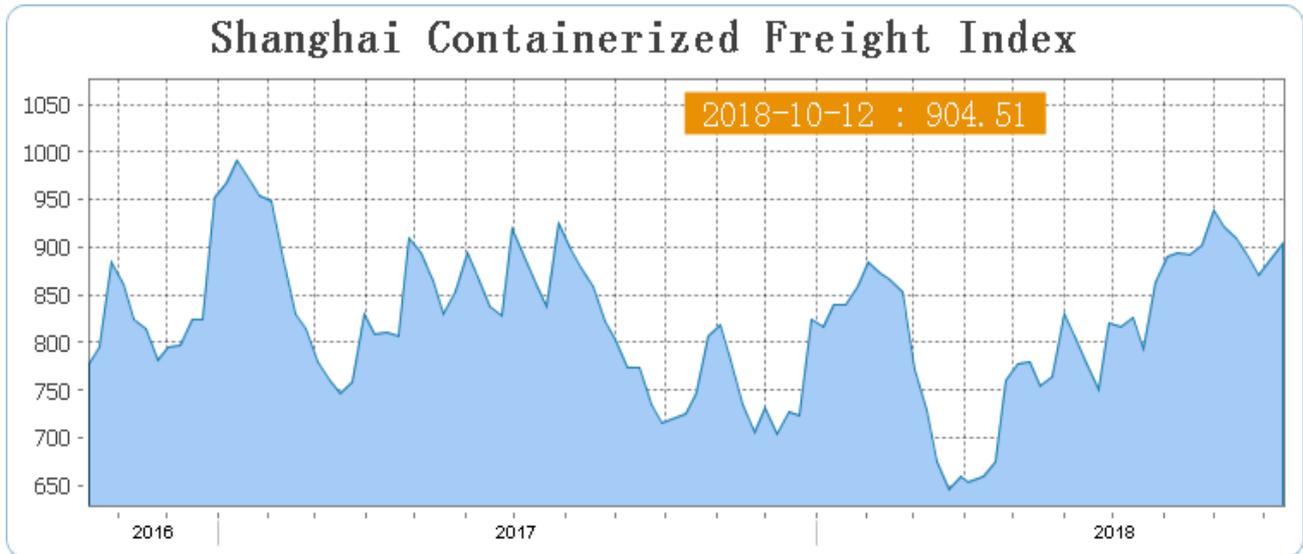


Рис. 20. Shanghai Containerized Freight Index от 12 октября 2018 г.

Поскольку сроки доставки грузов по транзитному коридору через Северный Ледовитый океан предполагаются на 15-20 суток короче южных маршрутов, то можно предположить, что рыночная цена таких перевозок будет выше.

Насколько выше может быть цена более быстрой доставки?

Товар в пути омертвляется вместе с деньгами, затраченными на его производство. При ставке кредита в 3,65% годовых на его обслуживание расходуется 0,01% от его суммы ежедневно.

При средней стоимости товара в контейнере в \$150000 каждый день пребывания контейнера в пути обходится его владельцу в \$15 на обслуживание кредита.

За 15-20 дней набегает \$225-\$300 на 1 TEU.

Владельцу контейнера выгоднее заплатить дополнительные \$200 за более быструю доставку, чем тратить лишние \$225- \$300 на обслуживание кредита.

Кроме того, что уменьшаются расходы, более быстрая доставка даёт ряд конкурентных преимуществ на товарном рынке, например, повышается удовлетворённость покупателей. Уменьшается время (в 2 и более раз) оборачиваемости контейнеров (что позволяет обойтись меньшим парком TEU) и есть другие причины выгоды для клиентов более быстрой доставки.

Итого: к стандартной цене доставки \$800 можно добавить \$200, что в сумме составит \$1000 за перевозку одного TEU по маршруту Шанхай–Северная Европа через транзитный коридор в Северном Ледовитом океане.

9.6 Статьи эксплуатационных расходов

Эксплуатационные расходы складываются из затрат на топливо, погрузку/разгрузку, портовых сборов, прочих расходов, куда входит

техническое обслуживание, зарплата экипажу и службам, непредвиденных расходов. Все расходы в Таблице 5 приведены для состава из 10 вагонов

Таблица 5.

Источник затрат	Ед. измерен.	Цена min	Цена max
Топливо ДВС	7,5 дней	15 млн руб.	30 млн руб.
Топливо ЯЭУ	7,5 дней	3,5 млн руб.	7,5 млн руб.
Погрузка - разгрузка TEU	10000 штук TEU	2 млн руб.	10 млн руб.
Портовые сборы	—	10 млн руб.	40 млн руб.
Прочие расходы	—	10 млн руб.	40 млн руб.
Непредвиденные расходы	—	9,5 млн руб.	22,5 млн руб.
Сумма:		50 млн руб.	150 млн руб.

грузоподъёмностью по 1000 контейнеров каждый при одном заходе в порт и однократном прохождении транзитного коридора и прилегающих акваторий в одну сторону.

Затраты за 1 год на 10 составов по 10 рейсов в 2 стороны составят $10 \times 10 \times 2 = 200$ стоимостей расходов на рейс одного состава в одну сторону, что выразится в сумме от 10 до 30 млрд руб. в год на эксплуатационные расходы по проекту в целом.

9.7 Оценка времени окупаемости проекта

При цене за перевозку 1 TEU в \$1000 за доставку 1 млн TEU можно получить \$1 млрд, или 60 млрд руб. Доходы=Выручка-Затраты могут составить от 30 до 50 млрд руб. в год.

При годовых доходах от 30 до 50 млрд руб. в год время окупаемости проекта общей стоимостью в 135 млрд руб. составит от 3 до 5 лет. Если расходы на реализацию проекта сильно возрастут (например, до 300 млрд руб.), то сроки окупаемости составят от 6 до 10 лет, что для транспортного проекта является вполне приемлемыми цифрами.

9.8 Потери от задержки с началом проекта

Проект может начать приносить прибыль только после его реализации. Задержка с реализацией проекта приводит к потере прибыли, которую можно оценить по прогнозируемым доходам. Если взять годовые доходы в диапазоне от 30 до 50 млрд руб. в год, пусть для определённости 31,5 млрд руб., то учитывая, что в году 31,5 млн секунд, каждая секунда задержки с началом проекта приводит к потере 1 тысячи рублей. Или 3,6 млн руб. в час, 86,4 млн руб. в день и порядка 2,5 млрд руб. в месяц.

Конечно, реализация проекта потребует затрат. Но она будет создавать новые рабочие места, укреплять авторитет России и её суверенитет над северными территориями и акваториями экономической зоны. Затраты окупятся меньше чем за 10 лет, а созданный флот будет приносить прибыль и дальше, поскольку оборудование судов рассчитано на срок эксплуатации 30-40 лет, а железобетонные корпуса судов могут служить 100 и более лет. Учёт всех этих параметров может уточнить приведённые в предыдущем абзаце цифры, но порядок величины потерь от задержки с реализацией проекта не изменит.

При этом следует отметить, что данные потери возможной прибыли относятся только к выбранной для примера задаче захвата 5-10% рынка евроазиатских контейнерных перевозок. При успешной реализации первого этапа проекта и процент на данном направлении может быть увеличен, и это направление – не единственное для перевозок подо льдом Северного Ледовитого океана. Охват более широкого рынка перевозок позволит в разы повысить доходы от освоения транспортного коридора, сравнимого по значимости в мировой логистике с Суэцким и Панамским каналами.

10 Перспективы развития проекта

Наиболее сложным является вопрос запуска проекта. В настоящее время рассматривается заявка на грант для проведения предварительных исследований. Также осуществляются контакты с профильными организациями для вовлечения их в развитие проекта и подачи совместных грантов.

Если предварительные исследования состоятся и будут успешными, то на первом этапе необходимо проведение опытно-конструкторских работ с разработкой и изготовлением прототипов подводных транспортных судов, реализующих полную схему транспортных перевозок. Вероятно, на этом этапе целесообразно изготовление и испытание комплекта моделей в масштабе от 1:5 до 1:2 от предполагаемой величины полноразмерных судов.

Если и этот этап будет преодолен, то можно будет приступать к строительству коммерческого флота согласно выработанным в процессе исследований и испытаний рекомендациям.

В зависимости от коммерческого успеха перевозок по транзитному коридору по Северному Ледовитому океану можно будет планировать

дальнейшее развитие численности флота. Которое, после отработки основных вопросов, будет значительно дешевле строительства первоначального состава флота для решения одной задачи коммерческих перевозок, которая была использована как пример для проведения предварительных расчётов.

Работа была поддержана грантами РФФИ (проекты 18-011-00567 и 18-511-00008) и Программой фундаментальных исследований президиума РАН «Научные основы развития научно-информационного комплекса в контексте глобальных трансформаций» (проект 3.2).

Список литературы

1. Путин В.В. Перед нами стоят масштабные задачи по освоению Арктики. <https://mir24.tv/news/16281465/putin-pered-nami-stoyat-masshtabnye-zadachi-po-osvoeniyu-arktiki>, 08.12.2017
2. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Проводка крупнотоннажных судов ледоколами с увеличенной скоростью: исследования в ледовом бассейне. // Арктика: экология и экономика №3(31) 2018, М.: ИБРАЭ РАН, 2018, с. 76-82.
3. Бондурянский З.П., Дьячков М.А., Меламед Э.Е. Морские железобетонные суда (проектирование корпуса), Л.: Судостроение, 1966. — 198 с.: ил.
4. Правила постройки корпусов морских судов и плавучих сооружений с применением железобетона. Российский морской регистр судоходства, 2000, 84 с.
5. ЦКБ «Монолит» <https://monolit-kb.ru>
6. Инфографика "Северный поток – 2". РИА-новости, 16.02.2018 <https://ria.ru/infografika/20170523/1494913866.html?inj=1>
7. Пономарев А.Н. Нанобетон – концепции и проблемы // Строительные материалы, №7, 2007, с. 2-4.
8. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологий // Инженерно-строительный журнал, №6, 2009, с. 25-33.
9. Andrey Ponomarev, Timur Plavnik “Clever House Made by Using a New Kind of the Nanocomposites” Advanced in Civil Engineering, Hundai Publishing Corporation, article ID 8760549, 2016,5 pages, DOI:10.1155/2016/87 60549, ISSN 1687-8094
10. https://ru.wikipedia.org/wiki/Теория_подводной_лодки
11. Земляк В.Л. Исследование волнового сопротивления подводного судна при движении под ледяным покровом // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема, no. 2, 2011, pp. 61-67.
12. <http://en.sse.net.cn/> (Shanghai Containerized Freight Index)